

RECOMMANDATION UIT-R F.1108-3

Détermination des critères nécessaires à la protection des récepteurs du service fixe des émissions de stations spatiales opérant sur des orbites non géostationnaires dans des bandes de fréquences partagées

(Questions UIT-R 118/9 et UIT-R 113/9)

(1994-1995-1997-2002)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que la Conférence administrative mondiale des radiocommunications chargée d'étudier les attributions de fréquences dans certaines parties du spectre (Malaga-Torremolinos, 1992) (CAMR-92) a attribué à des services par satellite, à titre primaire avec égalité des droits, des portions de spectre également attribuées au service fixe;
- b) que les exploitants des services par satellite souhaiteront peut-être exploiter des stations spatiales sur des orbites non géostationnaires (non OSG);
- c) que les émissions de stations spatiales non OSG et partageant la même portion de spectre risquent de brouiller les stations de réception du service fixe;
- d) qu'étant donné la grande visibilité géographique des émissions produites par des stations spatiales non OSG, la coordination de l'utilisation des fréquences avec des stations du service fixe risque de ne pas être possible;
- e) que les systèmes du service fixe doivent satisfaire aux exigences de qualité de fonctionnement dans les conditions du mois le plus défavorable;
- f) que la dégradation de la qualité de fonctionnement d'un système du service fixe dépend de la somme des dégradations dues aux émissions de toutes les stations spatiales qui sont visibles par lui;
- g) qu'il est possible d'étudier la puissance surfacique à la surface de la Terre des émissions de stations spatiales non OSG en appliquant des méthodes statistiques aux résultats de simulations par ordinateur,

recommande

1 que les critères de partage de fréquences applicables à des systèmes du service fixe partageant des portions de spectre avec des stations spatiales non OSG tiennent compte de la puissance surfacique totale des émissions produites par l'ensemble des stations spatiales visibles des stations du service fixe en un quelconque point de la Terre;

1.1 que le niveau de brouillage tolérable soit défini en termes de puissance surfacique (W/m^2), dans une largeur de bande agréée;

2 que des limites de puissance surfacique soient déterminées sur la base d'une application statistique des principes énoncés dans la Recommandation UIT-R F.758, dans le cas de systèmes hertziens fixes (FWS, *fixed wireless systems*) numériques, et dans la Recommandation UIT-R SF.357, dans celui de FWS analogiques (méthode à l'étude);

3 qu'il soit dûment tenu compte du fait que la Recommandation UIT-T G.826 (dont découlent les Recommandations UIT-R F.1397 et UIT-R F.1491) impose des objectifs de performance d'erreur plus stricts pour les FWS numériques;

4 que les limites de la puissance surfacique tiennent compte des paramètres des orbites des stations spatiales utilisant la bande;

4.1 que les méthodes présentées à l'Annexe 1 puissent être utilisées pour déterminer les statistiques de visibilité des stations spatiales opérant sur des orbites circulaires;

4.2 que la dégradation de la qualité de fonctionnement des systèmes analogiques due aux émissions d'une seule ou de plusieurs stations spatiales soit déterminée à l'aide des méthodes décrites à l'Annexe 2;

4.3 que la dégradation de la qualité de fonctionnement des systèmes numériques due aux émissions d'une seule ou de plusieurs stations spatiales soit déterminée à l'aide des méthodes décrites à l'Annexe 3 (voir la Note 1);

4.4 que les méthodes décrites dans l'Annexe 4 soient utilisées pour déterminer les effets produits par les émissions d'une seule ou de plusieurs stations spatiales sur les systèmes numériques fonctionnant en mode diversité (voir la Note 2);

4.5 que les considérations développées dans l'Annexe 5 soient prises en compte pour évaluer la non-uniformité du brouillage au cours d'un mois quelconque;

4.6 que la méthodologie exposée dans l'Annexe 6 soit appliquée pour déterminer la distribution cumulative du rapport de la puissance reçue à la somme des puissances du bruit et du brouillage, ainsi que la diminution correspondante de la marge de protection contre les évanouissements due aux émissions d'une seule ou de plusieurs stations spatiales (voir la Note 3);

4.7 que l'Annexe 7 fournit un exemple de méthode pouvant être utilisée pour évaluer les brouillages causés à une station du service fixe par une constellation de satellites non OSG opérant sur des orbites circulaires ou elliptiques.

NOTE 1 – Le critère de dégradation relative de la qualité de fonctionnement (FDP), élaboré dans la présente Recommandation, peut être appliqué aux systèmes du service fixe qui fonctionnent sur des fréquences pour lesquelles la propagation par trajets multiples est la principale cause d'évanouissement des signaux. Un complément d'étude est nécessaire pour les trajets sur lesquels la cause principale est l'affaiblissement dû à la pluie. L'évaluation des effets du brouillage de courte durée (voir le § 4 de l'Annexe 3) nécessite également un complément d'étude.

NOTE 2 – La diversité n'est généralement pas utilisée aux fréquences inférieures à 3 GHz. On y a recours le plus fréquemment aux fréquences pour lesquelles il y a prédominance des évanouissements dus à la propagation par trajets multiples.

NOTE 3 – La méthodologie exposée dans l'Annexe 6 peut être appliquée dans les négociations bilatérales, pour évaluer le brouillage de courte durée ou la probabilité de brouillage.

ANNEXE 1

Détermination de la statistique de visibilité, depuis une station de Terre, de stations spatiales opérant sur des orbites circulaires non géosynchrones**1 Introduction**

Pour élaborer des critères de partage entre des satellites en orbite terrestre basse (LEO) et des systèmes du service fixe, il est nécessaire de déterminer, d'une part, selon quelle fréquence un satellite sera visible, quelle que soit la direction, d'une station de Terre particulière ou d'une position donnée et, d'autre part, quelle sera l'intensité du brouillage reçu de ce satellite. L'objet de la présente Annexe est d'élaborer les équations nécessaires pour simuler le fonctionnement d'un satellite LEO et donc les statistiques indispensables. Ce travail est suffisamment général pour que les résultats puissent être appliqués soit à un modèle aléatoire, soit à un modèle évolutif dans le temps.

Le § 2 de la présente Annexe est consacré à une élaboration des équations de mouvement d'un satellite, sur une orbite circulaire, dans un système de coordonnées inertielles. Au § 3, ces équations sont transformées dans un système de coordonnées fixes sur Terre. L'azimut et la distance du point subsatellite par rapport à un point à la surface de la Terre sont déterminés au § 4. Le § 5 donne les expressions des angles d'élévation et de dépointage du satellite ainsi qu'un critère simple pour tester la visibilité d'un satellite qui est au-dessus d'un point particulier de la Terre.

Un système de coordonnées sphériques droit, géocentré (r , θ , λ) est utilisé tout au long de la présente Annexe comme repère, où r est la distance depuis l'origine, θ est la distance angulaire depuis le pôle Nord et λ l'angle par rapport au pôle.

2 Le satellite dans le cadre inertiel

Pour déterminer la position du satellite dans le cadre inertiel, il faut commencer par déterminer sa position dans le plan orbital. Pour un corps en orbite circulaire autour de la Terre, cette opération fait intervenir les quatre paramètres orbitaux de Kepler suivants:

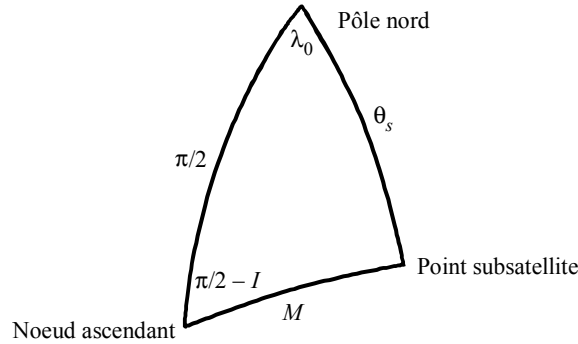
- R_s : rayon de l'orbite, soit la distance du centre de la Terre au satellite
- I : angle d'inclinaison (rad), soit l'angle compris entre le plan orbital et le plan équatorial de la Terre. Il mesure de 0 à π et est inférieur à $\pi/2$ si le satellite est orienté vers l'est au moment où il coupe le plan équatorial du sud au nord, et est supérieur à $\pi/2$ si le satellite est orienté vers l'ouest au moment où il coupe le plan équatorial du sud au nord
- Ω_s : distance angulaire (rad) le long du plan équatorial comprise entre la référence zéro et la position du nœud ascendant, soit l'intersection où le plan du satellite coupe le plan équatorial du sud au nord
- M : anomalie moyenne (rad), soit l'arc angulaire dans le plan orbital du satellite mesuré entre le nœud ascendant et la position du satellite.

Pour déterminer les coordonnées du satellite dans le système de coordonnées sphériques inertielles, il faut tout d'abord déterminer la position du satellite par rapport au référentiel Ω_0 ainsi que la position angulaire ou longitude du nœud ascendant, mesurées à l'est du premier point du Bélier. La position du point subsatellite est repérée par θ_s et λ_0 .

Ces coordonnées peuvent être déterminées par une géométrie sphérique (voir la Fig. 1). En appliquant la loi des cosinus à l'arc θ_s on obtient $\cos \theta_s = \sin M \sin I$, θ étant défini dans l'intervalle $(0, \pi)$:

$$\theta_s = \arccos (\sin M \sin I) \quad (1)$$

FIGURE 1
Triangle sphérique du satellite dans le cadre inertiel



1108-01

De même, en appliquant la loi des cosinus à l'arc M , on obtient $\cos M = \sin \theta_s \cos \lambda_0$. L'équation suivante donne les valeurs de λ_0 pour toute la fourchette $(\theta, 2\pi)$:

$$\lambda_0 = \begin{cases} \arccos (\cos M / \sin \theta_s) & \text{pour } \cos I \sin M \geq 0 \\ 2\pi - \arccos (\cos M / \sin \theta_s) & \text{pour } \cos I \sin M < 0 \end{cases} \quad (2)$$

3 Transformation en coordonnées terrestres

Ces coordonnées peuvent être transformées simplement en coordonnées terrestres équivalentes. Etant donné que la Terre effectue une rotation à l'est de 2π rad en 23 h, 56 min et 4,09 s, la longitude est du point subsatellite, λ_s , est égale à:

$$\lambda_s = \lambda_0 + \Omega_s - \Delta E t \quad (3)$$

où $\Delta E = 7,292115856 \times 10^{-5}$ rad/s.

Pour une description temporelle complète de la position du point subsatellite, il faut tenir compte de la position de l'orbite ainsi que de la position du satellite sur l'orbite. Le nœud ascendant opère une précession à l'ouest au rythme de $9,964 (R_E/R_s)^{3,5} \cos I$ degrés par jour, où R_E ($= 6\,378,14$ km) est le rayon équatorial de la Terre. La position du nœud ascendant évolue donc dans le temps en fonction de:

$$\Omega_s = \Omega_0 - \Delta L t$$

où:

$$\Delta L = -2,0183 \times 10^{-6} (R_E/R_S)^{3,5} \cos I$$

L'équation (3) devient alors:

$$\lambda_S = \lambda_0 + \Omega_0 - (\Delta L + \Delta E) t \quad (4)$$

La période orbitale (s) d'un satellite sur une orbite circulaire de rayon R_S est égale à $T_S = 9,952004586 \times 10^{-3} R_S^{1,5}$, où R_S est le rayon de l'orbite du satellite (km). On obtient donc:

$$M = M_0 + \Delta M t \quad (5)$$

où $\Delta M = 2\pi/T_S$.

4 Distance et azimut par rapport à une station de Terre

Les coordonnées de la station de Terre (latitude et longitude standard) doivent d'abord être transformées en coordonnées sphériques. Si L_T est la latitude et Lo_T est la longitude de la station de Terre, angles positifs en degrés dans l'un et l'autre cas, les coordonnées sphériques de la station en radians, θ_T et λ_T , peuvent être obtenues grâce aux deux relations suivantes:

$$\theta_T = \begin{cases} (\pi/180) (90 - L_T) & \text{pour } L_T \text{ latitude nord} \\ (\pi/180) (90 + L_T) & \text{pour } L_T \text{ latitude sud} \end{cases} \quad (6)$$

$$\lambda_T = \begin{cases} (\pi/180) (Lo_T) & \text{pour } Lo_T \text{ longitude est} \\ (\pi/180) (360 - Lo_T) & \text{pour } Lo_T \text{ longitude ouest} \end{cases} \quad (7)$$

La différence en longitude entre la station de Terre et le point subsatellite, λ_D , est juste égale à:

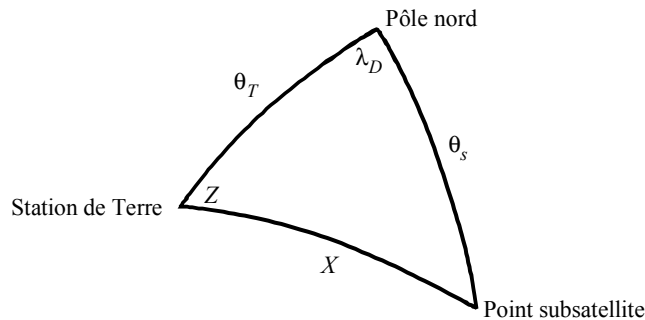
$$\lambda_D = \lambda_S - \lambda_T \quad (8)$$

La distance X entre la station de Terre et le point subsatellite, en radians d'arc, peut être déterminée par la loi des cosinus (voir la Fig. 2) comme suit:

$$X = \arccos (\cos \theta_T \cos \theta_S + \sin \theta_T \sin \theta_S \cos \lambda_D) \quad (9)$$

FIGURE 2

Triangle sphérique représentant la distance entre le point subsatellite et la station de Terre



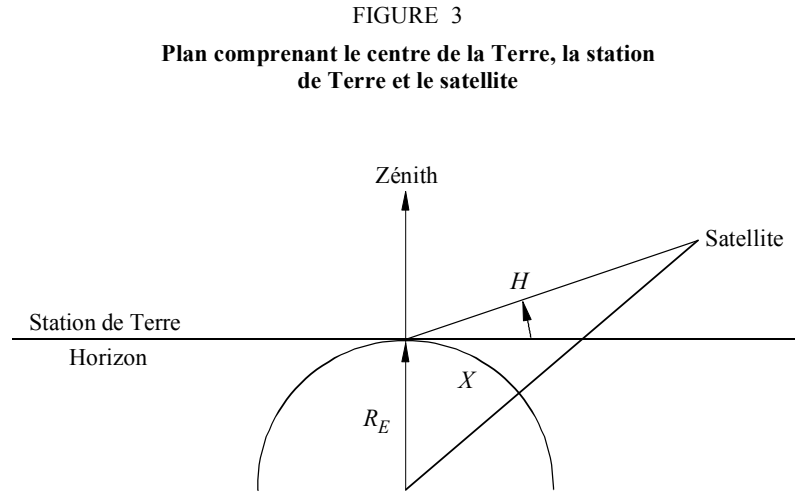
Le point subsatellite est à l'est de la station de Terre si $\sin \lambda_D$ est supérieur à zéro et à l'ouest si $\sin \lambda_D$ est inférieur à zéro. On obtient donc l'azimut Z entre la station et le point subsatellite en appliquant la loi des cosinus à l'arc θ_s de la Fig. 2:

$$Z = \begin{cases} \arccos \left[\frac{\cos \theta_s - \cos \theta_T \cos X}{\sin \theta_T \sin X} \right] & \text{pour } \sin \lambda_D \geq 0 \\ 2\pi - \arccos \left[\frac{\cos \theta_s - \cos \theta_T \cos X}{\sin \theta_T \sin X} \right] & \text{pour } \sin \lambda_D < 0 \end{cases} \quad (10)$$

5 Angle d'élévation et distance angulaire du satellite par rapport au faisceau principal

L'angle d'élévation H du satellite au-dessus de l'horizon de la station de Terre (en supposant un angle d'horizon égal à 0°) peut être obtenu comme il est indiqué à la Fig. 3:

$$H = \arctg \left[\frac{\cos X - R_E / R_s}{\sin X} \right] \quad (11)$$



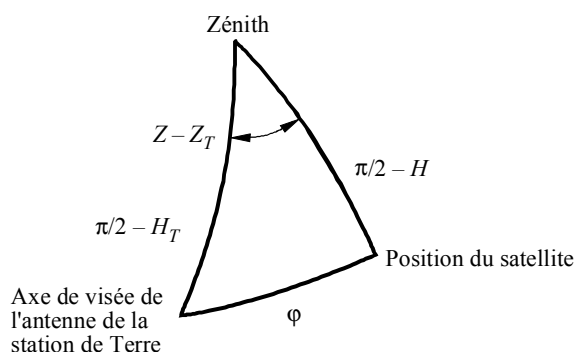
1108-03

On suppose que l'antenne de réception de la station de Terre est pointée dans la direction de l'azimut Z_T avec un angle d'élévation de H_T rad au-dessus du plan horizontal local. La distance angulaire ϕ entre le faisceau principal de l'antenne de la station de Terre et le satellite peut se calculer en utilisant le système de coordonnées sphériques centré sur la station de Terre avec son axe dans la direction du zénith, comme il est indiqué à la Fig. 4. En appliquant la loi des cosinus au ϕ latéral on obtient:

$$\phi = \arccos (\sin H_T \sin H + \cos H_T \cos H \cos (Z - Z_T)) \quad (12)$$

FIGURE 4

Triangle sphérique permettant de déterminer l'angle entre le faisceau de la station de Terre et le satellite



1108-04

Les équations (1) à (12) permettent de simuler les conditions de brouillage d'une station de Terre pour un satellite LEO. Des simplifications sont possibles; par exemple, on ne prend en considération normalement que les brouillages causés par des satellites au-dessus de l'horizon. D'après l'équation (11), le satellite est au-dessus de l'horizon pour:

$$\cos X > R_E / R_S = \gamma \quad (13)$$

En utilisant ensemble les équations (13) et (9), il est possible d'élaborer une expression de la gamme des longitudes se trouvant à l'intérieur de ce cercle de visibilité pour une valeur particulière de la latitude du point subsatellite ou de l'anomalie moyenne. Les équations (10), (11) et (12) doivent donc être évaluées uniquement dans des conditions pouvant être prédéterminées.

ANNEXE 2

Simulation des brouillages causés par des satellites LEO sur des trajets hertziens fixes analogiques

1 Introduction

La présente Annexe décrit un programme machine mettant en œuvre les relations mathématiques exposées à l'Annexe 1. Ce programme peut être utilisé comme outil d'analyse pour examiner les brouillages subis par des réseaux fixes hertziens analogiques simulés partageant des portions de spectre avec des satellites LEO représentatifs de ceux susceptibles d'être exploités dans des bandes au-dessous de 3 GHz. Un certain nombre d'exemples de scénarios de partage sont présentés, accompagnés de leurs résultats.

2 Description du modèle

Le programme simule mathématiquement le trajet d'une constellation de satellites LEO en tenant compte de la rotation de la Terre et des effets de précession de l'orbite. On calcule les brouillages causés, pour chaque mouvement de $1/2^\circ$ du satellite dans la constellation, à chaque récepteur fixe hertzien d'une concentration de trajets hertziens fixes distribués aléatoirement. Le programme accumule des données de densité de brouillages pour chaque trajet hertzien fixe pendant la durée de la simulation. Il convertit ensuite ces données en une distribution de probabilités correspondant à chaque trajet afin de permettre d'en analyser séparément la qualité de fonctionnement. Les résultats des exemples de scénarios décrits ici sont enfin comparés avec les exigences de qualité de fonctionnement de référence établies dans la Fig. 1 de la Recommandation UIT-R SF.357. Celle-ci propose des critères de partage de référence en cas de brouillages uniquement pour des systèmes analogiques.

2.1 Entrées

La simulation permet à l'opérateur de sélectionner les paramètres suivants:

- fréquence;
- latitude et longitude du centre des trajets hertziens fixes (droites équivalentes);
- gain d'antenne de réception du système hertzien fixe;
- nombre de trajets radioélectriques à analyser;
- altitude de l'orbite du satellite (identique pour chaque satellite);
- nombre de plans orbitaux satellitaires;
- longitude du nœud ascendant pour chaque plan;
- inclinaison de l'orbite (identique pour chaque plan);
- nombre de satellites par plan (identique pour chaque plan);
- niveau de puissance surfacique pour de grands angles d'incidence;
- niveau de puissance surfacique pour de petits angles d'incidence;
- durée (jours) de la simulation.

Le modèle tient compte des hypothèses suivantes:

- *en ce qui concerne le système hertzien fixe:*
 50 bonds, trajet de 2 500 km, les directions des bonds sont sélectionnées selon des méthodes Monte Carlo.
 Température du bruit du récepteur = 1 750 K.
 Le bruit thermique dans la bande de base de 4 kHz est de 25 pW par bond.
 Caractéristiques de l'antenne de réception selon la Recommandation UIT-R F.699.
 Pertes (alimentation, conversion) de 3 dB.
- *en ce qui concerne le système à satellites:*
 Orbite circulaire uniquement.
 Puissance surfacique (pfd) limitée au gabarit suivant:

pfd_{low}	pour $0 \leq \theta \leq 5^\circ$
$pfd = pfd_{low} + 0,05 (pfd_{hi} - pfd_{low}) (\theta - 5)$	pour $5^\circ < \theta \leq 25^\circ$
pfd_{hi}	pour $25^\circ < \theta \leq 90^\circ$

2.2 Sorties

Le produit du programme est un fichier de données unique nommé Leo.dat. Des renseignements sont fournis pour chaque trajet hertzien fixe simulé. Les informations produites sont organisées de telle sorte qu'est indiquée la durée des niveaux de brouillages reçus par chaque faisceau hertzien. Le programme couvre une plage de brouillages de 1 à 100 000 pW, divisée en 50 intervalles séquentiels de 1 dB de large. Il incrémente automatiquement l'intervalle de brouillages approprié correspondant à chaque trajet brouillé par un satellite pour chaque variation de $1/2^\circ$ de l'orbite.

3 Résultats de la simulation

La Recommandation UIT-R SF.357 définit les niveaux limites de brouillages, sur longue et courte durées, que peut subir un FWS à modulation angulaire dans des bandes qu'il utilise en partage avec le service fixe par satellite. Elle propose en outre une forme d'interpolation linéaire pour déterminer les niveaux de brouillages admissibles pendant des durées comprises entre les deux limites extrêmes mentionnées ci-dessus. Etant donné que le programme calcule les données de brouillage sous forme de distribution de probabilités, il est possible d'évaluer chaque scénario de partage à l'examen en comparant les résultats du programme avec les limites fixées dans la Recommandation UIT-R SF.357.

Les limites de brouillages déterminées dans la Recommandation UIT-R SF.357 sont représentées dans la partie droite des graphiques d'information présentés dans les Fig. 5 à 9. Dans chaque Figure, les courbes situées dans la partie gauche représentent les brouillages subis par le trajet hertzien fixe le plus affecté dans le scénario de partage LEO/service fixe en question.

Par exemple, la Fig. 5 présente une analyse des effets des brouillages subis par des stations du service fixe opérant à 1,5; 2,0 et 2,5 GHz, tous les autres paramètres concernant le service fixe et les LEO étant invariables. Deux groupes de scénarios ont été pris en considération. L'ensemble des courbes inférieures de la Figure représente les effets des brouillages causés par une seule LEO au service fixe. Le deuxième groupe de courbes représente les effets des brouillages associés à la présence d'un nombre suffisant de LEO sur un seul plan orbital de telle sorte qu'un satellite est constamment visible. Un système à satellites LEO dont un seul satellite est constamment visible est bien adapté à cette comparaison.

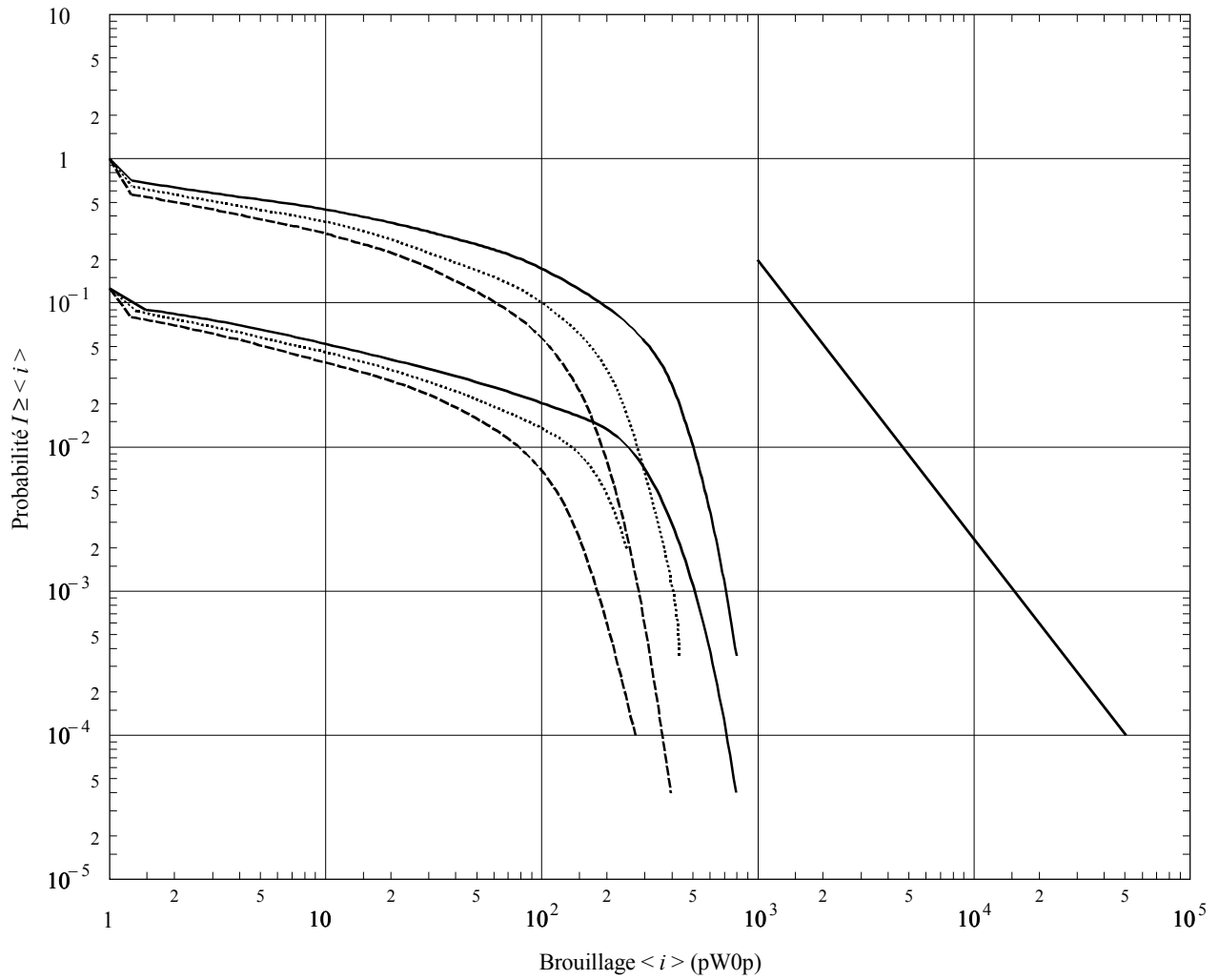
La Fig. 6 démontre les effets du changement de l'altitude de l'orbite et de la puissance surfacique pour un petit angle d'incidence sur les brouillages causés au service fixe par une seule LEO en visibilité continue. Pour ce scénario, les deux courbes en tireté (puissance surfacique = $-144 \text{ dB(W/m}^2\text{)}$) (dans une bande de 4 kHz) pour tous les angles d'incidence) montrent, comme on aurait pu s'y attendre, que l'altitude de l'orbite, c'est-à-dire 800 km et 10 330 km, n'est pas un paramètre significatif.

La courbe en trait plein de la Fig. 6 démontre que l'utilisation de faisceaux ponctuels par des LEO opérant à l'une ou l'autre de ces altitudes réduira considérablement le niveau des brouillages subis par le service fixe.

La Fig. 7 montre les résultats d'une étude des effets des brouillages subis par le service fixe en fonction de sa latitude. Les trois courbes supérieures représentent les distributions des brouillages subis par le service fixe à trois latitudes différentes, avec toujours la même hypothèse d'un seul satellite visible en permanence. Il apparaît que la latitude n'est pas un paramètre significatif pour ce qui est de la forme des distributions, lesquelles sont raisonnablement similaires.

FIGURE 5

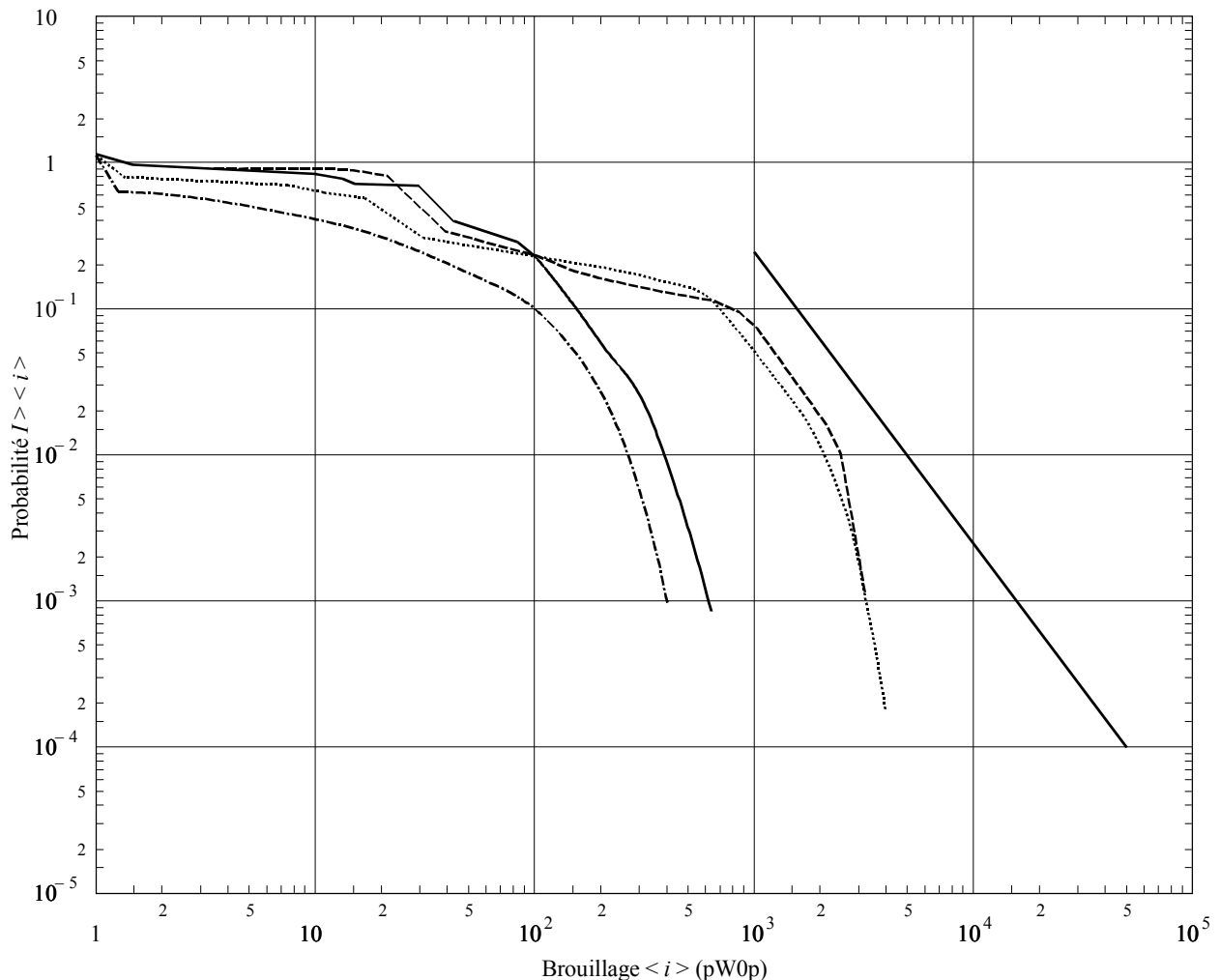
Niveaux de brouillage du service fixe en fonction de la fréquence (800 km, faisceaux de 50 bonds, gain d'antenne = 33 dB, latitude 40°, puissance surfacique = -154/-144 dB(W/(m² · 4 kHz)))



— Fréquence = 1,5 GHz
 Fréquence = 2,0 GHz
 - - - - - Fréquence = 2,5 GHz

FIGURE 6

Niveaux de brouillage en fonction de l'altitude et de la puissance surfacique
(faisceaux hertziens de 50 bonds, latitude 40°, 2 GHz)



- Puissance surfacique = $-154/-144$ dB(W/(m² · 4 kHz)), altitude = 800 km
- Puissance surfacique = $-154/-144$ dB(W/(m² · 4 kHz)), altitude = 10 300 km
- Puissance surfacique = $-144/-144$ dB(W/(m² · 4 kHz)), altitude = 800 km
- Puissance surfacique = $-144/-144$ dB(W/(m² · 4 kHz)), altitude = 10 300 km

1108-06

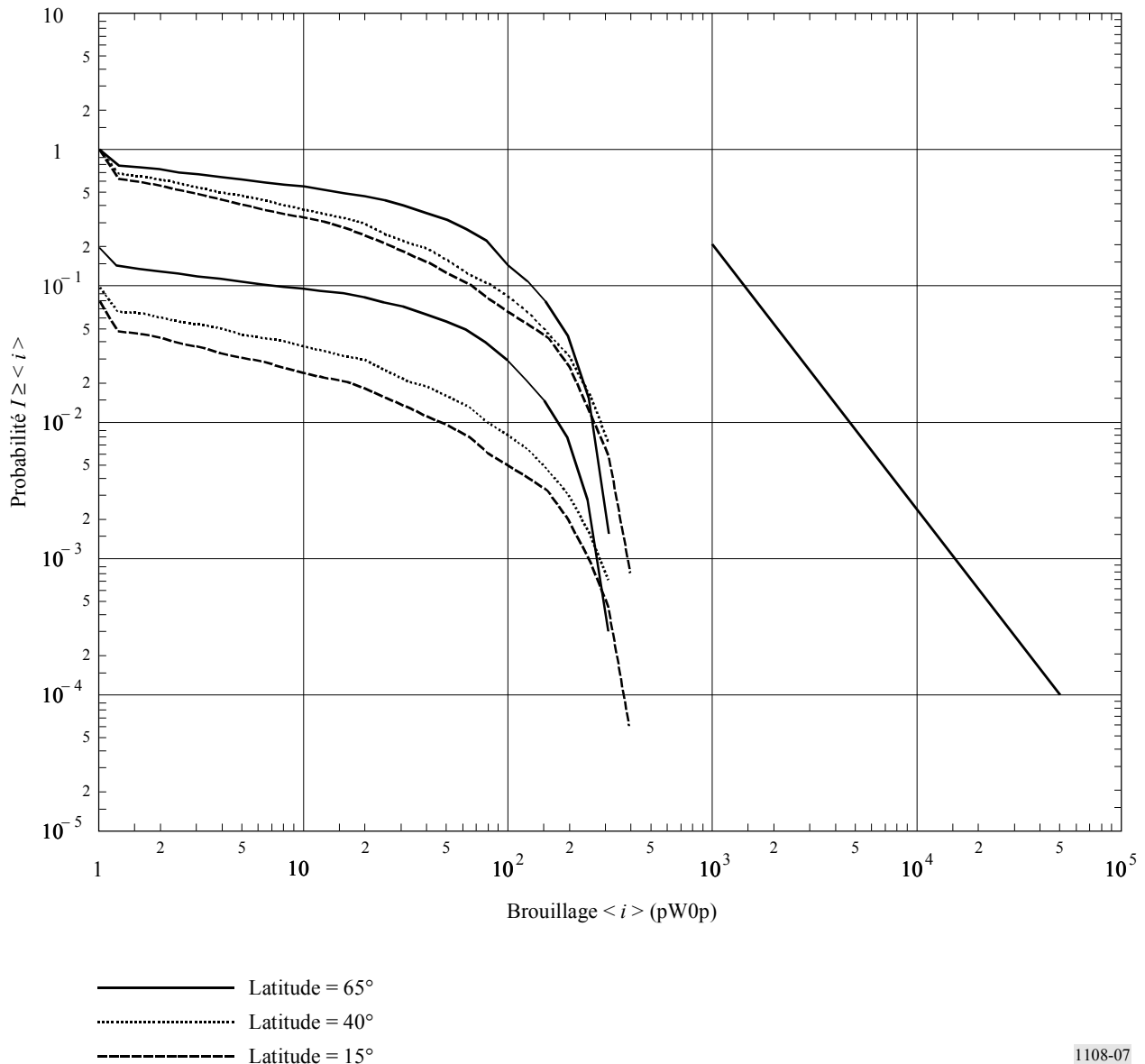
Le groupe des trois courbes inférieures de la Fig. 7 représente les distributions des brouillages reçus à des latitudes différentes de satellites isolés placés sur des orbites à forte inclinaison (80°). Il est intéressant d'observer ici que si le tracé des courbes était extrapolé sur l'axe des y pour $X=0$, le résultat représenterait approximativement la proportion du temps pendant laquelle les satellites étaient visibles des systèmes du service fixe aux latitudes indiquées. A contrario, l'inverse de ce nombre correspondrait approximativement au nombre de satellites nécessaires pour qu'un seul satellite soit visible en permanence. Il ressort d'une observation approfondie du tracé de ces courbes

de la Fig. 7 qu'il faudrait disposer d'un nombre moins grand de satellites pour illuminer en permanence des systèmes situés à des latitudes élevées; en effet, il apparaît que la distribution correspondant à des trajets hertziens fixes situés à la latitude de 65° coupe l'axe des y en un point beaucoup plus haut.

FIGURE 7

Brouillages (i) en pW dans une bande de 4 kHz

Niveaux de brouillage du service fixe en fonction de la latitude
(50 bonds, gain d'antenne 33 dB, puissance surfacique = $-154/-144$ dB(W/(m² · 4 kHz)), 2 GHz)



1108-07

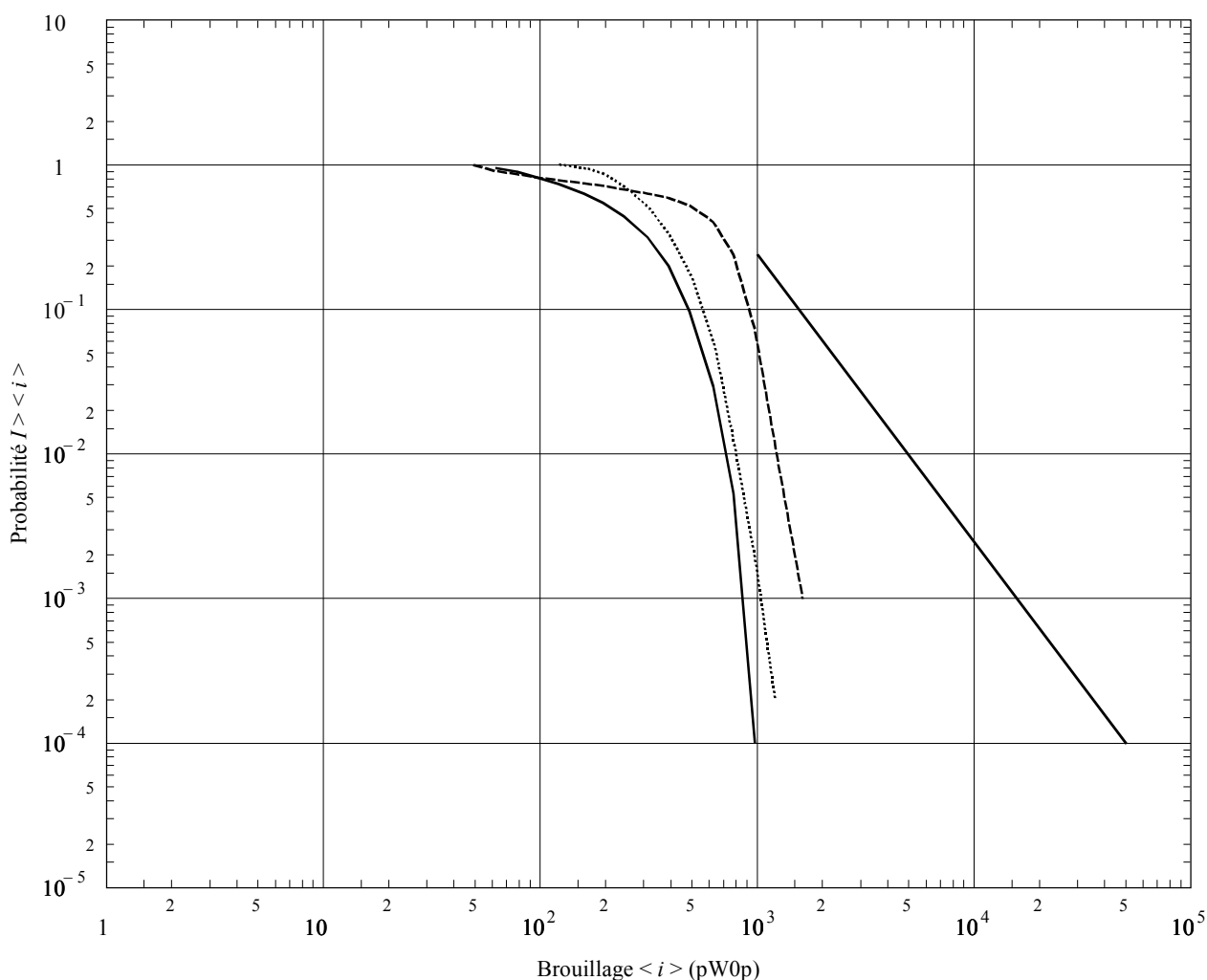
Cette constatation peut être vérifiée intuitivement: on constate que pour chaque orbite d'un système à satellites placés sur des orbites hautement inclinées, chaque satellite dans le plan est visible, pendant une portion de temps, par les sites de Terre situés aux latitudes plus au nord ou plus au sud, alors que des stations de Terre implantées à des latitudes moyennes ou basses peuvent ne pas être visibles à partir de telle ou telle partie de certaines orbites. Cela étant, il semble que les LEO qui sont optimisés pour desservir les latitudes moyennes et basses brouillent davantage les systèmes de Terre situés à des latitudes élevées; en effet, les satellites sur orbite sont visibles en plus grand nombre à partir des sites de Terre situés à ces latitudes.

Enfin, les Fig. 8 et 9 illustrent les effets des brouillages causés au service fixe par des constellations de satellites pouvant représenter des systèmes réels. L'un et l'autre systèmes sont organisés de telle sorte que de 3 à 6 satellites sont en permanence visibles par le site de Terre qui doit être desservi. La Fig. 8 concerne le cas d'une constellation de satellites comprenant 6 plans orbitaux circulaires et 11 satellites par plan. Tous les plans ont la même inclinaison ($86,5^\circ$) et la même altitude (780 km) satellitaire. La Fig. 9 montre la distribution des brouillages pouvant être produits par une constellation de 12 satellites opérant à une altitude de 10 370 km. Les satellites sont répartis dans 3 plans orbitaux, séparés de 120° avec une inclinaison de 56° , chaque plan comprenant 4 satellites.

FIGURE 8

Brouillages (i) en pW dans une bande de 4 kHz

66 LEO/780 km brouillages causés au service fixe
(Inclinaison $86,5^\circ$, gain d'antenne du service fixe = 33 dB, 2 GHz, latitude 40°)

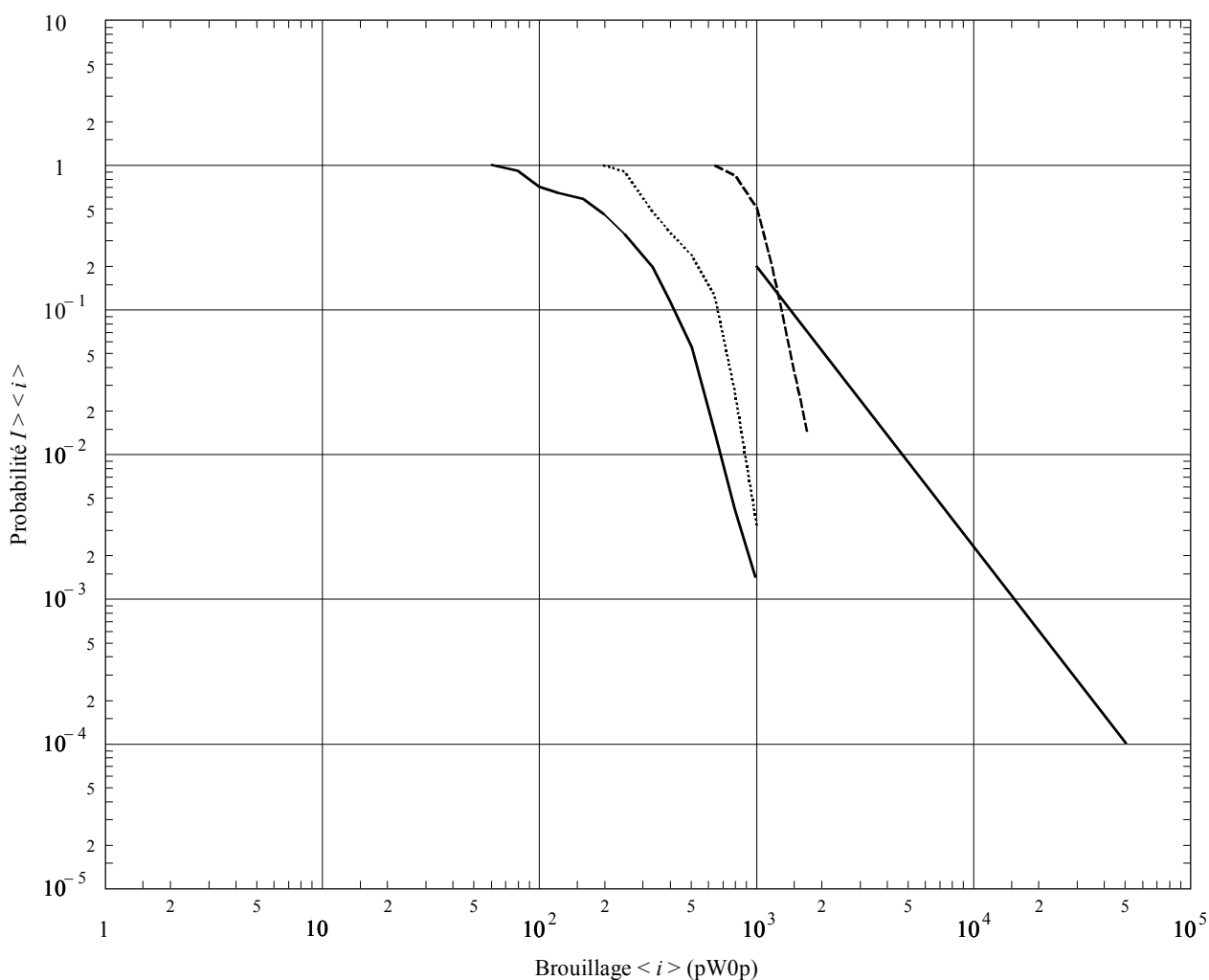


- Puissance surfacique = $-152/-142$ dB(W/(m² · 4 kHz))
- Puissance surfacique = $-152/-137$ dB(W/(m² · 4 kHz))
- Puissance surfacique = $-152/-132$ dB(W/(m² · 4 kHz))

FIGURE 9

Brouillages (i) en pW dans une bande de 4 kHz

12 satellites LEO/10 370 km brouillages causés au service fixe
(Inclinaison 56°, gain d'antenne du service fixe = 33 dB, 2 GHz, latitude 40°)



- Puissance surfacique = -152/-142 dB(W/(m² · 4 kHz))
- Puissance surfacique = -152/-137 dB(W/(m² · 4 kHz))
- Puissance surfacique = -152/-132 dB(W/(m² · 4 kHz))

1108-09

4 Conclusions

A cause du paramètre temporel qui doit être pris en compte dans le cas de LEO, l'analyse du partage devient nettement plus difficile et, sur des points importants, diffère de celle menée pour des satellites géostationnaires. A l'heure actuelle, il n'existe aucune méthodologie complète permettant d'établir les conditions de protection du service fixe vis-à-vis de LEO; cela est particulièrement vrai pour le partage avec des FWS numériques. La Recommandation UIT-R SF.357 définit un critère susceptible d'être utilisé pour établir des puissances surfaciques limites lors d'un partage avec des FWS analogiques. Toutefois, comme la Recommandation UIT-R SF.357 a pour objet d'établir les conditions de partage avec des satellites OSG, il est peut-être opportun de la revoir dans la perspective d'un partage avec des réseaux à satellites LEO.

Si l'on admet le bien-fondé de la Recommandation UIT-R SF.357, il apparaît alors que, dans l'hypothèse où des nombres limités de satellites LEO sont visibles du service fixe, des réseaux hertziens fixes analogiques pourraient partager des bandes de fréquences avec des systèmes LEO à condition que les niveaux de puissances surfaciques rayonnées à de petits angles d'incidence puissent être maîtrisés. Il apparaît également que, pour des angles d'incidence élevés, les limites des puissances surfaciques rayonnées par des systèmes LEO pourraient excéder les niveaux établis actuellement pour les satellites géostationnaires. Cette question demande manifestement un complément d'étude et il est proposé d'encourager le développement et l'utilisation d'outils de simulation pour les mener à bien.

ANNEXE 3

Détermination des effets des émissions produites par des stations spatiales non OSG sur des récepteurs de faisceaux hertziens numériques du service fixe

1 Introduction

Pour élaborer des critères de partage de bandes de fréquences entre le service fixe et des services spatiaux utilisant des satellites LEO, il faut connaître les effets que les émissions de ces satellites produisent sur la qualité de fonctionnement de récepteurs numériques de Terre. La présente Annexe propose une méthode pour évaluer ces effets à l'aide d'une simulation par ordinateur permettant d'élaborer la statistique de la puissance brouilleuse qui serait reçue en un endroit donné par une antenne de réception pointée dans une direction quelconque faisant partie d'un ensemble de directions. Cette simulation utilise les équations relatives à l'orbite présentées dans l'Annexe 1 et met en jeu soit un satellite unique, soit une constellation uniforme de satellites. Deux quantités particulières sont fixées; ce sont:

- le pourcentage de temps pendant lequel la puissance brouilleuse reçue excède un certain niveau, et
- l'accroissement relatif de la probabilité de ne pas satisfaire un critère de qualité de fonctionnement.

Les éléments de la simulation sont décrits en détail aux § 2 et 3 de la présente Annexe; les expressions de la dégradation de la qualité de fonctionnement sont présentées au § 4, tandis que des résultats d'intérêt représentatif sont indiqués au § 5.

2 Modélisation statistique

La simulation permet d'élaborer une statistique des brouillages en prenant en considération ceux reçus de chacune des N_a positions également espacées sur une orbite. Pour obtenir le total des brouillages, on considère N_0 orbites avec leurs nœuds ascendants également espacés sur l'équateur. Cette hypothèse peut certes ne pas être représentative dans de nombreux cas, mais elle est la plus favorable ou la moins contraignante pour le partage car c'est elle qui étale le plus les brouillages à la surface de la Terre. Il faudra dans des études ultérieures en étendre les conséquences à l'hypothèse d'orbites circulaires.

Il va sans dire que pour un satellite unique il existe $N_a \times N_0$ positions de brouillage possibles. En conséquence, la probabilité associée à l'une d'entre elles est $1/(N_a N_0)$.

Le cas de plusieurs satellites formant une constellation uniforme est aussi facile à étudier. En effet, une constellation uniforme est constituée par une mosaïque de satellites répartis suivant un ensemble de plans orbitaux identiques, uniformément espacés. Chacun de ceux-ci comprend le même nombre de satellites équidistants sur l'orbite. On obtient la couverture la plus uniforme et le partage le moins contraignant lorsque les essaims de satellites sont également échelonnés, c'est-à-dire qu'il y aura, lorsqu'un satellite se trouvera sur une orbite coupant l'équateur, un satellite sur chacun des plans orbitaux coupant l'équateur dans la même direction.

En ce qui concerne les quantités précédemment définies, si N_a est un multiple entier du nombre de satellites par orbite, N_{spo} , et si N_0 est un multiple entier du nombre de plans orbitaux, N_{orb} , dans la constellation, le nombre d'états originaux de la constellation est: $(N_0/N_{orb})(N_a/N_{spo})$.

3 Détermination des brouillages

On suppose que les émissions des satellites sont limitées de la manière classique: par une puissance surfacique faible pour les angles d'élévation, sur Terre, au-dessous d'une limite basse et par une puissance surfacique forte pour les angles d'élévation au-dessus d'une limite haute, l'augmentation entre ces limites étant linéaire en fonction des angles d'élévation. La puissance surfacique est exprimée en $\text{dB}(\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{MHz}))$.

Le gain d'antenne, $G_R(\varphi)$, du récepteur de Terre est celui qui est prescrit par la Recommandation UIT-R F.699 pour un gain, un diamètre et une fréquence indépendants. L'aire effective applicable pour déterminer la puissance brouilleuse reçue pour une puissance surfacique à un angle φ est donnée par:

$$A_{eff} = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_R(\varphi)$$

où λ est la longueur d'onde (m).

4 Modélisation de l'effet des brouillages sur des systèmes numériques

La probabilité d'interruption d'un système numérique est souvent représentée de la façon suivante:

$$P_0 = C \left[10^{-DFM/10} + 10^{-TFM/10} + 10^{-(C/I - CNC)/10} \right] \quad (14)$$

où:

- C : constante fonction de paramètres représentant le climat, le terrain et les liaisons
- DFM : marge de protection contre les évanouissements dispersifs (dB)
- TFM : marge de protection contre les évanouissements dus au bruit thermique (dB)
- C/I : rapport de la puissance du signal sans évanouissement à la valeur du bruit de la puissance brouilleuse (dB)
- CNC : valeur du rapport porteuse/bruit auquel le critère de qualité de fonctionnement est juste satisfait (dB).

Les systèmes numériques modernes ont habituellement des marges de protection contre les évanouissements dispersifs supérieures à leurs marges de protection contre les évanouissements dus au bruit thermique et ils s'améliorent. C'est pourquoi il est possible de ne pas prendre en compte, pour des raisons propres aux brouillages, le premier terme de l'équation (14). Alors que la puissance brouilleuse en équivalent de bruit d'un brouilleur spécifique sur un récepteur donné peut être inférieure à la puissance mesurée, il est possible, pour des considérations de partage générales, en particulier lorsqu'il y a plusieurs brouilleurs, de supposer, sans risque, que les brouillages ont le même effet que le bruit thermique à puissance identique. Etant donné que la différence en décibels entre le rapport porteuse/bruit sans évanouissement et le rapport porteuse/bruit critique, CNC, est la marge de protection contre les évanouissements dus au bruit thermique, TFM, l'accroissement relatif de P_0 , c'est-à-dire la probabilité d'excéder l'objectif de qualité de fonctionnement, est égal au rapport de la puissance brouilleuse, I , sur la puissance du bruit, N_T , l'une et l'autre valeur étant mesurées au détecteur en W ou en W par unité de largeur de bande. Ainsi, cet accroissement relatif est égal à I/N_T pour une puissance brouilleuse, I , constante. Pour simplifier l'exposé, on désignera cet accroissement de P_0 comme une dégradation relative de la qualité de fonctionnement (FDP) ou encore comme une dégradation en pourcentage de cette qualité.

Si un brouilleur a produit une puissance brouilleuse, I_i , pendant une fraction de mois, f_i , et ne s'est pas manifesté pendant le reste du mois, la dégradation relative incrémentale de la qualité de fonctionnement due à ces brouillages serait donnée par:

$$\Delta P_{0,i} = \frac{I_i f_i}{N_T}$$

La FDP due à un ensemble de causes, où la i^e correspond à la fraction de temps pendant laquelle le brouillage avait une puissance I_i , est donnée par:

$$FDP = \sum \Delta P_{0,i} = \sum \frac{I_i f_i}{N_T} \quad (15)$$

où la sommation couvre l'ensemble des causes de brouillage. La sommation sur $I_i f_i$ représente l'équivalent discret du moment du premier ordre de la distribution de probabilité de la puissance brouilleuse induite dans le récepteur: en effet, f_i est la probabilité pour que la puissance brouilleuse ait une valeur comprise entre I_i et $I_i + \Delta I_i$.

La FDP peut être exprimée également comme une perte de la marge de protection contre les évanouissements (FML) (dB) où:

$$FML = 10 \log (1 + FDP) \quad (16)$$

tandis que le niveau moyen de brouillage au-dessus du bruit thermique est donné, en dB, par $10 \log FDP$.

Bien que l'équation (14) ait été utilisée essentiellement pour déterminer l'apparition des interruptions (probabilité que le taux d'erreur binaire d'un récepteur excède 1×10^{-3}), la plupart des mesures de la qualité de fonctionnement des systèmes radionumériques concordent avec celles des interruptions. L'équation (15) peut donc être utilisée comme mesure de la dégradation relative de la qualité de fonctionnement. Les équations (15) et (16) fixent certes des limites raisonnables à la dégradation de la qualité de fonctionnement pour des niveaux de brouillage modérés, mais elles en sous-estiment peut-être les effets pour des niveaux de brouillage supérieurs, par exemple, de 20 dB au bruit thermique, étant donné que les effets dispersifs compris dans le premier terme de l'équation (14) commencent à devenir importants et que le phénomène d'évanouissement pour un angle de faible incidence risque de ne pas suivre la loi de Rayleigh implicite dans l'équation (14).

Pour évaluer les effets produits par des niveaux de brouillage élevés, le mieux est de considérer séparément les critères relatifs au brouillage de courte durée, ou l'étude de la distribution cumulative du rapport de la puissance du signal reçu à la somme des puissances du bruit et du brouillage (voir l'Annexe 6). La Commission d'études 9 des radiocommunications travaille actuellement à l'élaboration de la méthode la plus appropriée.

L'autre question concernant les niveaux de brouillage élevés est de savoir si ces niveaux sont suffisamment élevés pour dégrader la qualité en matière d'erreurs d'une liaison, en l'absence d'évanouissements. On pourra être amené à prendre en considération des critères de qualité de fonctionnement tels que le taux d'erreur binaire résiduel (Recommandation UIT-R F.634) ou d'autres critères requis pour satisfaire aux dispositions de la Recommandation UIT-T G.826. On pourra négliger les effets de ces causes de brouillage important seulement si elles se manifestent suffisamment rarement, ou pas du tout.

L'équation (15) est, par sa forme, parfaitement adaptée à des études sur les brouillages car elle permet de traiter simplement de grandes constellations de satellites, qu'elles soient ou non uniformes. Il est facile également d'évaluer les effets des constellations multiples, car on peut additionner les FDP produites par chacune d'entre elles pour obtenir la FDP totale ou composite.

5 Description d'une autre méthode pour calculer la FDP

Supposons que la qualité de fonctionnement d'un faisceau hertzien numérique, sur un bond donné, dépende de l'occurrence d'évanouissements profonds dus à la propagation par trajets multiples sur ce bond. C'est là une hypothèse raisonnable pour des systèmes équipés d'égaliseurs transverses adaptatifs efficaces ou pour des systèmes à bande suffisamment étroite tels que ceux fonctionnant à des fréquences inférieures à 3 GHz.

Désignons par C le niveau du signal reçu en l'absence d'évanouissements, par N_T le niveau du bruit thermique et par k la valeur minimum du rapport C/N_T nécessaire pour satisfaire la condition de qualité de fonctionnement de référence. Avec ces notations, la condition requise ne sera pas satisfaite quand:

$$\frac{rC}{N_T} < k \quad (17)$$

où:

$$\begin{aligned} r &: \text{facteur d'évanouissement} \\ &= 10^{-A/10} \\ A &: \text{profondeur d'évanouissement (dB)}. \end{aligned}$$

En présence d'un brouillage ayant approximativement le caractère d'un bruit gaussien, avec une puissance moyenne I dans le détecteur, le critère de qualité de référence n'est pas satisfait si:

$$\frac{rC}{N_T + I} < k \quad (18)$$

Il est clair que le critère n'est pas satisfait quand:

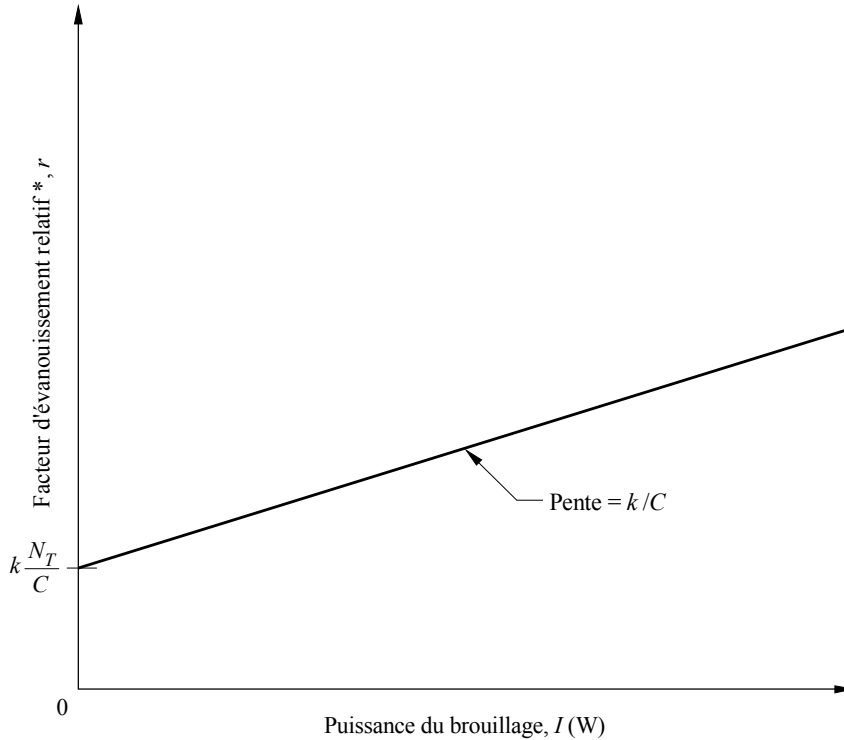
$$r \leq k \left(\frac{N_T}{C} + \frac{I}{C} \right) \quad (19)$$

La Fig. 10 indique la limite de la région où l'inégalité (18) est tout juste vérifiée. Si la puissance brouilleuse n'est pas constante, il faut que la condition suivante soit remplie pour que l'objectif de qualité de référence soit atteint: que la probabilité d'occurrence simultanée des évanouissements et du brouillage soit suffisamment petite (valeurs situées au-dessous de la ligne de séparation de la Fig. 10). Plus précisément, désignons par $p_r(r)$ la fonction de densité de probabilité attachée au facteur d'évanouissement et par $p_I(I)$ la fonction de densité de probabilité attachée à la puissance du brouillage, et supposons que ces processus sont indépendants; dans ces conditions, la fraction d'un mois, P_{0i} , pendant laquelle le critère de qualité critique n'est pas satisfait est donnée par:

$$P_{0i} = \int_0^{\infty} dI \int_0^{(k/C)(N_T + I)} p_r(r) p_I(I) dr \quad (20)$$

FIGURE 10

Limite de la région dans laquelle le critère de qualité critique est satisfait



* Rapport de la puissance avec évanouissements à la puissance sans évanouissements.

1108-10

Dans la plupart des cas intéressants, la valeur donnée par la relation (20) dépend de l'occurrence d'évanouissements profonds dus à la propagation par trajets multiples, et il est possible de simplifier son évaluation. La Recommandation UIT-R P.530 indique que, en régime d'évanouissements profonds, la probabilité pour que le facteur d'évanouissement soit inférieur à r est proportionnelle à r . Cela signifie que la fonction de densité de probabilité attachée au facteur d'évanouissement doit être une constante.

$$p_r(r) = \beta \quad r \ll 1 \quad (21)$$

Dans cette formule, β est la constante de proportionnalité, que l'on peut appeler un facteur d'occurrence des évanouissements. Cela étant, en portant l'équation (21) dans l'équation (20), on détermine la fraction d'un mois pendant laquelle le critère de qualité critique n'est pas satisfait:

$$P_{0i} = \frac{\beta k}{C} (N_T + I_{av}) \quad (22)$$

où I_{av} est la puissance brouilleuse moyenne, soit:

$$I_{av} = \int_0^{\infty} I_{pI}(I) dI \quad (23)$$

La FDP est l'augmentation relative du pourcentage de temps pendant lequel le critère de qualité de référence n'est pas satisfait en raison de la présence d'un brouillage. Si l'on désigne par P_{0o} la valeur de l'expression (22) en l'absence de brouillage, la FDP pourrait s'exprimer par $FDP = (P_{0i}/P_{0o}) - 1$, soit:

$$FDP = \frac{I_{av}}{N_T} \quad (24)$$

ce qui est l'équivalent de l'équation (15).

6 Résultats échantillons de la simulation

Ce paragraphe présente quelques résultats d'un certain nombre de passages essais de la simulation. Le but était de mettre au jour certaines tendances de base et certaines zones à problème. On supposera, sauf indication contraire, que la station de Terre se situe à une latitude de 40° N, fonctionne à 2,000 GHz, possède une antenne de 2,76 m de diamètre, un gain de 33 dB et que les pertes dues au guide d'ondes sont de 2 dB. Conformément à la Recommandation UIT-R F.759, le facteur de bruit du récepteur est fixé à 4 dB. Les émissions des satellites correspondent à la limite de -130 dB(W/(m² · MHz)) de puissance surfacique pour des angles d'élévation de 5° ou moins et augmentent de 0,5 dB par degré entre 5° et 25°, valeur au-delà de laquelle elles sont égales à -120 dB(W/(m² · MHz)). Les brouillages dus aux satellites, sont échantillonnés au pas de 0,5° autour de l'orbite pour 720 orbites uniformément espacées autour de l'équateur.

La Fig. 11 montre la distribution cumulative de la puissance brouilleuse reçue par des antennes ayant des azimuts de pointage différents et émise par un satellite sur une orbite de 800 km d'altitude et de 50° d'inclinaison. Etant donné cette inclinaison limitée de l'orbite, le satellite n'est jamais observé près de l'horizon au nord. Les antennes pointées à des azimuts en deçà de 50° du pôle Nord ne reçoivent donc jamais de brouillage dans l'axe de visée et leurs distributions sont tronquées. Par conséquent, à des angles d'azimut légèrement plus grands correspond une probabilité plus grande d'observation dans l'angle de visée. La Fig. 12 illustre clairement cette conclusion par une courbe de la dégradation en pourcentage de la qualité de fonctionnement pour plusieurs angles correspondant à ce cas.

FIGURE 11
Distribution cumulative de la puissance brouilleuse dans le cas d'une station de Terre
située à une latitude de 40° par rapport à un satellite placé sur une orbite de 50° d'inclinaison et de 800 km d'altitude

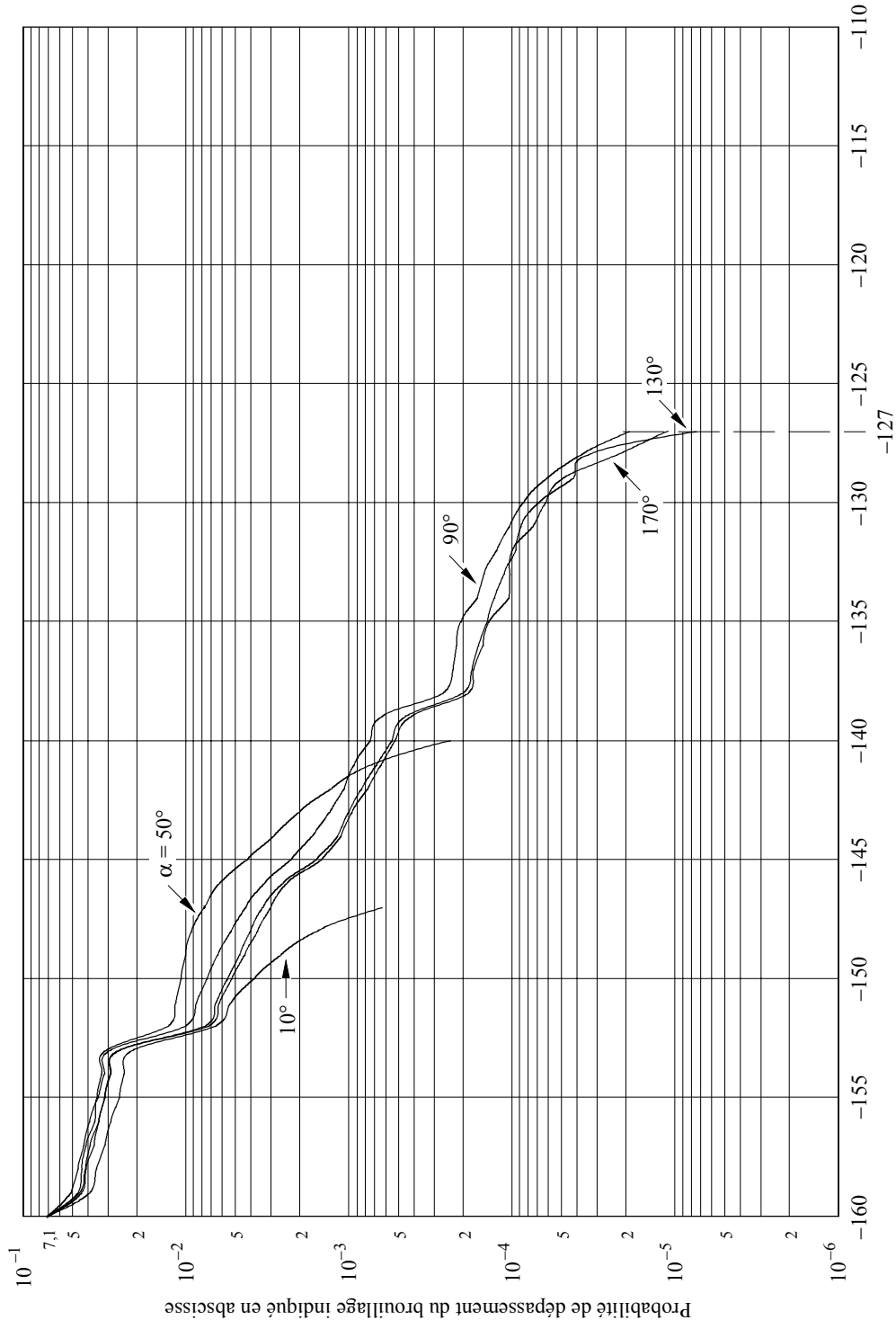
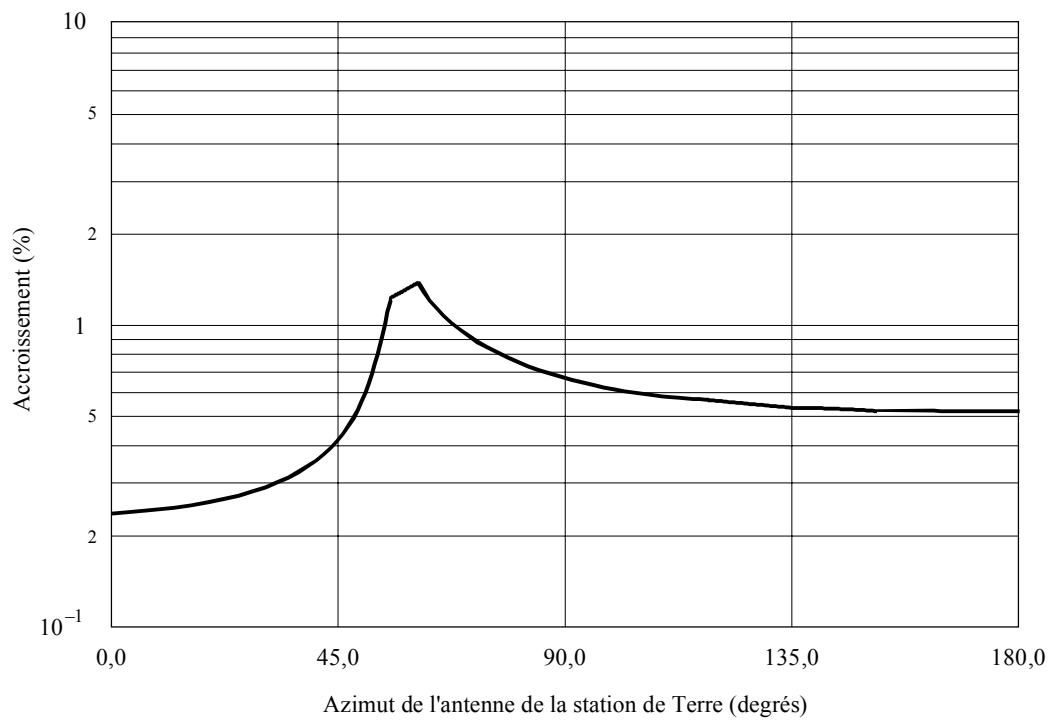


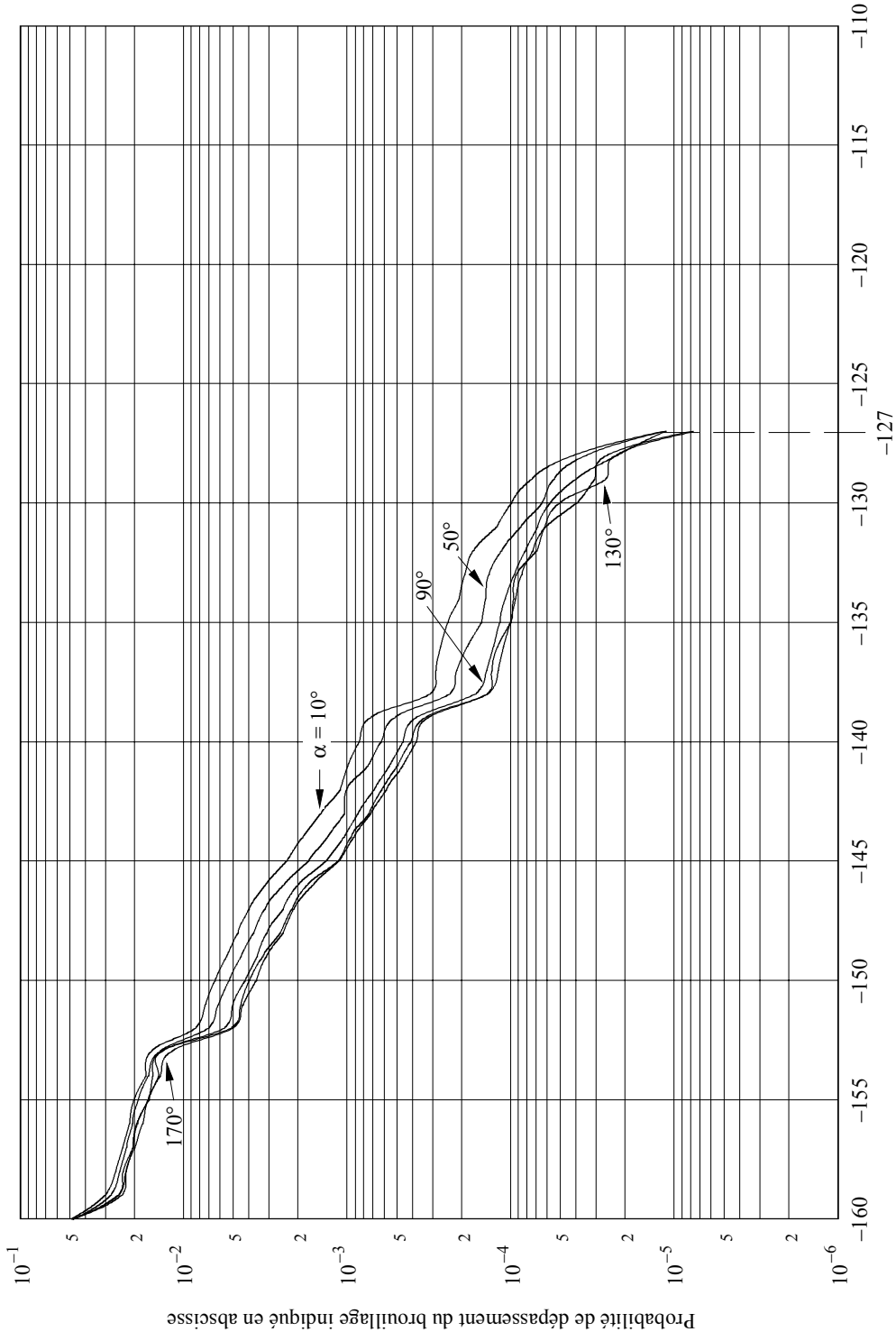
FIGURE 12
 Dégradation en pourcentage de la qualité de fonctionnement
 pour le cas présenté à la Fig. 11



1108-12

La Fig. 13 montre la distribution cumulative de la puissance brouilleuse reçue pour une situation identique à l'exception de l'inclinaison orbitale qui est ici de 89,5°. L'effet de l'azimut est manifestement beaucoup moins prononcé dans ce cas.

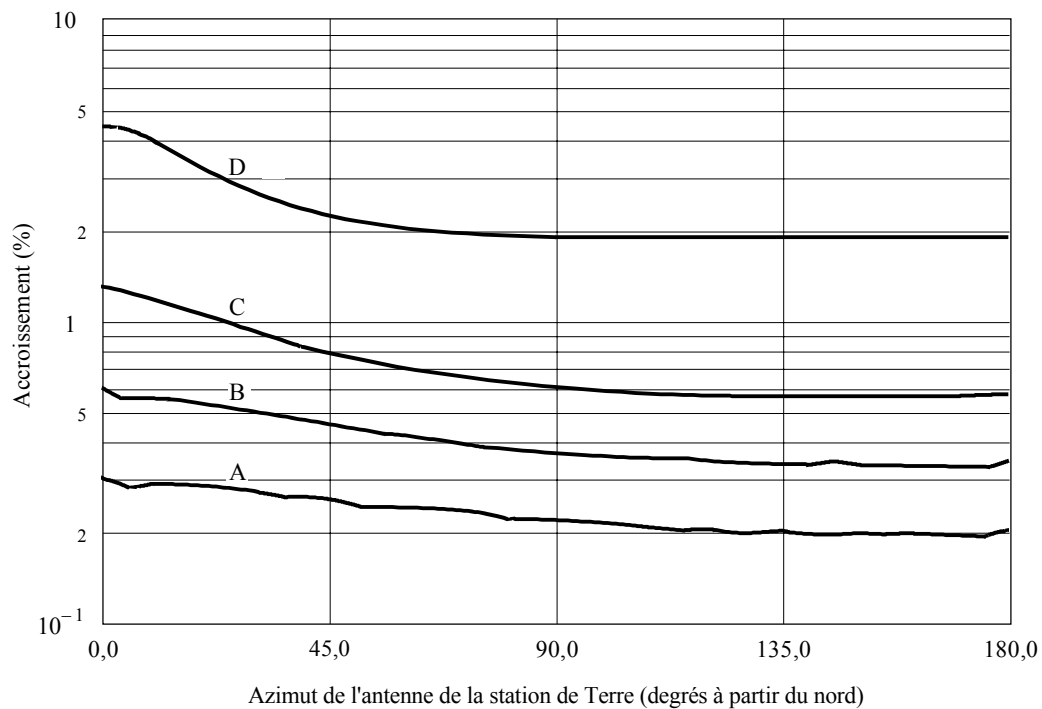
FIGURE 13
Distribution cumulative de la puissance brouilleuse dans le cas d'une station de Terre
située à une latitude de 40° par rapport à un satellite placé sur une orbite de 89,5° d'inclinaison et de 800 km d'altitude



La Fig. 14 illustre l'effet de l'altitude du satellite, par des courbes de la dégradation en pourcentage de la qualité de fonctionnement en fonction de l'angle d'azimut. La dégradation de la qualité de fonctionnement causée par un satellite s'accroît linéairement avec l'altitude de l'orbite jusqu'à près de 10 000 km, tout comme s'accroît la zone de la Terre illuminée à tout moment par le satellite.

FIGURE 14

**Dégradation en pourcentage de la qualité de fonctionnement d'une station de Terre
située à une latitude de 40°, soumise aux brouillages d'un satellite placé
sur une orbite de 89,5° d'inclinaison et pour des altitudes diverses**

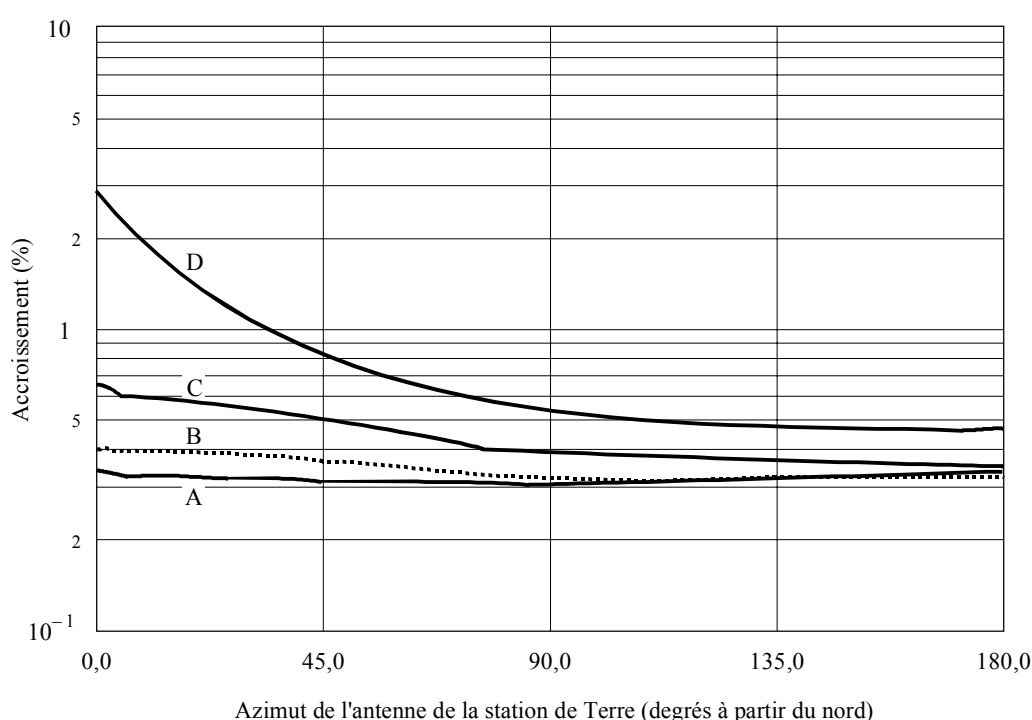


Courbes A: altitude = 400 km
 B: altitude = 800 km
 C: altitude = 1 600 km
 D: altitude = 10 000 km

L'effet de la latitude de la station terrienne sur la dégradation de la qualité de fonctionnement est illustré à la Fig. 15. S'il n'est pas grave, cet effet revêt une importance croissante au fur et à mesure où l'on se rapproche des pôles pour des angles de pointage quasi polaires.

FIGURE 15

Dégradation en pourcentage de la qualité de fonctionnement de stations de Terre situées à diverses latitudes, soumises aux brouillages d'un satellite placé sur une orbite de 89,5° d'inclinaison et de 800 km d'altitude



Courbes A: latitude = 0°
 B: latitude = 20°
 C: latitude = 40°
 D: latitude = 60°

1108-15

Les Fig. 16 et 17 montrent l'effet d'une constellation uniforme de 55 satellites censés émettre dans le même canal comme ils le feraient s'ils employaient l'accès multiple par répartition en code (AMRC). Si l'on compare les Fig. 13 et 16, on constate que la distribution des brouillages dans le cas d'un satellite unique est très proche de celle correspondant à une constellation de satellites. La comparaison est plus évidente à la Fig. 17 où la dégradation de la qualité de fonctionnement causée par 55 satellites apparaît 55 fois pire que celle causée par un satellite unique.

FIGURE 16
Distribution cumulative des brouillages causés à une station de Terre située à une latitude de 40°
par une constellation uniforme de 55 satellites placés sur des orbites de 89,5° d'inclinaison et de 800 km d'altitude

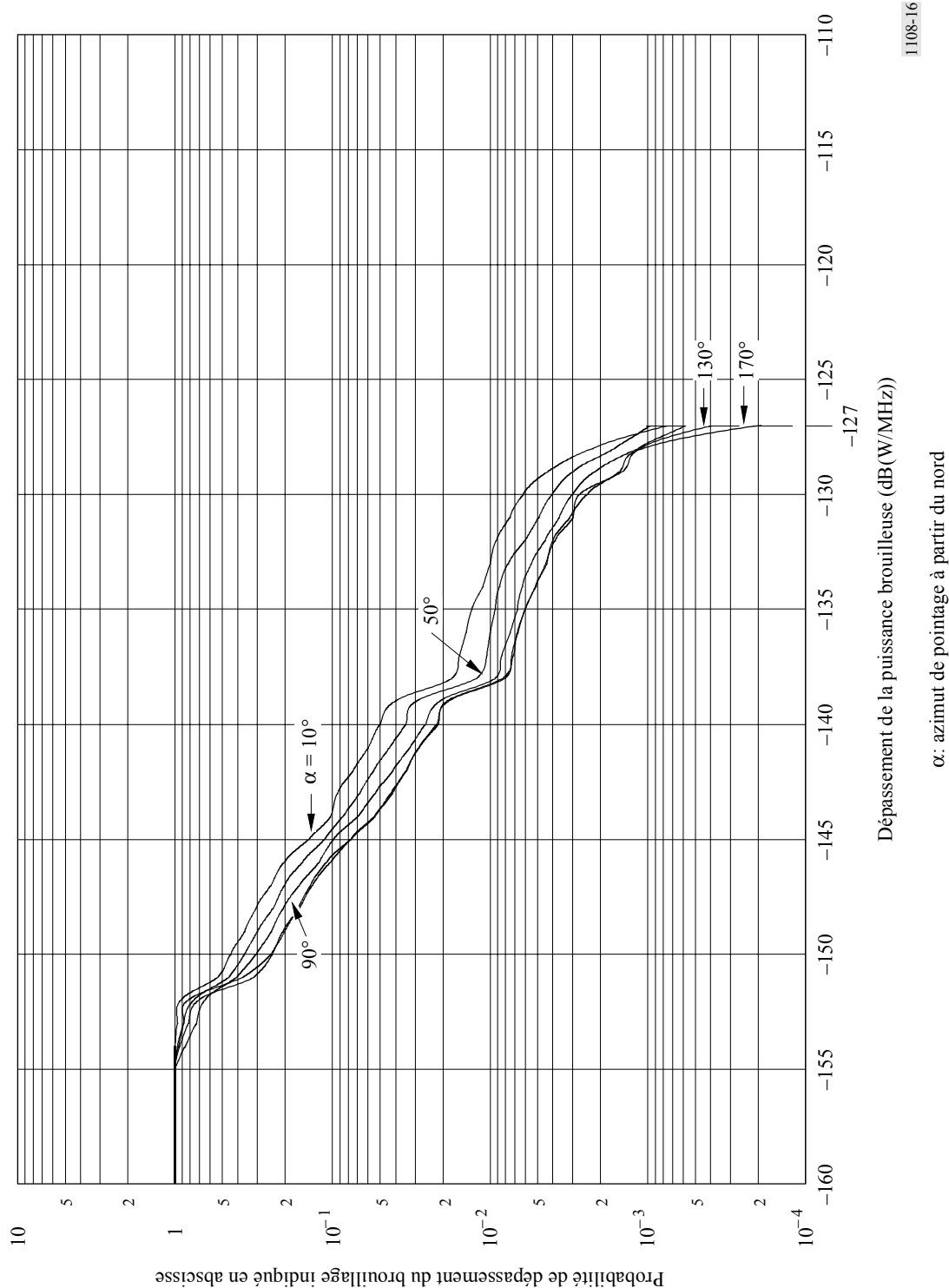
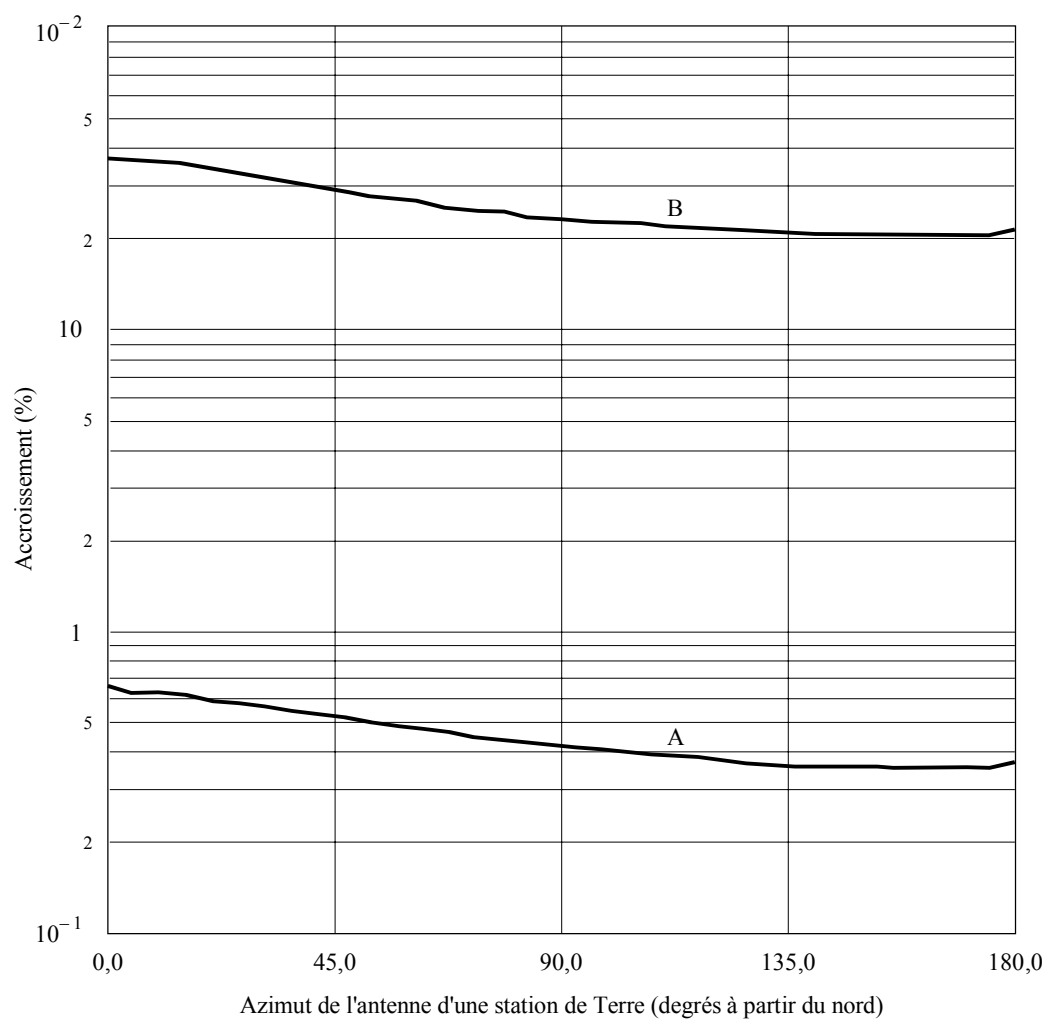


FIGURE 17

Dégradation en pourcentage de la qualité de fonctionnement d'une station de Terre
située à une latitude de 40° , causée par un seul satellite et par une
constellation uniforme de 55 satellites placés sur des orbites
de $89,5^\circ$ d'inclinaison et de 800 km d'altitude



Courbes A: 1 satellite
B: 55 satellites

1108-17

7 Conclusions provisoires

On a montré que la dégradation de la qualité de fonctionnement est proportionnelle au nombre des satellites dans une constellation uniforme. En général, cette dégradation se traduit par un effet cumulatif pour tous les satellites brouillant la bande passante d'un récepteur.

Dans le cas de satellites sur des orbites non géosynchrones (la puissance surfacique varie en fonction de l'angle d'élévation suivant une courbe identique), la FDP subie par des récepteurs de Terre situés à des latitudes moyennes présente des variations limitées en fonction de:

- l'angle de pointage – selon un facteur de trois pour des latitudes allant jusqu'à 60° et des altitudes de 800 km au plus;
- l'altitude du satellite – accroissement presque linéaire avec l'altitude;
- la latitude de la station – pour une latitude comprise entre 20° et 60°, accroissement de l'ordre du double.

Ces conclusions pourraient varier pour des augmentations différentes de la puissance surfacique. La FDP de stations situées à des latitudes élevées peut, en fonction de l'angle d'azimut, subir une variation de plus grande amplitude dans le cas de satellites sur des orbites quasi polaires. On peut faciliter le partage en couplant l'augmentation de la puissance surfacique ou sa limite même à l'altitude et à l'inclinaison de l'orbite. Ces possibilités demandent un complément d'étude.

Ces conclusions dépendent de l'utilisation d'orbites quasi circulaires, non géosynchrones. En effet, l'emploi d'orbites très elliptiques exige un complément d'information et d'étude étant donné, en particulier, que la statistique des brouillages risque de ne pas être stable pendant les périodes d'un mois où doivent être satisfaits les critères de qualité de fonctionnement. Les tenants et aboutissants de ce scénario doivent être étudiés de façon plus approfondie.

L'utilisation d'orbites géosynchrones accroîtrait la variation de la dégradation en pourcentage de la qualité de fonctionnement par rapport tant à l'angle de pointage qu'à l'emplacement de la station de Terre. Ce sont là les types de considération qui font normalement partie d'une procédure de coordination détaillée. Étant donné qu'il semblerait impossible de procéder à pareille coordination pour chaque station de Terre, l'autre solution serait d'abaisser le niveau permis des émissions produites par les satellites (puissance surfacique). Il serait certes possible de déterminer simplement des seuils, mais un complément d'étude s'impose.

Si des satellites OSG et des satellites non OSG étaient utilisés dans la même bande de fréquences, les considérations de partage revêteraient une complexité croissante, pour la raison notamment que les effets des brouillages des deux types de satellite se cumulent.

Dans cette Annexe, on a considéré le brouillage causé par des constellations de satellites qui occupent le spectre uniformément avec utilisation de la même fréquence, et on a admis l'hypothèse que les émissions des satellites sont limitées par un gabarit fixe de puissance surfacique sur la surface de la Terre. Certains systèmes pourraient fonctionner avec, à l'intérieur de la constellation, un mode de réutilisation des fréquences susceptible d'améliorer les possibilités de partage. Si cette méthodologie était appliquée dans une étude détaillée portant sur des systèmes spécifiques, on pourrait prendre en compte, dans l'évaluation des effets du brouillage, les faisceaux d'antenne et les plans de réutilisation de fréquences mis en œuvre dans les satellites.

ANNEXE 4

Méthodologie pour déterminer les effets produits par les brouillages sur les récepteurs numériques fonctionnant en diversité

1 Introduction

Plusieurs formes de diversité de fréquence sont souvent appliquées dans les bandes de fréquences où les évanouissements dus à la propagation par trajets multiples sont la cause principale des dégradations de la qualité de fonctionnement, en l'absence de brouillages. L'amélioration obtenue en matière de qualité de fonctionnement, en l'absence de brouillages, et la dégradation de qualité de la diversité sous l'effet des brouillages, dépendent jusqu'à un certain point de la forme de diversité choisie. Dans certains systèmes, on peut avoir une antenne dont les caractéristiques sont différentes de celles de l'antenne principale pour ce qui est de l'obtention d'un signal de diversité. Des systèmes différents peuvent mettre en œuvre des dispositifs de combinaison/commutation différents pour l'obtention d'un signal combiné. Toutes choses égales par ailleurs, un système utilisant des antennes identiques dans les trajets du signal principal et du signal de diversité fournit l'amélioration maximale de la qualité de fonctionnement, comparé à un système sans diversité. Il apparaît également qu'un tel système avec diversité est le moins sensible aux effets des brouillages.

Pour calculer la FDP d'un système avec diversité, on admettra que le système numérique utilise des antennes identiques dans les deux voies de diversité. On admettra par ailleurs que ce système fonctionne dans une bande suffisamment étroite ou qu'il est suffisamment bien égalisé pour que sa qualité de fonctionnement requise dépende principalement de l'affaiblissement du signal. Dans ce cas, la fraction d'un mois pendant laquelle le critère de qualité critique n'est pas satisfait, P_{0i} , peut se calculer à l'aide de l'équation (20), sous réserve de faire une distinction entre les quantités correspondant respectivement à la diversité et à l'absence de diversité. On a donc:

$$P_{0i} = \int_0^{\infty} dI p_I(I) \int_0^{(k/C)(N_T + I_C)} dr p_r(r) \quad (25)$$

Comme dans le cas sans diversité, la puissance du brouillage, I , et sa distribution sont caractérisées dans la voie qui contient l'antenne principale, par rapport à N_T , puissance de bruit équivalente du système attribuée à cette voie. Pour déterminer la dégradation due au brouillage, on considère la puissance du brouillage après traitement, I_C , par rapport au bruit après traitement. Comme on dispose d'un gain de système suffisamment élevé en amont de la diversité, il est possible d'adapter le traitement du signal de sortie, de telle manière que la composante de bruit reprenne la valeur N_T . La puissance du brouillage dans ce signal de sortie recalibré est I_C . Ainsi, dans le cas avec diversité, on redessinerait la Fig. 10 avec I_C en abscisse, pour établir l'équation (25).

Considérons un système du service fixe fonctionnant avec diversité, dans lequel les évanouissements profonds dus à la propagation par trajets multiples sont la principale cause de dégradation de la qualité de fonctionnement. Dans ce cas, la Recommandation UIT-R P.530 donne une méthode qui permet de prévoir les niveaux des signaux à spectre étroit reçus par diversité en régime d'évanouissements profonds. On peut en déduire que la probabilité d'un facteur d'évanouissement inférieur à r est proportionnelle à r^2 . Il en résulte que la fonction de densité de probabilité pour le facteur d'évanouissement doit être proportionnelle à r , et:

$$p_r(r) = \gamma r \quad r < 1 \quad (26)$$

Dans cette expression, le paramètre γ tient compte des effets dus au type de diversité.

On a constaté que l'équation (26) convient en général pour décrire le fonctionnement en diversité des systèmes du service fixe en présence d'évanouissements par trajets multiples. En portant l'équation (26) dans l'équation (25) et en intégrant, on obtient:

$$P_{0i} = \frac{\gamma k^2}{2C^2} \int_0^{\infty} (N_T + I_C)^2 p_I(I) dI \quad (27)$$

ou la FDP en diversité (DFDP):

$$DFDP = \int_0^{\infty} \left(\frac{2I_C}{N_T} + \frac{I_C^2}{N_T^2} \right) p_I(I) dI \quad (28)$$

L'équation (28) peut être calculée aisément pour deux cas importants: la diversité idéale par commutation et la diversité par combinaison avec égalité de gain et puissance maximale. Ces deux types de diversité seront étudiés ci-dessous pour le cas où l'antenne de la voie de diversité a le même gain que celle de la voie principale, les deux voies étant par ailleurs identiques.

2 Diversité par commutation

Dans ce cas, l'opération de diversité est réalisée par un dispositif de commutation qui choisit le signal ayant subi l'évanouissement le plus faible. En conséquence, la puissance du brouillage et la puissance de bruit équivalente dans l'une ou l'autre antenne apparaissent à la sortie sans avoir subi de calibration, et:

$$DFDP = \int_0^{\infty} \left(\frac{2I}{N_T} + \frac{I^2}{N_T^2} \right) p_I(I) dI \quad (29)$$

ou:

$$DFDP = 2 \frac{I_{av}}{N_T} + \frac{I_2}{N_T^2} \quad (30)$$

I_{av} ayant été défini par l'équation (23) et I_2 , moment du second ordre de la puissance du brouillage, étant donné par:

$$I_2 = \int_0^{\infty} I^2 p_I(I) dI \quad (31)$$

L'équation (30) peut aussi être mise sous la même forme que l'équation (15) pour être utilisée dans les simulations:

$$DFDP = \sum f_i \left[\frac{2I_i}{N_T} + \left(\frac{I_i}{N_T} \right)^2 \right] \quad (32)$$

3 Combinaison à puissance maximale

Un combineur à puissance maximale modifie la phase relative entre les deux voies de diversité de manière à réaliser la concordance de phase entre les versions du signal utile dans les deux voies. Comme il y a cohérence entre les brouillages délivrés par les deux antennes, le rapport I/N serait deux fois plus grand à la sortie du combineur qu'à l'entrée si le brouilleur avait la même phase relative que le signal utile. Désignons par ϕ radians la différence entre le déphasage du brouilleur d'une voie à l'autre et le déphasage du signal utile; la puissance du brouillage à la sortie du combineur, I_C , serait donnée par:

$$I_C = 2I \cos^2 (\phi/2) \quad (33)$$

Cette expression peut être portée dans l'équation (28). En faisant l'hypothèse que la phase ϕ est uniformément répartie entre 0 et 2ϕ , il est possible de déterminer son effet moyen. On obtient ainsi:

$$DFDP_{mpc} = \int_0^\infty \left(\frac{2I}{N_T} + \frac{3I^2}{2N_T^2} \right) p_I(I) dI \quad (34)$$

soit:

$$DFDP_{mpc} = 2 \frac{I_{av}}{N_T} + \frac{3I_2}{2N_T^2} \quad (35)$$

Cette expression peut aussi être mise sous la même forme que l'équation (15) pour être utilisée dans les simulations:

$$DFDP = \sum f_i \left[\frac{2I_i}{N_T} + \frac{3}{2} \left(\frac{I_i}{N_T} \right)^2 \right] \quad (36)$$

4 Perte de la marge de protection contre les évanouissements en diversité (DFML)

Compte tenu de ce qui précède, on peut prévoir que la dégradation relative de la qualité de fonctionnement d'un système avec diversité sera au moins le double de celle d'un système sans diversité, identique par ailleurs, dans le même environnement de brouillage. Inversement, si on applique l'équation (26), on établit sans difficulté que la DFML, pour une valeur donnée de DFDP, est deux fois plus petite que dans un système sans diversité, pour la même valeur de FDP:

$$DFML = 5 \log (1 + DFDP) \quad (37)$$

Si la variance de la puissance de brouillage dans un récepteur du service fixe, σ_I^2 , est définie de la façon habituelle:

$$\sigma_I^2 = I_2 - I_{av}^2 \quad (38)$$

on peut écrire la relation suivante pour la DFML en fonction de la FDP dans le cas sans diversité:

$$DFML = 10 \log \sqrt{(1 + FDP)^2 + (FDP \sigma_I / I_{av})^2} \quad (39)$$

5 Résumé

Lorsque la puissance de brouillage attaquant un système de réception du service fixe est constante, ou au moins peu variable dans le temps, la diminution de la marge d'évanouissement du système est la même avec diversité que sans diversité. Dans la plupart des cas, on considère que les variations du brouillage sont faibles si la variance de la puissance brouilleuse est comparable au carré de la puissance brouilleuse moyenne.

On a effectué un grand nombre de simulations du brouillage causé par des constellations uniformes de satellites. Les résultats montrent que la variance de la puissance brouilleuse est souvent supérieure, de plusieurs décades, au carré de la puissance brouilleuse moyenne. En pareils cas, la contribution de la variance au brouillage – exprimée par le second terme des équations (30) et (39) – devient l'effet prédominant; cela limite les niveaux acceptables de la puissance brouilleuse, que l'on considère la dégradation de la qualité de fonctionnement ou la diminution de la marge de protection contre les évanouissements.

S'il s'agit d'évaluer les effets du brouillage dans les systèmes fonctionnant avec diversité, le critère le plus simple pour les comparaisons est la diminution de la marge de protection contre les évanouissements dans un système idéal à diversité par commutation.

ANNEXE 5

Uniformité de l'environnement de brouillage au cours d'un mois

Etant donné un satellite non OSG en orbite circulaire, son point subsatellite décrit, en fonction du temps, un trajet sur la surface terrestre. Après un certain nombre d'orbites complètes, ce trajet retourne au même point, ou presque, sur la surface terrestre. Le temps écoulé jusqu'à ce retour est la «période de répétition» du satellite. On pourra être amené à étudier spécialement les constellations de satellites ayant de courtes périodes de répétition (plusieurs jours) ou de très longues périodes (par exemple, un grand nombre de mois); la raison en est que les systèmes du service fixe doivent satisfaire à des conditions de qualité de fonctionnement pendant un mois quelconque.

La période choisie pour simuler le brouillage causé à des récepteurs du service fixe par une constellation de satellites non OSG doit satisfaire à deux conditions. D'une part, la période de simulation doit être égale à la période de répétition de la constellation, c'est-à-dire le temps qui s'écoule entre deux passages successifs d'un satellite donné au-dessus d'un point donné de la surface terrestre. D'autre part, la seconde condition concerne l'uniformité en longitude de l'environnement de brouillage créé par la constellation. La statistique du brouillage reçu par des récepteurs identiques du service fixe placés à la même latitude peut dépendre également de la longitude de la station. Il est possible d'évaluer cette variation en fonction de la longitude en examinant la distribution en longitude des passages équatoriaux sud-nord de chaque satellite de la constellation pendant sa période de répétition.

Etant donné que les systèmes du service fixe doivent satisfaire à leurs exigences de qualité de fonctionnement pendant un mois quelconque, les brouillages causés par les satellites doivent être évalués sur la base du mois le plus défavorable, c'est-à-dire une période de durée nominale de 30 jours. On a procédé à des simulations pour déterminer la diminution de la marge en régime d'évanouissement, pour des récepteurs du service fixe fonctionnant avec ou sans diversité; ces études ont montré que les paramètres FDP ou FML dépendent des caractéristiques orbitales et des conditions initiales de la constellation, caractéristiques qui déterminent l'uniformité de l'environnement de brouillage au cours d'un mois.

On peut avoir recours à plusieurs procédés pour obtenir cette uniformité en longitude dans la planification d'une constellation de satellites non OSG, par exemple, changer l'altitude des satellites, modifier l'angle formé par les plans orbitaux et/ou introduire un déphasage des satellites d'un plan à un autre, à l'intérieur des plans. La faisabilité de ces procédés nécessiterait un complément d'étude. Du point de vue du service fixe, il est indifférent de choisir telle ou telle méthode, mais il faut tenir compte du point suivant: si on ne parvient pas à obtenir l'uniformité, un nombre important de stations du service fixe risquent de se trouver dans un environnement de brouillage plus hostile. Ce point ne devra pas être perdu de vue dans les évaluations détaillées des effets produits par les brouillages dans les systèmes réels.

ANNEXE 6

Méthodologie pour déterminer la distribution cumulative du rapport de la puissance reçue à la somme des puissances du bruit et du brouillage d'après des simulations des émissions de constellations formées par des stations spatiales non OSG

1 Relation entre C/I et $C/(N + I)$

Les méthodes exposées dans l'Annexe 3 permettent de déterminer la FDP et la FML dans le cas de systèmes numériques dont les seuils de qualité se situent dans la région des évanouissements profonds dus à la propagation par trajets multiples. La méthode décrite au § 5 de cette Annexe peut être étendue à des régimes d'évanouissements moins profonds, où la forme de la distribution cumulative des profondeurs d'évanouissements peut avoir de l'importance. A cette fin, on peut définir les distributions suivantes:

$F_M(A)$: probabilité pour que le signal reçu sur un trajet subisse un évanouissement qui l'amènera à un niveau inférieur d'au moins A (dB) au niveau nominal, ou niveau de réception sans évanouissement;

$F_{C/(N+I)}(Z)$: probabilité pour que le rapport (dB) de la puissance de la porteuse à la somme des puissances du bruit et du brouillage soit inférieur d'au moins Z (dB) au rapport de puissance porteuse/bruit en l'absence d'évanouissements.

Dans l'équation (20), l'intégration sur la variable r donne $F_M(Z - 10 \log(1 + I/N_T))$ et le membre de gauche de cette équation est $F_{C/(N+I)}(Z)$. On a donc:

$$F_{C/(N+I)}(Z) = \int_0^{\infty} p_I(I) F_M(Z - 10 \log(1 + I/N_T)) dI \quad (40)$$

Pour toute distribution des évanouissements par trajets multiples et toute fonction de densité de probabilité de la puissance brouilleuse reçue, l'équation (40) permet d'obtenir la distribution cumulative du rapport de la puissance de la porteuse à la somme des puissances du bruit et du brouillage. On procède généralement par simulation sur ordinateur pour déterminer la densité de probabilité de la puissance de brouillage dans un récepteur du service fixe, due à une constellation de satellites non OSG. Si l'on sauvegarde cette distribution, on pourra l'utiliser ultérieurement dans l'équation (40) pour un autre calcul visant à évaluer les effets produits sur la qualité de fonctionnement par des évanouissements de profondeur moyenne.

2 Modélisation de la distribution cumulative des profondeurs d'évanouissement

L'UIT-R a élaboré un modèle mathématique, décrit dans la Recommandation UIT-R P.530, qui est constitué par une famille de distributions des évanouissements par trajets multiples, la famille étant caractérisée par un paramètre qt . Ce modèle permet de définir la fonction $F_M(A)$ pour toutes les valeurs de A , positives et négatives. On dispose ainsi d'un élément de base utile pour préciser les procédures et illustrer les résultats. C'est à cette fin que le modèle est utilisé dans les paragraphes qui suivent.

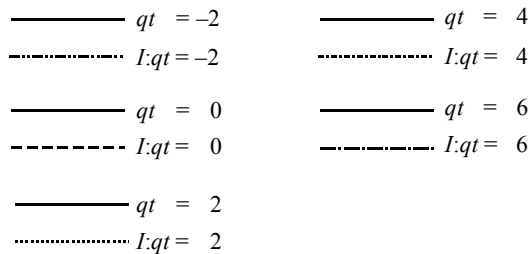
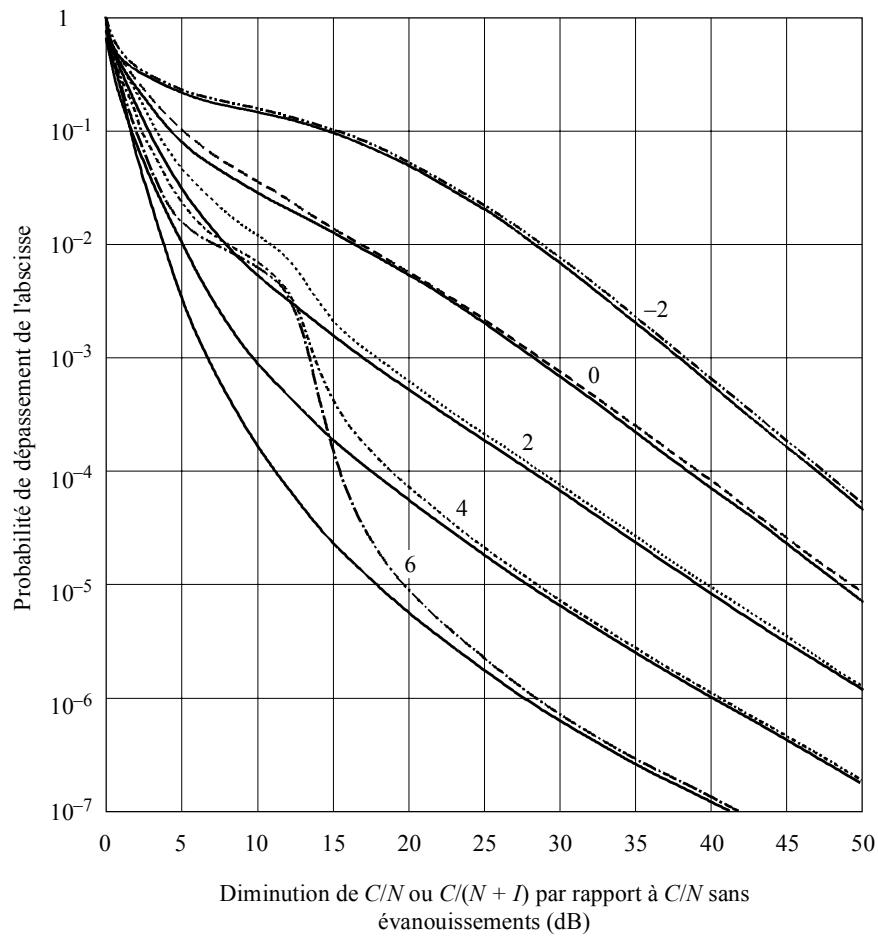
3 Exemple

La Fig. 18 représente cinq couples de distributions pour la diminution des rapports C/I et $C/(N+I)$, à raison d'un couple pour chacune de cinq valeurs du paramètre qt . Ces courbes ont été tracées sur la base de la densité de probabilité de brouillage déterminée dans le cas suivant: simulation d'une constellation LEO-F fonctionnant avec les niveaux de puissance surfacique spécifiés dans la Recommandation UIT-R M.1141 à la fréquence de 2180 MHz, le brouillage étant causé à une station de réception du service fixe situé à 40° de latitude, et l'angle d'azimut pour le cas le plus défavorable étant de 50°. Pour un trajet donné du service fixe, avec une longueur et une position données dans une zone géoclimatique, on a une seule valeur du paramètre qt . En un point quelconque pris sur une des courbes de distribution de C/N , la distance verticale jusqu'à la distribution homologue de $C/(N+I)$ correspond à une dégradation de la qualité de fonctionnement; la séparation horizontale correspond à une FML. Les distances de séparation entre les distributions de C/N et de $C/(N+I)$ peuvent être déterminées avec précision au moyen d'un programme d'ordinateur adéquat. La Fig. 19 donne les résultats d'un tel calcul pour les distributions représentées sur la Fig. 18.

La diminution de C/N par rapport au rapport C/N en l'absence d'évanouissements représente la profondeur d'évanouissement. La perte de marge d'évanouissement diminue légèrement pour les évanouissements peu profonds, quand $qt = -2$; en revanche pour les valeurs positives de qt , qui sont plus typiques des évanouissements au-dessous de 3 GHz, cette perte augmente notablement pour les évanouissements peu profonds.

FIGURE 18

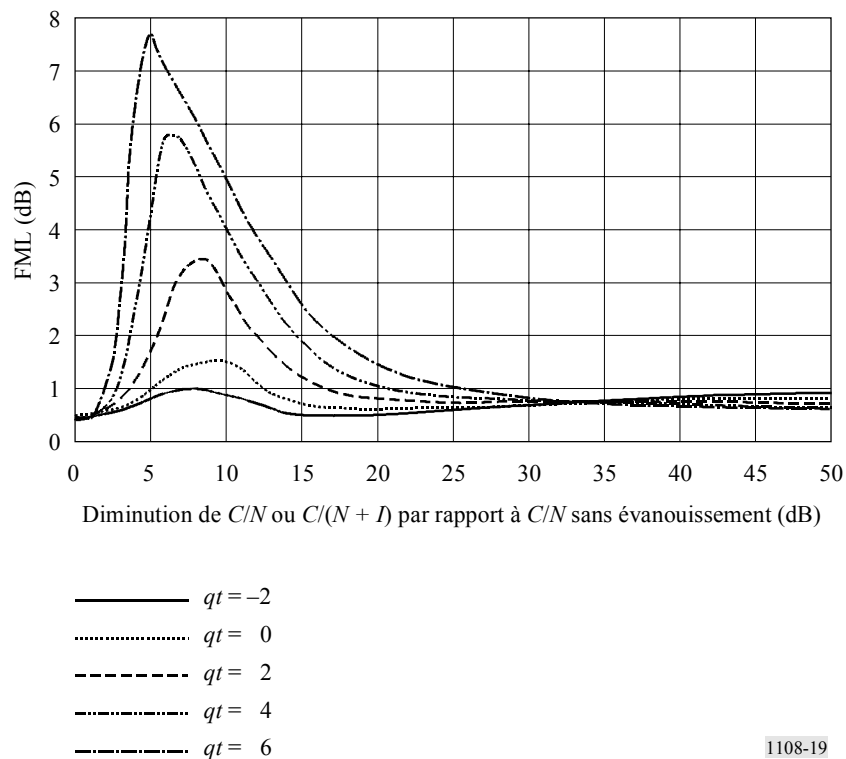
Distributions de probabilité cumulatives de la diminution de C/N et $C/(N+I)$ par rapport à C/N sans évanouissements. Courbes obtenues par simulation d'une constellation LEO-F pour le fonctionnement sans diversité, dans le cas d'une antenne de réception du service fixe orientée à 50° d'azimut par rapport au Nord, pour plusieurs valeurs du paramètre qt



1108-18

FIGURE 19

FML sans diversité pour une valeur donnée de la profondeur d'évanouissement.
 Courbes déduites des résultats de simulation utilisés pour la Fig. 18
 (Azimut = 50°)



1108-19

4 Conclusions

La FML pour les valeurs intermédiaires du niveau d'évanouissement peut être nettement plus grande que la diminution correspondant aux évanouissements profonds – la différence peut atteindre un grand nombre de décibels. Les plus grandes valeurs de cette FML dépendent de la pente de la distribution cumulative des évanouissements. Cette dépendance est mise en évidence si l'on compare, par exemple, les Fig. 18 et 19. Cette comparaison montre que la diminution est maximale pour les distributions d'évanouissements présentant la plus grande pente et au voisinage des niveaux d'évanouissement correspondant à ces grandes pentes. Il est clair que la FML pour les profondeurs intermédiaires est influencée par la pente de la distribution cumulative des niveaux d'évanouissement sur un trajet donné.

Malgré cela, la méthodologie exposée dans la présente Annexe peut être appliquée à toutes les distributions des profondeurs d'évanouissement. Elle devra être appliquée à des distributions réelles ou au modèle décrit dans la Recommandation UIT-R P.530. Pour évaluer en détail l'influence effective de la FML sur la qualité de fonctionnement d'un système donné du service fixe, il faut connaître exactement les caractéristiques de ce système ou sa qualité en matière d'erreurs pour un niveau d'évanouissement donné, de même que ses critères de qualité de fonctionnement.

ANNEXE 7

**Méthode analytique pour évaluer les brouillages causés à une station
du service fixe par une constellation de satellites non OSG
opérant sur des orbites circulaires ou elliptiques**

1 Introduction

On adopte les hypothèses ci-après pour une constellation de satellites non OSG:

- on considère M_s plans orbitaux et N_s satellites par plan;
- les espacements angulaires entre les plans orbitaux adjacents sont identiques;
- l'intervalle de temps séparant deux satellites adjacents quelconques d'un même plan est constant;
- il n'y a pas de relation mathématique entre la période orbitale et la période de révolution de la Terre;
- tous les satellites émettent à des fréquences identiques;
- l'angle d'inclinaison, δ , est le même pour tous les satellites.

On suppose en outre, dans le cas d'une orbite elliptique, que l'argument du périégée est commun à tous les satellites.

On peut appliquer la méthode figurant dans la présente Annexe pour évaluer les brouillages causés par une constellation de satellites non OSG qui utilise des orbites terrestres moyennes ou basses et qui comprend de nombreux satellites fonctionnant dans un certain nombre de plans, assurant une couverture mondiale. La méthode n'introduit pas de limites quant aux principes relatifs à la gamme de fréquences applicable, exception faite des limites éventuelles figurant dans les Recommandations UIT-R appropriées. Les caractéristiques de la méthode analytique exposées dans la présente Annexe sont résumées au § 6.

Certaines modifications doivent être apportées à la méthode lorsqu'on évalue les brouillages causés par des constellations de satellites non OSG opérant sur des orbites hautement elliptiques.

2 Cas des orbites circulaires

Dans le cas des orbites circulaires, la distance d'un satellite au centre de la Terre est constante. La fonction de densité de probabilité régissant la probabilité que l'argument d'un satellite ait une valeur comprise entre u et $u + du$ est notée $p(u)$. Cette fonction est uniforme et vaut:

$$p(u) = 1/(2\pi) \quad (41)$$

En supposant que la période de rotation d'un satellite est égale à 1, on peut, tout en restant sur un plan général, exprimer comme suit l'argument u à l'instant t ($0 \leq t < 1$):

$$u = 2\pi t \quad (42)$$

Si les hypothèses du § 1 sont respectées, nous pouvons supposer que la fonction de densité de probabilité de la longitude d'un satellite est uniforme sur l'intervalle $0-2\pi$.

Ainsi, si l'on part de l'hypothèse de M_s plans orbitaux et de N_s satellites par plan, nous pouvons supposer que la fonction de densité de probabilité de l'argument d'un satellite de référence est uniforme sur l'intervalle $0-2\pi/N_s$ et que la fonction de densité de probabilité de la longitude du satellite de référence est uniforme sur l'intervalle $0-2\pi/M_s$. Notant respectivement u et φ l'argument et la longitude du satellite de référence, on peut alors exprimer l'argument u_{ij} et la longitude φ_{ij} du $i^{\text{ème}}$ satellite évoluant dans le $j^{\text{ème}}$ plan (pour $i = 1, 2, \dots, N_s$ et $j = 1, 2, \dots, M_s$) de la manière suivante (voir la Note 1):

$$u_{ij} = u + (i - 1) 2\pi/N_s \quad (43a)$$

$$\varphi_{ij} = \varphi + (j - 1) 2\pi/M_s \quad (43b)$$

où $i = 1$ et $j = 1$ correspondent au satellite de référence. On peut ensuite évaluer les brouillages de manière générale grâce à la méthode décrite au § 4.

NOTE 1 – Dans l'équation (43a) on suppose qu'il n'existe pas de différences de phase entre les satellites des différents plans. Dans le cas contraire, cette équation doit être modifiée de la façon suivante: $u_{ij} = u + \beta_j + (i - 1) 2\pi/N_s$, où β_j est la différence de phase correspondant au $j^{\text{ème}}$ plan ($\beta_1 = 0$).

3 Cas des orbites elliptiques

3.1 Distance d'un satellite au centre de la Terre

La distance $r(u)$ entre le centre de la Terre et un satellite en orbite elliptique peut être exprimée en fonction de l'argument u de la manière suivante:

$$r(u) = \frac{r_0}{1 + e \cdot \cos(u - \omega)} \quad (44)$$

où e et ω sont respectivement l'excentricité et l'argument du périhélie. Les distances de l'apogée et du périhélie de l'orbite par rapport au centre de la Terre sont respectivement données par les expressions $r_0/(1 - e)$ et $r_0/(1 + e)$. Inversement, on peut exprimer r_0 et e de la manière suivante:

$$r_0 = 2 r_{\max} \cdot r_{\min} / (r_{\max} + r_{\min}) \quad (45a)$$

$$e = (r_{\max} - r_{\min}) / (r_{\max} + r_{\min}) \quad (45b)$$

où $r_{\max}$ et $r_{\min}$ sont les distances (par rapport au centre de la Terre) respectivement à l'apogée et au périhélie.

3.2 Fonction de densité de probabilité de l'argument d'un satellite

Un théorème bien connu de l'orbite elliptique (seconde loi de Kepler) établit que «la vitesse de l'aire balayée est constante», ce qui peut s'exprimer de la manière suivante:

$$r^2(u) \cdot (du / dt) = \text{constante} \quad (46a)$$

ou encore

$$dt \propto r^2(u) \cdot du \quad (46b)$$

Il convient de noter ici que dt est proportionnel à la probabilité que l'argument du satellite appartienne à l'intervalle $(u, u + du)$. La fonction de densité de probabilité $p(u)$ de l'argument u d'un satellite est donc donnée par:

$$p(u) = \frac{\alpha}{[1 + e \cdot \cos(u - \omega)]^2} \quad (47)$$

L'intégration de $p(u)$ par rapport à u sur l'intervalle $0-2\pi$ doit être égale à 1, ce qui permet de déterminer la valeur de α :

$$\alpha = \frac{(1 - e^2)^{3/2}}{2\pi} \quad (48)$$

Notons ici que la latitude θ du satellite dépend de l'argument de la manière suivante:

$$\theta = \arcsin(\sin u \cdot \sin \delta) \quad (49)$$

où δ est l'angle d'inclinaison de l'orbite. Cette équation s'applique également au cas des orbites circulaires.

3.3 Détermination de l'argument en fonction du temps

On peut supposer, pour simplifier, et tout en restant sur un plan général, que la période du satellite est égale à 1. Il est très souvent nécessaire de déterminer l'argument $u(t)$ en fonction du temps t , où $0 \leq t < 1$. On peut pour cela résoudre l'équation suivante:

$$t = \int_0^{u(t)} p(x) \cdot dx \quad (50)$$

Pour simplifier le calcul de $u(t)$ sans perte en termes de précision on peut utiliser la méthode ci-après qui consiste à diviser une période par N et à définir t_k comme suit:

$$t_k = k/N \quad (k = 0, 1, \dots, N) \quad (51)$$

L'argument correspondant à l'instant t_k est désigné par $u_k = u(t_k)$, que l'on détermine comme suit:

$$\int_{u_{k-1}}^{u_k} p(x) \cdot dx = \frac{1}{N} \quad (52)$$

L'expression suivante donne une valeur approchée de u_k (noter que $u_0 = 0$):

$$u_k \cong u_{k-1} + \frac{1}{N \cdot p(u_{k-1})} \quad (53)$$

que l'on obtient en supposant que $p(x)$ est constant dans l'intervalle (u_{k-1}, u_k) . Cette formule constitue une première valeur approchée de u_k dont il est possible de déterminer une valeur précise grâce à la méthode de Newton-Raphson (voir la Note 1). On obtient ainsi u_k pour toutes les valeurs de t_k ($k = 0, 1, \dots, N$). Notons que $u_N = 2\pi$.

On peut approcher la valeur de $u(t)$ correspondant au temps t grâce à la formule suivante:

$$u(t) = N [(t_{k+1} - t) \cdot u_k + (t - t_k) \cdot u_{k+1}] \quad (54)$$

où $t_k \leq t < t_{k+1}$ (si $t \geq 1$, cette inégalité doit être remplacée par $t_k \leq t - 1 < t_{k+1}$). Si N est suffisamment grand (par exemple, $N = 10\,000$), l'équation (54) donne une valeur exacte de $u(t)$ en fonction du temps. L'Appendice 1 décrit une méthode de calcul simplifiée qui évite de devoir intégrer l'équation (52).

NOTE 1 – La méthode de Newton-Raphson est brièvement décrite ci-dessous.

L'équation (53) permet de définir la valeur approchée v_0 de u_k :

$$v_0 = u_{k-1} + \frac{1}{N \cdot p(u_{k-1})} \quad (55)$$

Si l'on connaît la valeur approchée v_{i-1} , la valeur approchée suivante est donnée par:

$$v_i = v_{i-1} - \frac{f(v_{i-1})}{p(v_{i-1})} \quad (i = 1, 2, 3, \dots) \quad (56)$$

où

$$f(v_{i-1}) = \int_{u_{k-1}}^{v_{i-1}} p(x) \cdot dx - \frac{1}{N} \quad (57)$$

et $p(v_{i-1})$ et $p(x)$ sont toutes deux données par l'équation (47) (noter que $p(x)$ est la dérivée de $f(x)$). On obtient facilement une valeur précise de u_k en répétant les calculs correspondant aux équations (56) et (57). La convergence est très rapide. On peut par exemple calculer la valeur de $f(v_{i-1})$ avec la méthode de Simpson.

3.4 Détermination des emplacements des satellites

Ce paragraphe expose une méthode pour déterminer l'emplacement des satellites non OSG évoluant sur des orbites elliptiques. On suppose qu'il existe M_s plans orbitaux et N_s satellites dans chaque plan.

Nous supposons alors que l'emplacement (temporel) du satellite de référence est distribué uniformément dans l'intervalle $0 \leq t < 1/N_s$ et que sa longitude φ est distribuée uniformément dans l'intervalle $0 \leq \varphi < 2\pi/M_s$. L'argument correspondant $u(t)$ est donné par l'équation (54). Les arguments des autres satellites du même plan orbital correspondent aux instants $t + (k/N_s)$, où $k = 1$ à $N_s - 1$.

L'équation (49) permet de déterminer les latitudes des satellites appartenant au plan orbital du satellite de référence. On peut supposer que les arguments des satellites dans les autres plans orbitaux sont identiques à ceux des satellites évoluant dans le plan orbital de référence. Il est facile de déterminer les longitudes de tous les satellites à partir de la longitude et de l'argument du satellite de référence.

Pour les calculs réels, il est nécessaire de déterminer les brouillages à des points d'échantillonnage. A cet effet, le temps maximal ($= 1/N_s$) du satellite de référence est divisé par N_t et la longitude maximale ($= 2\pi/M_s$) du satellite de référence est divisée par M_ϕ . Ainsi, il existe une probabilité $1/(M_\phi \cdot N_t)$ que le satellite de référence apparaisse à l'instant et à la longitude suivants:

$$t = \frac{1}{N_s} \cdot \frac{i_t - 0,5}{N_t} \quad (i_t = 1, 2, \dots, N_t) \quad (58a)$$

$$\phi = \frac{2\pi}{M_s} \cdot \frac{j_\phi - 0,5}{M_\phi} \quad (j_\phi = 1, 2, \dots, M_\phi) \quad (58b)$$

On peut déterminer les latitudes et longitudes de tous les satellites de la constellation à partir des équations (49), (54), (58a) et (58b).

Il est possible que les valeurs de M_ϕ et N_t ne soient pas suffisamment grandes et induisent un temps de calcul trop important. Il convient alors d'adopter la méthode indiquée ci-après si l'on veut procéder à des calculs détaillés dans les régions sensibles.

Il faut calculer les espacements angulaires d'antenne pour chaque cellule définie par les équations (58a) et (58b) et pour tous les satellites visibles. Si l'espacement angulaire minimal est inférieur à une valeur de seuil donnée, la cellule correspondante doit être considérée comme étant une région sensible et subdivisée encore en cellules plus petites (voir la Note 1).

Si le temps et la longitude associés au satellite de référence sont respectivement donnés par les équations (58a) et (58b), le temps t_{ij} et la longitude ϕ_{ij} associés au $i^{\text{ème}}$ satellite du $j^{\text{ème}}$ plan (pour $i = 1, 2, \dots, N_s$ et $j = 1, 2, \dots, M_s$) sont donnés par:

$$t_{ij} = t + (i - 1)/N_s \quad (59a)$$

$$\phi_{ij} = \phi + (j - 1) 2\pi/M_s \quad (59b)$$

où $i = 1$ et $j = 1$ correspondent au satellite de référence. On peut calculer l'argument u_{ij} du $i^{\text{ème}}$ satellite dans le $j^{\text{ème}}$ plan en appliquant les équations (54) et (59a) (voir la Note 2).

NOTE 1 – Lorsque l'angle d'élévation de la station brouillée (par exemple, une station du service fixe) est très faible, il est possible qu'une cellule sensible soit négligée du fait des effets de l'horizon. Pour éviter cela, il convient de considérer 9 cellules, dont les cellules adjacentes à la région sensible, comme cellules sensibles et de les diviser à leur tour en cellules plus petites. Si l'angle d'élévation de l'antenne du service fixe n'est pas faible, il n'est pas toujours nécessaire de continuer à subdiviser les cellules adjacentes en cellules plus petites.

NOTE 2 – Dans l'équation (59a), on suppose que des satellites ont le même argument dans M_s plans orbitaux différents. La situation peut toutefois être différente dans certains cas. Ainsi, les temps t_{ij} associés aux satellites évoluant dans les différents plans doivent être déterminés par l'expression $t_{ij} = t + \tau_j + (i - 1)/N_s$, où τ_j est la phase correspondant au $j^{\text{ème}}$ plan ($\tau_1 = 0$).

4 Angles d'élévation et d'azimut en direction des satellites dans des conditions de propagation en espace libre

La longitude du $i^{\text{ème}}$ satellite dans le $j^{\text{ème}}$ plan est donnée par les équations (43b) ou (59b). On peut calculer la latitude θ_{ij} de ce satellite grâce à l'équation (49) tandis que sa distance r_{ij} au centre de la Terre est donnée par l'équation (44). Ces trois valeurs forment les coordonnées polaires (r_{ij} , θ_{ij} , ϕ_{ij}).

En notant respectivement θ_f et φ_f la latitude (positive dans l'hémisphère Nord et négative dans l'hémisphère Sud) et la longitude de la station brouillée du service fixe, on convertit les coordonnées polaires ci-dessus de manière telle que la station du service fixe se trouve à une latitude de 0° et à une longitude de 0° . Pour ce faire, on ramène d'abord la longitude de la station au degré 0. Les nouvelles coordonnées du satellite par rapport à la station du service fixe placée à la longitude 0 sont alors données par les coordonnées polaires (r_{ij} , θ_{ij} , $\varphi_{ij} - \varphi_f$) qui correspondent aux coordonnées cartésiennes suivantes:

$$x = r_{ij} \cdot \cos \theta_{ij} \cdot \cos(\varphi_{ij} - \varphi_f) \quad (60a)$$

$$y = r_{ij} \cdot \cos \theta_{ij} \cdot \sin(\varphi_{ij} - \varphi_f) \quad (60b)$$

$$z = r_{ij} \cdot \sin \theta_{ij} \quad (60c)$$

On ramène ensuite la latitude de la station du service fixe au degré zéro de latitude. Les nouvelles coordonnées cartésiennes (x_1 , y_1 , z_1) du satellite par rapport à la station du service fixe placée à la latitude 0 sont données par:

$$x_1 = x \cdot \cos \theta_f + z \cdot \sin \theta_f \quad (61a)$$

$$y_1 = y \quad (61b)$$

$$z_1 = -x \cdot \sin \theta_f + z \cdot \cos \theta_f \quad (61c)$$

Les angles d'élévation ε_{s0} et d'azimut γ_s , mesurés à partir du nord dans le sens des aiguilles d'une montre, par rapport au satellite vu à partir de la station du service fixe dans des conditions de propagation en espace libre, sont donnés par:

$$\varepsilon_{s0} = \arctg \left(\frac{x_1 - r_e}{\sqrt{y_1^2 + z_1^2}} \right) \quad (62a)$$

$$\gamma_s = \arctg \left(\frac{y_1}{z_1} \right) \quad \text{pour } z_1 > 0$$

$$\gamma_s = \arctg \left(\frac{y_1}{z_1} \right) + \pi \quad \text{pour } z_1 < 0 \quad (62b)$$

où r_e est la valeur moyenne du rayon de la Terre, égale à 6 370 km.

A noter que les équations de ce paragraphe sont équivalentes aux équations correspondantes de l'Annexe 1 de la présente Recommandation.

5 Espacements angulaires entre la direction de l'antenne du service fixe et les satellites visibles

On peut recourir à la Recommandation UIT-R F.1333 pour déterminer la visibilité du satellite et son angle d'élévation réel, ϵ_s , en cas de visibilité, compte tenu de la réfraction atmosphérique. On peut alors calculer l'espacement angulaire SA mesuré à partir de la direction du faisceau principal de l'antenne du service fixe grâce à l'expression suivante:

$$SA = \arccos(\cos \epsilon_s \cdot \cos \epsilon_f \cdot \cos(\gamma_s - \gamma_f) + \sin \epsilon_s \cdot \sin \epsilon_f) \quad (63)$$

où ϵ_f et γ_f sont les angles d'élévation et d'azimut (mesurés à partir du nord dans le sens des aiguilles d'une montre), par rapport au faisceau principal de l'antenne du service fixe. Cet espacement angulaire permet de déterminer le gain de l'antenne du service fixe en direction du satellite selon la Recommandation UIT-R F.1245 pour le cas d'une antenne directive. Par ailleurs, dans le cas d'une antenne équidirective ou sectorielle, l'espacement angulaire SA est égal à $|\epsilon_s - \epsilon_f|$ et le gain de l'antenne du service fixe en direction du satellite doit être établi conformément à la Recommandation UIT-R F.1336.

NOTE 1 – On peut utiliser les Recommandations UIT-R SF.1395 ou UIT-R F.1404 pour calculer l'affaiblissement d'absorption atmosphérique minimal, dont le rôle est important pour évaluer les brouillages subis par les stations du service fixe. Si cette absorption se produit dans des bandes de fréquences non visées par lesdites Recommandations, on pourra se reporter à la Recommandation UIT-R P.676.

6 Résumé des caractéristiques de la méthode analytique

La méthode analytique décrite dans la présente Annexe met à profit le fait que si la période orbitale d'un satellite n'est pas égale à une fraction rationnelle de la période de rotation de la Terre, la fonction de densité de probabilité de la longitude du satellite est uniforme sur l'intervalle $0-2\pi$. Dans le cas d'une orbite circulaire, la fonction de densité de probabilité de l'argument u est également uniformément répartie sur l'intervalle $0-2\pi$. D'autre part, dans le cas d'une orbite elliptique, l'argument n'est pas uniformément réparti, mais s'il est déterminé en fonction du temps, tel qu'indiqué au § 3.3, la probabilité de la présence d'un satellite dans un intervalle de temps $(t, t + dt)$ est proportionnelle à dt . L'équation (49) permet de calculer la latitude du satellite en fonction de l'argument. Par conséquent, la fonction de densité de probabilité de la latitude du satellite peut être considérée comme étant indépendante de celle de la longitude du satellite. Si l'on tient compte de ce fait, l'emplacement du satellite de référence peut être déterminé de façon analytique tel qu'indiqué au § 3.4.

Sous réserve des hypothèses énoncées au § 1, il suffit de supposer une répartition uniforme de l'emplacement (dans le temps) du satellite de référence à l'intérieur de l'intervalle $0 \leq t < 1/N_s$, ainsi que la répartition uniforme de sa longitude ϕ , dans l'intervalle $0 < \phi \leq 2\pi/M_s$. L'argument correspondant $u(t)$ est obtenu au moyen de l'équation (54). Les emplacements des autres satellites de la même constellation peuvent être aisément obtenus en fonction de l'emplacement du satellite de référence.

Si l'on constate la sensibilité particulière au brouillage d'une cellule donnée (autrement dit l'espacement angulaire minimum par rapport aux satellites visibles est inférieur à un certain seuil), il convient alors de subdiviser ladite cellule (et les cellules voisines) en cellules plus petites afin d'évaluer le brouillage de façon détaillée; en revanche, en cas de non-sensibilité, la division en cellules plus petites est inutile. Il s'agit là d'un point important qui renforce particulièrement l'efficacité de la méthode analytique en termes de temps de calcul requis. Par conséquent, la méthode analytique devrait s'avérer beaucoup plus rapide qu'une méthode de simulation ordinaire, pour une précision de calcul identique. Par exemple, si le nombre de cellules sensibles, en incluant les cellules voisines, est égal à 10% de l'ensemble des cellules considérées, le temps de calcul requis sera d'environ 1/10.

APPENDICE 1

À L'ANNEXE 7

Calculs simplifiés concernant le § 3.3 de l'Annexe 7

Il est possible de simplifier comme suit les calculs liés à l'équation (50) du § 3.3 de l'Annexe 7, en évitant le calcul de l'intégrale de l'équation (52).

Tout d'abord la variable u , de l'équation (47), est transformée en une variable s en procédant comme suit:

$$\frac{1}{1 + e \cdot \cos(u - \omega)} = \frac{1 - e \cdot \cos(s - s_0)}{1 - e^2} \quad (64)$$

dans laquelle $u = 0$ correspond à $s = 0$ et, par conséquent, s_0 est défini ci-dessous en supposant $0 \leq \omega < 2\pi$:

$$s_0 = \arccos\left(\frac{e + \cos \omega}{1 + e \cdot \cos \omega}\right) \quad \text{pour } 0 \leq \omega < \pi \quad (65a)$$

$$= 2\pi - \arccos\left(\frac{e + \cos \omega}{1 + e \cdot \cos \omega}\right) \quad \text{pour } \pi \leq \omega < 2\pi \quad (65b)$$

Ici la fonction $\arccos(x)$ est définie sur l'intervalle $(0, \pi)$. D'après les équations (65a) et (65b), s_0 est une fonction croissante de ω . On suppose par ailleurs la possibilité de définir u en tant que fonction croissante de s (c'est-à-dire $du/ds > 0$). D'après l'équation (64), après quelques calculs, du/ds peut s'exprimer comme suit:

$$\frac{du}{ds} = \frac{\sqrt{1 - e^2}}{1 - e \cdot \cos(s - s_0)} \quad (66)$$

Si l'on substitue les équations (64) et (66) dans les équations (47) et (50) de l'Annexe 7, la relation suivante peut être obtenue:

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^s (1 - e \cdot \cos(s - s_0)) ds = t \quad (67)$$

Après intégration du membre de gauche, l'équation (67) se transforme simplement comme suit:

$$s - e \cdot \sin(s - s_0) = 2\pi t + e \cdot \sin s_0 \quad (68)$$

Cette équation transcendante est une variante de l'équation dite de Kepler (signalons que $2\pi t$ est appelée anomalie moyenne et que l'équation de Kepler n'est définie par la théorie de la dynamique que pour $s_0 = 0$). Pour une valeur t ($0 \leq t < 1$), la valeur de s ($0 \leq s < 2\pi$) vérifiant l'équation (68) peut être facilement calculée par la méthode de Newton-Raphson en procédant comme suit (voir la Note 1):

La valeur initiale approchée $s^{(0)}$ de s peut être calculée par la relation:

$$s^{(0)} = 2\pi t + e \cdot \sin s_0 \quad (69)$$

Ensuite, la $v^{\text{ème}}$ valeur approchée de $s^{(v)}$ est calculée par la formule:

$$s^{(v)} = s^{(v-1)} - \frac{f(s^{(v-1)})}{f'(s^{(v-1)})} \quad (v = 1, 2, 3, \dots) \quad (70)$$

dans laquelle:

$$\begin{aligned} f(s) &= s - e \cdot \sin(s - s_0) - 2\pi t - e \cdot \sin s_0 \\ f'(s) &= 1 - e \cdot \cos(s - s_0) \end{aligned} \quad (71)$$

Notons que $f'(s)$ désigne la dérivée de $f(s)$. La convergence de $s^{(v)}$ vers une valeur précise de s au terme des calculs itératifs utilisant les équations (70) et (71) est très rapide.

La valeur de u correspondant à s est déterminée comme suit, en tenant compte du fait que u est une fonction croissante de s :

$$u = \omega - 2\pi + a \quad \text{pour } -2\pi < s - s_0 < -\pi \quad (72a)$$

$$= \omega - a \quad \text{pour } -\pi \leq s - s_0 < 0 \quad (72b)$$

$$= \omega + a \quad \text{pour } 0 \leq s - s_0 < \pi \quad (72c)$$

$$= \omega + 2\pi - a \quad \text{pour } \pi \leq s - s_0 < 2\pi \quad (72d)$$

par conséquent:

$$a = \arccos\left(\frac{\cos(s - s_0) - e}{1 - e \cdot \cos(s - s_0)}\right) \quad (72e)$$

Il est possible de calculer u_k correspondant à t_k défini par l'équation (51) de l'Annexe 7 pour une valeur quelconque de k ($k = 0, 1, 2, \dots, N$) ($u_0 = 0$).

La valeur de $u(t)$ correspondant à l'instant t peut être calculée de façon approchée comme suit:

$$u(t) = N [(t_{k+1} - t) \cdot u_k + (t - t_k) \cdot u_{k+1}] \quad (73)$$

avec $t_k \leq t < t_{k+1}$ (si $t \geq 1$, cette inégalité doit être remplacée par $t_k \leq t - 1 < t_{k+1}$). Pour N suffisamment grand (par exemple, $N = 10\,000$), l'équation (73) donne une valeur exacte de $u(t)$ en fonction du temps.

Des calculs sur ordinateur ont confirmé le caractère équivalent de la méthode de calcul décrite dans le présent Appendice et de celle du § 3.3 de l'Annexe 7.

NOTE 1 – Selon la méthode de Newton-Raphson décrite ci-dessus, la convergence vers les résultats escomptés est stable et rapide pour toute valeur de t et de s_0 , à condition que e soit inférieur à 0,81. Cette condition sera vérifiée pour des applications générales. Toutefois, si pour une raison quelconque il faut résoudre l'équation (68) pour une plus grande valeur de e , un moyen sûr de procéder consiste à adopter une méthode de Newton-Raphson modifiée, de façon à garantir une convergence rapide. Une méthode est indiquée à titre d'exemple ci-dessous (tous les calculs doivent être effectués en double précision).

Etape 1: au lieu d'effectuer le calcul d'après l'équation (70), choisir tout d'abord $\lambda = 1$ et calculer $s^{(v)}$ à l'Etape 2.

Etape 2: calculer:

$$s^{(v)} = s^{(v-1)} - \frac{\lambda \cdot f(s^{(v-1)})}{f'(s^{(v-1)})} \quad (74)$$

Etape 3: si $|f(s^{(v)})| < 10^{-12}$, calcul est entièrement terminé (autrement dit, $s^{(v)}$ a atteint une valeur suffisamment précise). Sinon et si $|f(s^{(v)})| < |f(s^{(v-1)})|$, le calcul de $s^{(v)}$ est terminé et l'on revient à l'Etape 1 afin d'effectuer le calcul pour la valeur suivante de v . Si $|f(s^{(v)})| \geq |f(s^{(v-1)})|$, diviser λ par 2 et revenir à l'Etape 2 afin de réitérer le calcul.

La méthode modifiée décrite ci-dessus est efficace pour toute valeur de e jusqu'à 0,999.