

RECOMMANDATION UIT-R S.1257

**MÉTHODE ANALYTIQUE POUR CALCULER LES STATISTIQUES DE
VISIBILITÉ DES SATELLITES NON GÉOSTATIONNAIRES À
PARTIR D'UN POINT À LA SURFACE DE LA TERRE**

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

(1997)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) qu'il peut être nécessaire, dans les études de brouillage et de partage entre stations non géostationnaires (non OSG) et autres stations, de calculer les probabilités de dépassement d'un niveau donné de brouillage;
- b) qu'il existe des programmes de simulation informatique pour calculer les statistiques requises mais que de tels programmes ne sont sans doute pas très répandus;
- c) que l'on peut faire appel à des simulations informatiques pour obtenir de nombreuses statistiques, assez fidèles mais seulement exploitables par des experts et pouvant nécessiter un temps d'exécution considérable;
- d) que les méthodes analytiques peuvent parfois faire gagner du temps et exiger des moyens moins complexes pour le calcul d'un nombre limité de statistiques,

recommande

1 que la méthode analytique décrite dans l'Annexe 1 soit utilisée afin d'obtenir des statistiques pour les études de brouillage et de partage entre stations non OSG et d'autres stations. (Le terme «probabilité» n'est pas utilisé dans le sens mathématique strict mais dans celui de «pourcentage du temps».)

NOTE 1 – Cette méthode peut être utilisée pour les calculs de brouillage entre liaisons de connexion non OSG et stations OSG. Elle peut également être appliquée chaque fois qu'une antenne donnée pointe dans une direction fixe tandis que l'autre antenne est soit à bord d'un satellite non OSG soit à la poursuite du satellite non OSG.

NOTE 2 – Cette méthode donne une valeur moyenne pour une constellation de satellites en orbite asynchrone. Elle est également applicable à une constellation de satellites en orbite synchrone (dont les trajectoires reviennent périodiquement) s'il existe plusieurs trajectoires de satellite dans la zone considérée.

NOTE 3 – Les limites de la méthode décrite dans l'Annexe 1 doivent être prises en compte.

ANNEXE 1

L'Appendice 1 contient une méthode permettant de définir la zone et de calculer la probabilité d'y trouver un satellite non OSG.

L'Appendice 2 donne la méthode permettant de calculer cette probabilité.

L'Appendice 3 décrit la construction des formules utilisées dans l'Appendice 2.

Calcul de l'angle de discrimination nécessaire pour un niveau de brouillage donné

Le cas considéré ici est celui d'un partage entre stations non OSG et OSG.

La zone est définie pour un brouillage:

- a) d'un satellite OSG par une station terrienne non OSG;
- b) d'une station terrienne OSG par un satellite non OSG;
- c) d'un satellite non OSG par une station terrienne OSG;
- d) d'une station terrienne non OSG par un satellite OSG.

Dans les équations suivantes:

ε : angle d'élévation d'un satellite par rapport à une station terrienne

r : rayon de la Terre (6 376 km)

H : altitude du satellite OSG (km)

h : altitude du satellite non OSG (km)

d_I : distance entre la source de brouillage et le récepteur affecté (km)

d_N : distance entre le satellite non OSG et une station (km)

d_G : distance entre le satellite OSG et une station (km)

f : fréquence (GHz)

E : densité spectrale en terme de p.i.r.e. (dB(W/Hz))

N_0 : densité spectrale en terme de bruit (dB(W/Hz))

$G(\varphi)$: gain d'antenne dans la direction de φ (degrés) à partir de l'axe principal du faisceau (dB)

G : gain d'antenne dans l'axe (dB)

Le suffixe G se rapporte au réseau OSG

Le suffixe N se rapporte au réseau non OSG

Le suffixe E se rapporte à une station terrienne

Le suffixe S se rapporte à un satellite

Le suffixe T se rapporte à un paramètre d'émission

Le suffixe R se rapporte à un paramètre de réception

PR : rapport de protection

Les distances entre une station terrienne et un satellite non OSG ou OSG sont, dans le cas de l'alignement, les suivantes:

$$d_N = \sqrt{r^2 \sin^2 \varepsilon + 2r h + h^2} - r \sin \varepsilon \quad (1)$$

$$d_G = \sqrt{r^2 \sin^2 \varepsilon + 2r H + H^2} - r \sin \varepsilon \quad (2)$$

Méthode du rapport C_0/I_0

$$(C_0/I_0)_{en\ ligne} = E_{GE} - E_{NE} \quad \text{pour le cas a)} \quad (3)$$

$$(C_0/I_0)_{en\ ligne} = E_{GS} - E_{NS} - 20 \log d_G + 20 \log d_N \quad \text{pour le cas b)} \quad (4)$$

$$(C_0/I_0)_{en\ ligne} = E_{NE} - E_{GE} \quad \text{pour le cas c)} \quad (5)$$

$$(C_0/I_0)_{en\ ligne} = E_{NS} - E_{GS} - 20 \log d_N + 20 \log d_G \quad \text{pour le cas d)} \quad (6)$$

Les stations terriennes OSG et non OSG doivent être, soit colocalisées, soit placées de façon à prendre en compte l'angle de discrimination de l'antenne du satellite, celui-ci étant OSG dans les cas a) et d) et non OSG dans les cas b) et c).

La discrimination d'antenne requise dans les cas a) et d) pour une station terrienne non OSG et dans les cas b) et c) pour une station terrienne OSG, est calculée comme suit:

$$G - G(\varphi) = (C_0/I_0)_{en\ ligne} - PR \quad (7)$$

Pour calculer l'angle de discrimination φ requis, les diagrammes d'antenne appropriés doivent être utilisés. Pour les stations terriennes OSG, le diagramme des lobes secondaires, utilisé dans l'équation (8), est indiqué dans la Recommandation UIT-R S.580. Dans la zone des lobes secondaires, l'angle de discrimination est le suivant:

$$\varphi = 10^{(29 - G(\varphi))/25} \quad (8)$$

Pour le lobe principal, l'angle de discrimination peut être calculé comme suit:

$$\varphi = \varphi_0 \sqrt{\frac{G - G(\varphi)}{12}} \quad (9)$$

Dans le cas b), la distance entre le satellite non OSG et la station terrienne OSG varie avec le déplacement du satellite sur son orbite. Pour les petites valeurs de φ et pour des angles d'élévation ε élevés, cette distance peut être négligée. Mais dans les autres cas, la distance d_N doit être calculée séparément pour le plus grand angle d'élévation ($\varepsilon + \varphi$) et pour le plus petit angle d'élévation ($\varepsilon - \varphi$), et les nouvelles valeurs doivent être utilisées dans l'équation (2).

Dans les calculs des Appendices 2 et 3, l'angle φ correspond au rayon de la zone pour laquelle la probabilité doit être calculée. Pour le calcul des statistiques, $\varepsilon_1 = \varepsilon - \varphi/2$ et $\varepsilon_2 = \varepsilon + \varphi/2$.

Méthode du rapport I_0/N_0

Pour calculer l'angle de discrimination φ requis pour le cas fondé sur la valeur requise du rapport I_0/N_0 , les équations suivantes sont utilisées:

$$G - G(\varphi) = (I_0/N_0)_{en\ ligne} - (I_0/N_0)_{requis} \quad (10)$$

Dans le cas de l'alignement, on peut calculer le rapport I_0/N_0 comme suit:

$$(I_0/N_0)_{en\ ligne} = E - N_0 - 20 \log d_I - 20 \log f - 92,5 \quad (11)$$

où:

E : p.i.r.e. de l'émetteur brouilleur

N_0 : densité spectrale de bruit du système récepteur utile.

APPENDICE 2

DE L'ANNEXE 1

Calcul des statistiques de zone pour les satellites non OSG

1 Introduction

La méthode présentée dans le présent Appendice pourra être utilisée pour calculer la probabilité de trouver un satellite de constellation dans une zone circulaire ou rectangulaire (azimut/élévation ou latitude/longitude). Une zone circulaire peut, par exemple, être délimitée par le faisceau principal ou par les lobes secondaires d'une antenne de station terrienne ou de faisceau hertzien. Si cette zone est fondée sur un angle de décalage tel qu'un certain niveau de brouillage est atteint, le résultat indiquera la probabilité qu'un niveau de brouillage donné soit dépassé. Cette méthode peut être utilisée pour calculer le brouillage entre réseaux non OSG et OSG. Elle peut également servir à calculer la probabilité de brouillage entre une station terrienne non OSG et une station de réception du service fixe ou une station terrienne du service fixe par satellite (SFS). Le calcul fait appel à l'angle de discrimination pour définir une zone dans laquelle le niveau admissible de brouillage est dépassé.

Cette méthode peut être utilisée à toute latitude du point d'observation (par exemple une station terrienne), pour toute altitude, inclinaison, élévation et tout azimut de satellite, mais seulement si celui-ci est visible dans la zone définie (voir le § 5).

2 Symboles utilisés (dans l'Appendice 2 et dans l'Appendice 3)

T_s : période orbitale du satellite (min)

T_e : période de rotation de la Terre (min)

L_0 : latitude du point d'observation (rad)

L : latitude de la zone (rad)

l_m : longueur moyenne des trajectoires passant par un cercle

b : longueur de la zone dans le sens longitudinal (rad)

i : inclinaison de l'orbite du satellite (rad)

r_c : rayon de la zone circulaire (rad)

α : angle entre la trajectoire au sol et la ligne de latitude (rad)

A : zone sur une surface sphérique (sterad)

A_c : zone circulaire sur une surface sphérique (sterad)

P_h : probabilité de trouver un satellite non OSG dans la zone (calcul pour un seul satellite)

P_i : probabilité de trouver un satellite non OSG au cours d'une révolution dans la zone (calcul pour un seul satellite)

- P : probabilité totale de trouver un satellite non OSG dans la zone définie (calcul pour un seul satellite)
- P_c : probabilité qu'un quelconque des satellites d'une constellation soit dans la zone
- N : nombre de satellites dans la constellation
- k : $r / (r + h)$
- Λ : azimut du centre de la zone (rad)
- ε : élévation du centre de la zone (rad)
- r : rayon de la Terre
- h : altitude du satellite
- γ : angle de nadir par rapport au point subsatellite (rad)
- θ_ε : angle géocentrique en direction de l'élévation correspondant à ε (rad)
- $\theta_{\varepsilon 2}$: angle géocentrique au point le plus élevé de la zone dans la direction de l'élévation (rad)
- $\theta_{\varepsilon 1}$: angle géocentrique au point le moins élevé de la zone dans la direction de l'élévation (rad)
- $\Delta\theta_\beta$: différence des angles géocentriques à la normale de θ_ε (rad)
- β : largeur de la zone en direction de l'azimut (par exemple, ouverture du faisceau d'antenne dans la direction azimutale)
- $\varepsilon_1, -\varepsilon_2$: plus grand et plus petit angles d'élévation de la zone (rad) ($\varepsilon_1, -\varepsilon_2$ sont, par exemple, des ouvertures du faisceau d'antenne en direction de l'élévation).

3 Calculs de probabilité

Seules les formules présentées ci-dessous, nécessaires pour les calculs de probabilité, ont été extraites sans modification de leur numérotation de l'Appendice 3, les paramètres calculés sont assortis d'une explication.

$$k = \frac{r}{r + h} \quad (21)$$

$$\theta_{\varepsilon_1} = \pi - \gamma - (\pi/2 + \varepsilon_1) = \arccos(k \cos \varepsilon_1) - \varepsilon_1 \quad (22)$$

$$\theta_{\varepsilon_2} = \pi - \gamma - (\pi/2 + \varepsilon_2) = \arccos(k \cos \varepsilon_2) - \varepsilon_2 \quad (22)$$

$$\Delta\theta_\varepsilon = \theta_{\varepsilon 2} - \theta_{\varepsilon 1} \quad (23)$$

$$\theta_\varepsilon = \frac{\theta_{\varepsilon 1} + \theta_{\varepsilon 2}}{2} \quad (24)$$

$$\Delta\theta_\beta = 2 \arccos \frac{\operatorname{tg}(\beta/2) \sin \theta_\varepsilon}{\cos \varepsilon} \quad (25)$$

$$L = \arccos(\cos \theta_\varepsilon \cdot \sin L_0 + \sin \theta_\varepsilon \cdot \cos L_0 \cdot \cos \Lambda) \quad (27)$$

$$\alpha = \arccos \frac{\cos i}{\cos L} \quad (15)$$

$$P = \frac{A}{2\pi^2} \frac{1}{\sin \alpha} \frac{1}{\cos L} \quad (19a)$$

$$P_c = NP$$

Pour une zone circulaire:

$$A = A_c$$

$$A_c = \frac{\pi}{4} \Delta\theta_\varepsilon \Delta\theta_\beta$$

Pour une zone rectangulaire:

$$A = \beta (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \quad (26)$$

APPENDICE 3*

DE L'ANNEXE 1

Construction des formules indiquées dans l'Appendice 2

1 Probabilité qu'un satellite se trouve dans une zone donnée

La Fig. 1 montre une orbite de satellite non OSG autour de la Terre. Un cas simple est celui d'un plan d'orbite passant par l'axe des pôles. Si le satellite est projeté à la surface de la Terre, on obtient des traces au sol. Si la Terre était stationnaire, il n'y aurait qu'une seule trace dans le plan des pôles. Mais comme la Terre tourne pendant que le satellite fait une révolution, la prochaine trace au sol sera décalée d'un écart de longitude égal à:

$$T_s / T_e \ 2\pi \quad (12)$$

La Fig. 1 montre plusieurs traces, correspondant à une période de temps plus longue. La zone rectangulaire est celle pour laquelle la probabilité doit être calculée. La probabilité que le satellite soit dans la zone est délimitée par le segment $2b$ de la longueur totale de la bande ombrée autour de la Terre (voir la Fig. 1). Ce facteur 2 tient compte du fait que le satellite traverse deux fois la bande au cours d'une révolution autour de la Terre. La longueur de la bande est de $2\pi \cos L$ et la probabilité d'être dans une zone rectangulaire comme celle de la Fig. 2 est:

$$P_h = \frac{b}{\pi} \frac{1}{\cos L} \quad (13)$$

Dans cette équation, la valeur de b est exprimée en radians. C'est la longueur réelle, exprimée en angle géocentrique. Si la différence de longitude est utilisée, on a:

$$b = (\text{Différence de longitude}) \times \cos L \quad (13a)$$

Il y a lieu de noter que la zone utilisée dans les calculs est sur la sphère orbitale du satellite. Pour un faisceau d'antenne circulaire, cette zone est elliptique et son grand axe est dans la direction de l'élévation. La latitude L utilisée dans les calculs n'est pas celle de la station mais celle d'un point de la sphère orbitale, projeté sur la surface de la Terre. Dans ce cas, le point projeté devient le centre de la zone.

Dans un cas courant, lorsque l'inclinaison de l'orbite du satellite est différente de 90° , la probabilité que le satellite se trouve à l'intérieur de la zone définie est celle d'être dans la zone multipliée par la longueur moyenne des trajectoires à l'intérieur de la zone et divisée par la longueur d'une révolution. La probabilité d'être dans la zone dépend de la longueur de la projection du satellite sur une ligne de latitude passant par le milieu de la zone. La projection est effectuée en parallèle avec les traces au sol. Les calculs sont ici présentés pour le cas d'une zone circulaire, qui est plus représentative.

* Les symboles utilisés dans le présent Appendice sont définis dans le § 2 de l'Appendice 2.

Conformément à la Fig. 2, la longueur de l'arc b est:

$$b = \frac{2r_c}{\sin \alpha} \quad (14)$$

$$\alpha = \arccos \frac{\cos i}{\cos L} \quad (15)$$

L'angle α est mesuré entre la trajectoire au sol du satellite et la ligne de latitude.

Il n'est pas nécessaire de tenir compte de la vitesse de rotation de la Terre dans le calcul de probabilité, mais il faut en tenir compte si l'on utilise l'angle réel qui est lié à la Terre en rotation.

La longueur moyenne d'un grand nombre de trajectoires équidistantes passant par un cercle est:

$$l_m = \frac{\pi r_c}{2} \quad (16)$$

Si le satellite est dans la zone au cours d'une révolution donnée, la probabilité qu'il soit à l'intérieur de la zone est donnée par le rapport de la longueur de la trajectoire dans la zone à la longueur d'une révolution:

$$P_i = \frac{l_m}{2\pi} = \frac{r_c}{4} \quad (17)$$

La probabilité totale sera donc:

$$P = P_h P_i = \frac{r_c}{\pi} \frac{1}{\sin \alpha} \frac{1}{\cos L} \frac{r_c}{2} \quad (18)$$

d'où l'on tire:

$$P = \frac{A_c}{2\pi^2} \frac{1}{\sin \alpha} \frac{1}{\cos L} \quad (19a)$$

$$P = \frac{A_c}{2\pi^2} \frac{1}{\sqrt{\sin^2 i - \sin^2 L}} \quad (19b)$$

Une partie de la zone peut se trouver au-dessous de l'horizon, comme dans le cas d'une antenne de faisceau hertzien. Dans ce cas, seule la zone située au-dessus de l'horizon est prise en considération.

La dernière partie de l'équation (19b) peut être considérée comme un facteur de conversion.

$$c = \frac{1}{\sqrt{\sin^2 i - \sin^2 L}} \quad (19c)$$

Les valeurs de ce facteur sont indiquées dans la Fig. 5.

D'autres résultats de calcul ou de simulation peuvent être convertis selon d'autres latitudes et d'autres inclinaisons à la même altitude du satellite, au moyen du facteur de conversion:

$$c_{21} = \frac{\sqrt{\sin^2 i_1 - \sin^2 L_1}}{\sqrt{\sin^2 i_2 - \sin^2 L_2}} = \frac{c_2}{c_1} \quad (19d)$$

Il n'est pas nécessaire de tenir compte de la vitesse de rotation de la Terre dans le calcul de probabilité. Mais si l'on calcule le temps pendant lequel un satellite se trouve dans une zone, il y a lieu d'effectuer la somme vectorielle de la vitesse du satellite et de la vitesse locale de la Terre.

On peut démontrer que le résultat est indépendant de la forme de la zone A qui, dans le cas d'un cercle, est πr^2 . Pour une zone rectangulaire (azimut, élévation), la surface de zone est définie comme suit:

$$A = \beta (\epsilon_2 - \epsilon_1)$$

2 Calcul de la zone

Dans le calcul suivant, la zone qui a été définie par les valeurs d'élévation et d'azimut est projetée sur la sphère orbitale du satellite. Pour le triangle représenté sur la Fig. 3:

$$\frac{\sin(\varepsilon + \pi/2)}{r + h} = \frac{\sin \gamma}{r} \quad (20)$$

$$k = \frac{r}{r + h} \quad (21)$$

$$\theta_\varepsilon = \pi - \gamma(\pi/2 + \varepsilon) = \arccos(k \cos \varepsilon) - \varepsilon \quad (22)$$

L'angle est calculé séparément pour le point le plus élevé de la zone, $\theta_{\varepsilon 2}$, et pour le point le moins élevé de la zone, $\theta_{\varepsilon 1}$. L'angle géocentrique entre ces deux points, correspondant à la «longueur» de la zone, est ainsi:

$$\Delta\theta_\varepsilon = \theta_{\varepsilon 2} - \theta_{\varepsilon 1} \quad (23)$$

A la Fig. 4, la distance entre le point d'observation, O, et la sphère orbitale ne varie que lentement en fonction de l'angle d'azimut et peut donc être considérée comme constante. L'angle géocentrique correspond à la «largeur» de la zone et peut alors être calculé par:

$$\theta_\varepsilon = \frac{\theta_{\varepsilon 1} + \theta_{\varepsilon 2}}{2} \quad (24)$$

$$\Delta\theta_\beta = 2 \arccos \frac{\operatorname{tg}(\beta/2) \sin \theta_\varepsilon}{\cos \varepsilon} \quad (25)$$

Les valeurs $\Delta\theta_\varepsilon$ et $\Delta\theta_\beta$ sont utilisées pour calculer la surface de la zone A. Pour un faisceau circulaire d'antenne, la zone sur la sphère orbitale est ellipsoïdale et:

$$A_c = \frac{\pi}{4} \Delta\theta_\varepsilon \Delta\theta_\beta \quad (26)$$

La latitude du centre de la zone est donnée par la relation suivante:

$$L = \arcsin(\cos \theta_\varepsilon \sin L_0 + \sin \theta_\varepsilon \cos L_0 \cos \Lambda) \quad (27)$$

Il convient de vérifier qu'aucune partie de la zone n'est à une latitude supérieure à l'inclinaison de l'orbite, puisqu'aucun satellite ne passerait par ces parties.

3 Programme de simulation

On a utilisé un programme de simulation pour vérifier les résultats. Ce programme peut simuler un satellite en orbite circulaire ou elliptique vraie, compte tenu également de la dérive du noeud ascendant. Ce programme utilise de faibles intervalles de temps pour calculer la longitude du satellite sur son orbite. Il calcule, pour chaque point, la longitude et la latitude du point subsatellite, qui sont converties en angles d'azimut et d'élévation. La taille des pas est indiquée sous forme d'angle géocentrique. Dans le cas d'une orbite circulaire, un pas quelconque peut être indiqué. Mais pour une orbite elliptique, la valeur minimale est $0,1^\circ$. Le pas utilisé pour la vérification des orbites circulaires était de $0,01^\circ$, ce qui correspond à 0,2 s sur certaines orbites basses. Dans le cas d'intervalles de temps plus courts, le pas a été réduit à 0,02 s.

Les dimensions et les coordonnées d'une zone, qui peut être circulaire ou rectangulaire, peuvent être définies sur une échelle de valeurs d'élévation-azimut. Le programme de simulation crée un journal des entrées et des sorties de la zone, puis calcule la durée totale passée à l'intérieur de la zone. Les valeurs appropriées du pas et du nombre de trajectoires à l'intérieur de la zone peuvent être calculées d'après le graphique.

FIGURE 1
Trajectoires d'un satellite en orbite polaire
(calcul pour une zone rectangulaire)

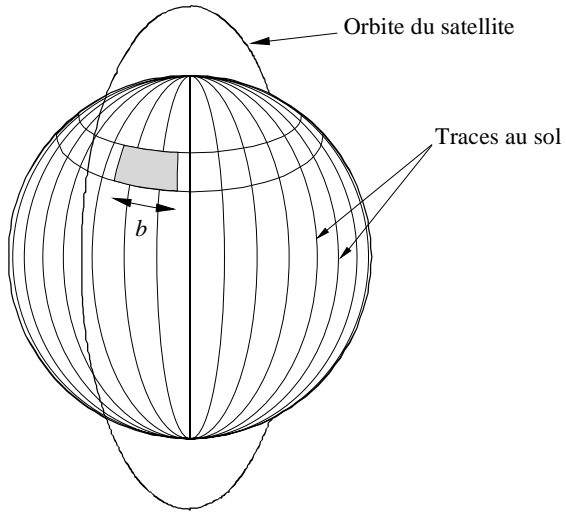


FIGURE 2
Longueur b d'une projection de zone circulaire
sur la ligne de latitude

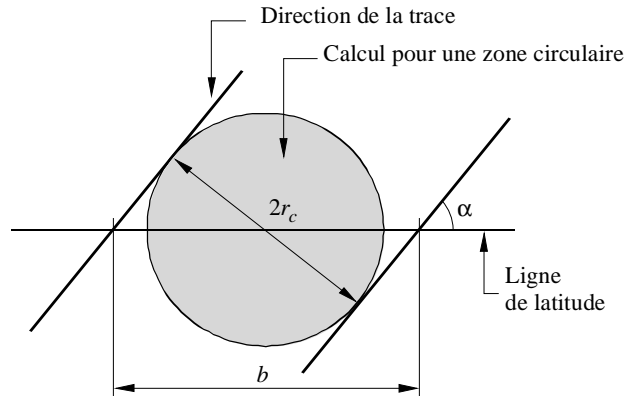


FIGURE 3
Angles en direction de l'élévation

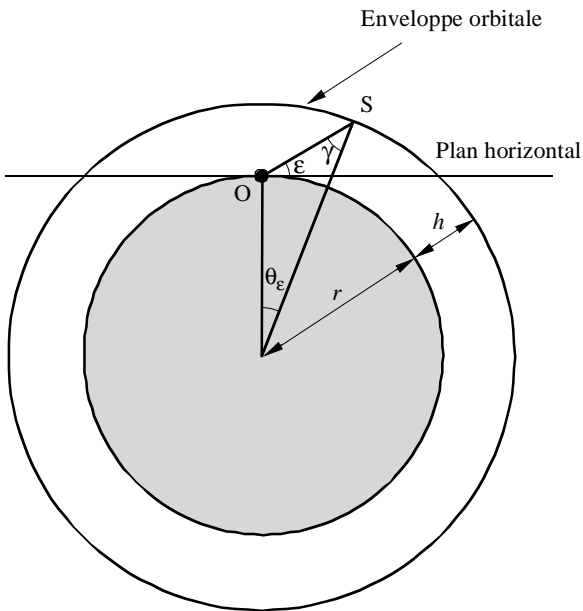
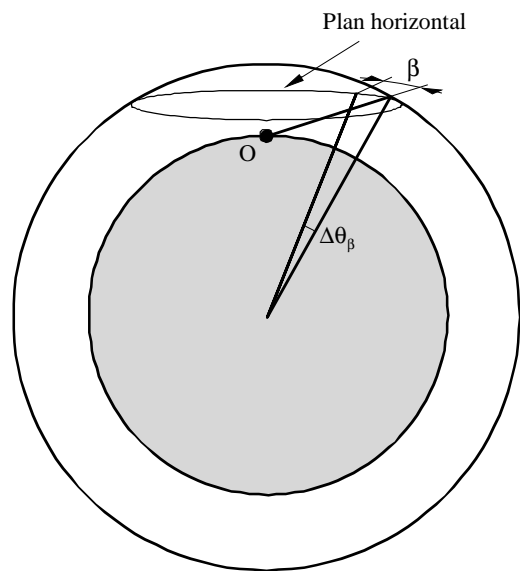


FIGURE 4
Angles pour le déplacement azimuthal du satellite



O: point d'observation
S: satellite

4 Vérification des formules

Aux fins de la vérification, on a arrêté la rotation de la Terre au cours du programme de simulation et la dérive du nœud ascendant a été fixée à une valeur artificielle de $0,06^\circ$ /révolution ou moins, de sorte qu'il y ait au moins 20 trajectoires dans la zone. Le pas était de $0,01^\circ$. Pour le Tableau 1, ces valeurs correspondent à une simulation de 450 jours et de 216 000 000 positions du satellite, environ.

Le Tableau 1 compare les valeurs calculées et simulées pour deux latitudes et plusieurs angles d'élévation et d'azimut d'antenne de station terrienne du SFS, toujours en direction de l'OSG. L'ouverture du faisceau de la station terrienne est de 2° . La constellation comprend 48 satellites, l'altitude orbitale est de 1 406,8 km et l'inclinaison est de 52° .

TABLEAU 1

Latitude de la station terrienne du SFS (degrés)	Angle d'élévation de l'antenne de la station terrienne (degrés)	Angle d'azimut de l'antenne de la station terrienne (degrés)	Probabilité pour toute la constellation (%)	
			Simulation	Calcul
50	2,0	103,0	0,219	0,219
50	19,9	129,4	0,087	0,089
50	32,6	176,7	0,049	0,049
50	21,4	227,6	0,082	0,082
50	2,0	257,0	0,219	0,219
10	3,6	92,2	0,143	0,143
10	24,5	96,4	0,0479	0,0480
10	67,0	119,6	0,0115	0,0118
10	63,9	244,5	0,0123	0,0125
10	26,6	263,1	0,0433	0,0434
10	2,0	268,1	0,155	0,155

Dans le Tableau 2, les valeurs sont présentées pour les cas où la méthode de calcul serait moins précise en raison de la basse altitude du satellite ou en raison de la latitude de la station et d'angles d'azimut plus difficiles. L'orbite du satellite est circulaire, son altitude de 780 km, son inclinaison de 86° et la constellation comprend 66 satellites. La zone est circulaire et son diamètre est de 2° .

TABLEAU 2

Latitude de la station (degrés)	Angle d'élévation de l'antenne (degrés)	Azimut de l'antenne (degrés)	Probabilité pour toute la constellation (%)	
			Simulation	Calcul
50	1	65,5	0,277	0,277
60	1	45	0,381	0,385
60	1	10	1,683	1,674
60	41	10	0,0267	0,0267

Dans le Tableau 3, on a utilisé le même satellite que dans le Tableau 2 pour montrer la précision du calcul en fonction de l'augmentation du diamètre de la zone circulaire. La latitude de la station et son angle d'élévation et son azimut sont choisis de telle façon que la latitude projetée du centre de la zone à l'enveloppe orbitale soit d'environ 60° et le mouvement du satellite est presque parallèle au grand axe de l'ellipse formé par l'intersection de la zone circulaire avec l'enveloppe orbitale.

TABLEAU 3

Latitude de la station terrienne (degrés)	Angle d'élévation de l'antenne (degrés)	Azimut de l'antenne (degrés)	Diamètre de la zone (degrés)	Probabilité pour toute la constellation (%)	
				Simulation	Calcul
40	5	10	2	0,217	0,219
40	5	10	10	5,660	5,658
40	10	10	20	15,236	15,555

Les calculs et les simulations ci-après ont été effectués afin de contrôler l'allure de la variation du pourcentage de temps si la station terrienne se trouve à une latitude de 65° et que son azimut soit proche de la latitude la plus élevée de l'orbite du satellite. Celui-ci se trouvait à une altitude de 1 406,85 km, à une inclinaison de 52° . La zone définie était circulaire, d'un diamètre de 2° et à un angle d'élévation de 1° .

TABLEAU 4

Latitude de la station (degrés)	Azimut (degrés)	Latitude de la zone (degrés)	Probabilité pour toute la constellation (1 000%)	
			Simulation	Calcul
0	90	0	3,36	3,36
65	180	31	4,43	4,43
65	83	51,27	29,58	23,7
65	86	50,15	15,18	14,90
65	90	48,7	11,2	11,1

On peut en conclure que les formules offrent une précision suffisante si les latitudes de la zone sont inférieures de quelques degrés au moins à l'inclinaison de l'orbite. En pratique, cela signifie que la pente des courbes représentées sur la Fig. 5 ne devrait pas changer beaucoup à l'intérieur de la zone.

On peut également en conclure que la probabilité augmente en même temps que la latitude du point subsatellite. Dans un cas particulier du Tableau 4, la probabilité a été 8,8 fois plus grande qu'à l'équateur.

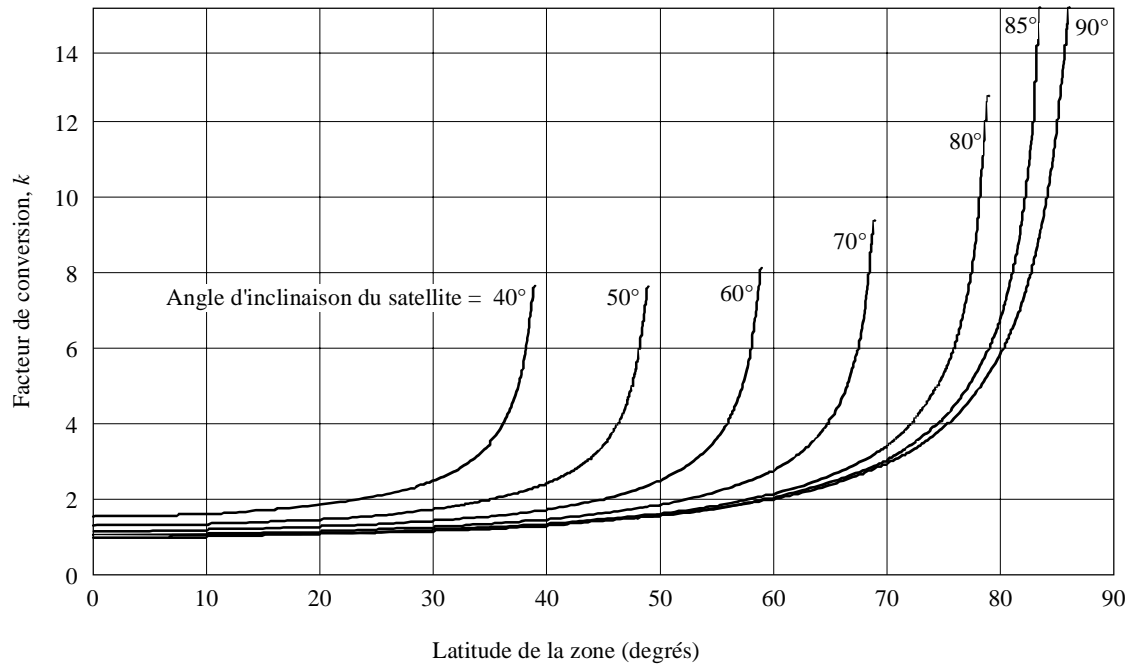
Les Fig. 7a et 7b donnent des exemples de statistiques pour les satellites LEO-F. Ces valeurs résultent de simulations et montrent la relation entre la probabilité et les coordonnées d'azimut et d'élévation de l'antenne.

5 Visibilité et azimut dans le cas le plus défavorable

Les Fig. 6a) et 6b) résultent de simulations informatiques. Elles montrent les positions du satellite au cours d'intervalles de temps simulés. On y voit également les zones dans lesquelles les satellites ne sont plus visibles. Dans ces zones, l'équation (19a) n'est pas applicable et la probabilité est nulle. Les mêmes zones se retrouvent dans les Fig. 7a et 7b, qui présentent les résultats d'une simulation informatique d'un satellite LEO-F dans un cas particulier.

FIGURE 5

Facteurs de conversion pour différentes latitudes de zone et différentes inclinaisons de satellite



$$c = \frac{1}{\sqrt{\sin^2 i - \sin^2 L}} \quad \text{(Equation (19c))}$$

1257-05

D'après les équations, on peut conclure que, à un angle d'élévation donné et si:

- a) $i < |L_0| - \theta_\varepsilon$ un satellite ne sera visible à aucun azimut;
- b) $i \geq |L_0| + \theta_\varepsilon$ un satellite sera visible à tous les azimuts;
- c) $|L_0| - \theta_\varepsilon \leq i < |L_0| + \theta_\varepsilon$ un satellite sera visible à certains azimuts mais pas à tous.

Dans le cas a), la probabilité P est nulle à tous les azimuts et l'équation (19a) n'est pas applicable. Dans le cas b), la probabilité P est la plus élevée à un azimut de 0° ou de 180° , selon qu'il s'agit de l'hémisphère nord ou sud. Dans le cas c), la probabilité la plus élevée apparaît au point où la latitude du point subsatellite $L = \pm i$, cette probabilité ne dépend pas de la latitude de la station.

Les azimuts où la probabilité est la plus élevée sont appelés azimuts dans le cas le plus défavorable.

Si la zone a des dimensions nulles, les azimuts dans le cas le plus défavorable sont alors les suivants:

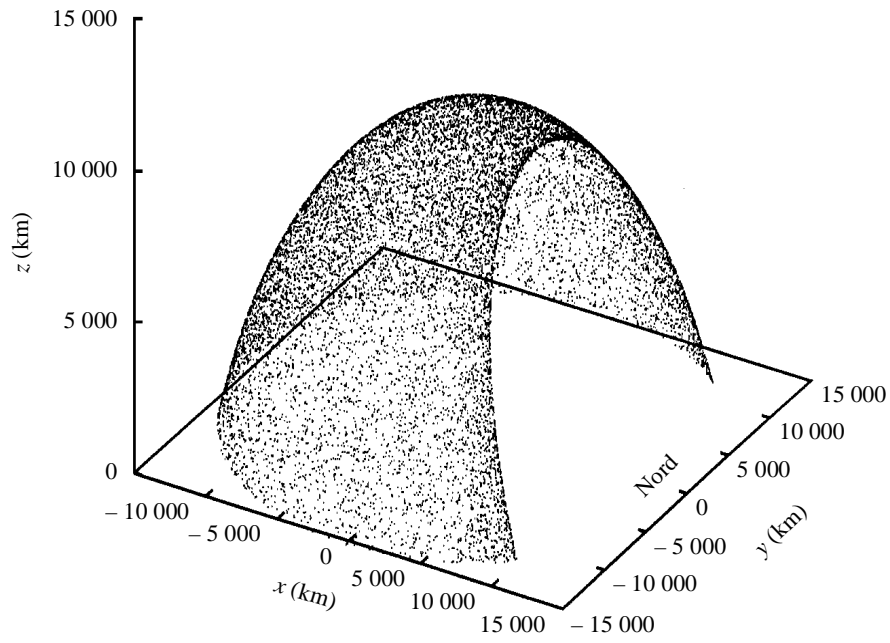
$$\Lambda_1 = \arccos \frac{\sin i - \cos \theta_\varepsilon \sin L_0}{\sin \theta_\varepsilon \cos L_0} \quad (28a)$$

$$\Lambda_2 = 2\pi - \Lambda_1 \quad (28b)$$

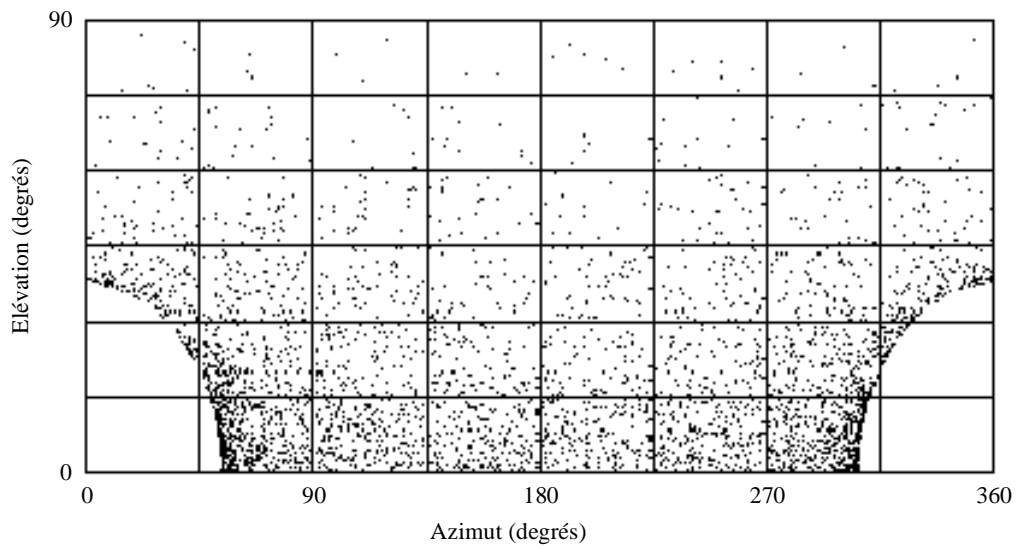
$$\Lambda_3 = \arccos \frac{-\sin i - \cos \theta_\varepsilon \sin L_0}{\sin \theta_\varepsilon \cos L_0} \quad (29a)$$

$$\Lambda_4 = 2\pi - \Lambda_3 \quad (29b)$$

FIGURE 6
 Deux couvertures typiques de ciel pour satellites non OSG

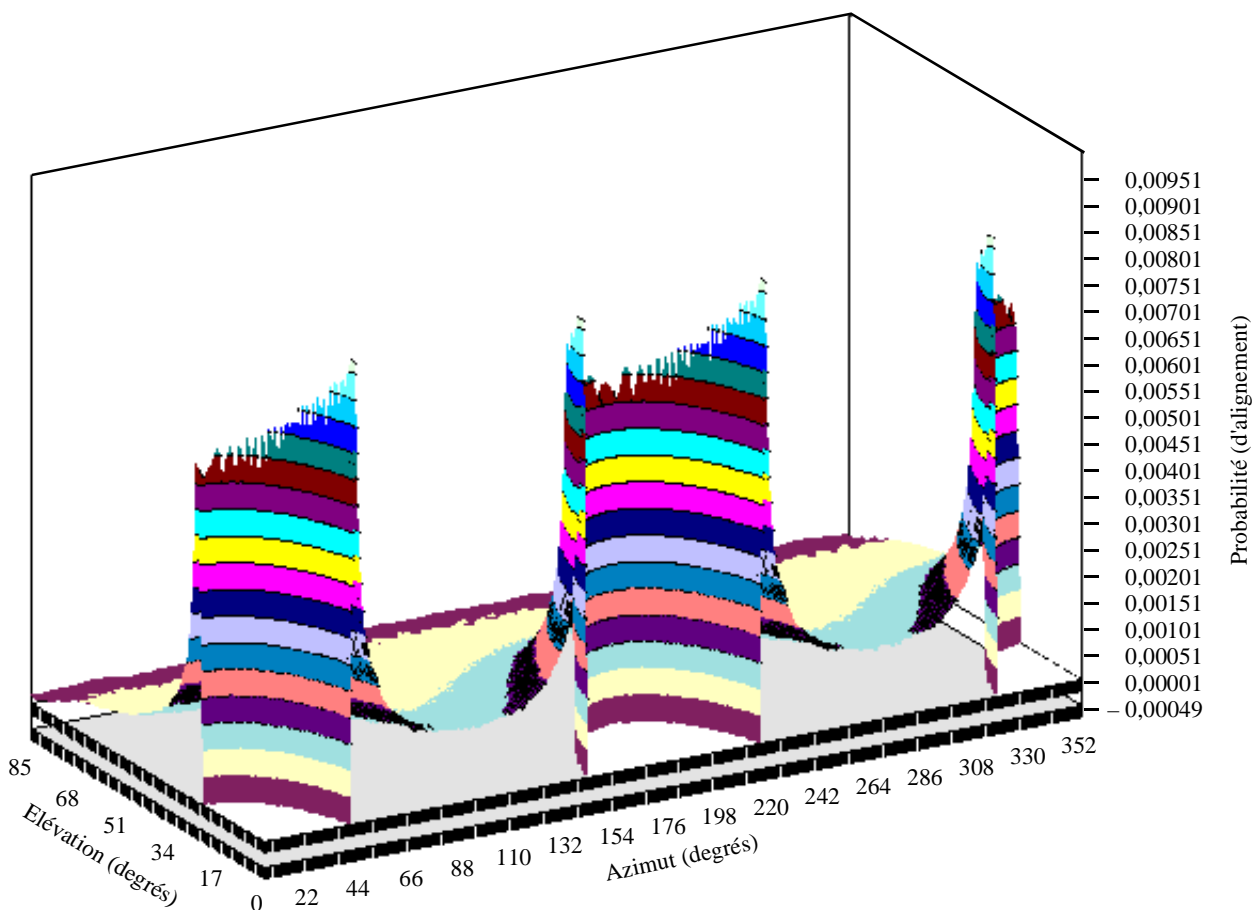


a)



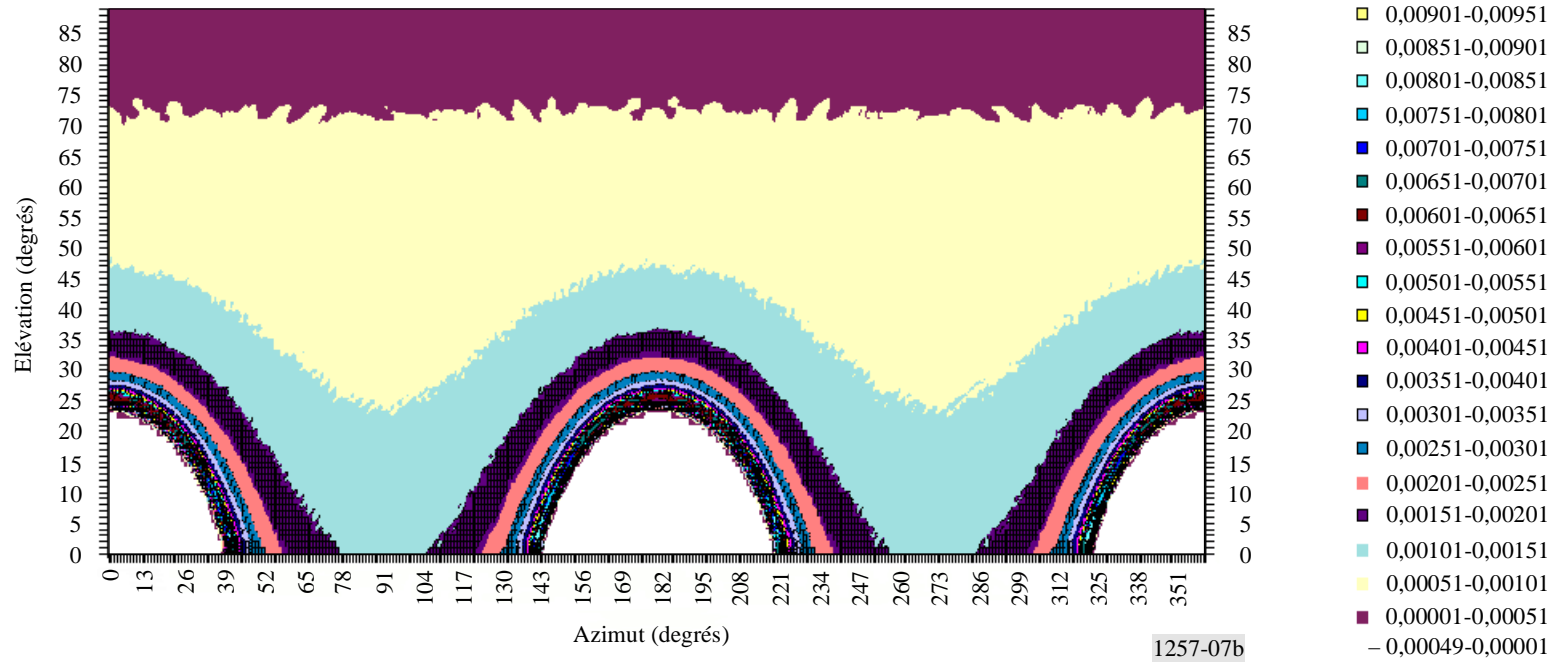
b)

FIGURE 7a
 Statistiques en cas d'alignement pour différentes directions de pointage:
 cas LEO-F, $L_0 = 0^\circ$, ouverture de faisceau = 3°



■ 0,00901-0,00951	■ 0,00401-0,00451
■ 0,00851-0,00901	■ 0,00351-0,00401
■ 0,00801-0,00851	■ 0,00301-0,00351
■ 0,00751-0,00801	■ 0,00251-0,00301
■ 0,00701-0,00751	■ 0,00201-0,00251
■ 0,00651-0,00701	■ 0,00151-0,00201
■ 0,00601-0,00651	■ 0,00101-0,00151
■ 0,00551-0,00601	■ 0,00051-0,00101
■ 0,00501-0,00551	■ 0,00001-0,00051
■ 0,00451-0,00501	■ -0,00049-0,00001

FIGURE 7b
 Vue topographique des statistiques en cas d'alignement pour différentes directions de pointage:
 cas LEO-F, $L_0 = 0^\circ$, ouverture de faisceau = 3°



D'après les équations (28) et (29), les azimuts sont symétriques par rapport au nord ($\Lambda = 0^\circ$) et au sud ($\Lambda = 180^\circ$). Ils ne dépendent que des paramètres L_0 , ε , h et i .

Ces azimuts dans le cas le plus défavorable existent à condition que la fonction arc cos x existe. Celle-ci existe si l'argument $|x| \leq 1$ est vérifié. Les azimuts existent donc si:

pour l'équation (28a):

$$\begin{aligned} \sin i &\leq \sin (L_0 + \theta_\varepsilon) && \text{et} \\ \sin i &\geq \sin (L_0 - \theta_\varepsilon) \end{aligned} \quad (30a)$$

pour l'équation (29a):

$$\begin{aligned} -\sin i &\leq \sin (L_0 + \theta_\varepsilon) && \text{et} \\ -\sin i &\geq \sin (L_0 - \theta_\varepsilon) \end{aligned} \quad (30b)$$

Si, pour un angle d'élévation donné ε , la condition de l'équation (30a) n'est pas vérifiée, les équations (28) ne sont pas applicables et ne donnent aucun azimut dans le cas le plus défavorable. Il en va de même pour les équations (30b) et (29). L'équation (28) ou (29) peut s'appliquer indépendamment. Si, dans l'équation (30a) ou (30b), l'inégalité est vérifiée, l'équation (28) ou l'équation (29), selon le cas, donnera deux maximums. Si l'égalité est vérifiée, l'équation correspondante donnera un seul maximum. Même si une des équations, (28) ou (29), n'est pas applicable, il pourra y avoir un maximum inférieur à un azimut de 0° ou de 180° .

Il convient de noter que les équations (28) ne donnent des azimuts exacts dans le cas le plus défavorable que pour une zone concernée de dimensions nulles. En pratique (comme pour un faisceau d'antenne de station terrienne à satellite) la valeur exacte de l'azimut dans le cas le plus défavorable dépendra, par exemple, de l'ouverture du faisceau émis par l'antenne de la station de Terre. Mais les équations donnent une estimation qui normalement ne s'écarte pas de plus d'environ la moitié de l'ouverture de faisceau par rapport à l'azimut, dans le cas réel le plus défavorable. Aucune relation exacte n'a été présentée entre l'ouverture du faisceau et l'azimut dans le cas le plus défavorable. Par ailleurs, les niveaux maximaux peuvent, en pratique, avoir des amplitudes différentes selon l'ouverture du faisceau.

6 Conclusion

On peut déduire des Tableaux précédents que la méthode de calcul ici exposée donne des résultats qui sont assez précis pour la plupart des cas pratiques. Même si cela n'a pas été contrôlé ici, on peut s'attendre que cette méthode soit imprécise au voisinage des latitudes les plus hautes et les plus basses d'une orbite satellitaire. Cela vient surtout du fait que certaines parties de la zone peuvent se trouver hors de la visibilité du satellite.
