

## RECOMMANDATION UIT-R SF.765\*

**INTERSECTION DES LOBES DES ANTENNES DE FAISCEAUX HERTZIENS AVEC  
LES ORBITES DES STATIONS SPATIALES DU SERVICE FIXE PAR SATELLITE**

(1992)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

*considérant*

- a) que la Recommandation UIT-R SF.406 spécifie la p.i.r.e. maximale des émetteurs de faisceaux hertziens en visibilité directe fonctionnant dans les bandes de fréquences utilisées en partage avec le service fixe par satellite (Terre-espace);
- b) que, pour vérifier que les stations hertziennes fonctionnant en dessous de 15 GHz sont conformes aux dispositions de la Recommandation UIT-R SF.406, il faut calculer l'angle entre la direction du faisceau de l'antenne de la station hertzienne et la direction vers l'orbite des satellites géostationnaires;
- c) qu'il faut tenir compte de l'effet de la réfraction atmosphérique dans ce calcul,

*recommande*

1. de prendre en compte les données contenues dans l'Annexe 1 lors de la planification des faisceaux hertziens;
2. d'utiliser la méthode décrite dans l'Annexe 2 pour calculer l'angle entre la direction du faisceau de l'antenne de la station hertzienne et l'orbite des satellites géostationnaires.

*Note 1* – Par souci de protection, il faut éviter de pointer les antennes des récepteurs très sensibles de stations hertziennes fonctionnant dans les bandes de fréquences comprises entre 1 et 15 GHz utilisées en partage avec les services de radiocommunications spatiales (espace-Terre) en direction de l'orbite des satellites géostationnaires (voir la Note 2 de la Recommandation UIT-R SF.406). A cette fin, on peut aussi utiliser la méthode décrite dans la présente Recommandation.

## ANNEXE 1\*\*

**Intersections des lobes des antennes de faisceaux hertziens avec les orbites  
des stations spatiales du service fixe par satellite: considérations générales****1. Introduction**

L'exposition des lobes des antennes de faisceaux hertziens au rayonnement des satellites de télécommunication peut être estimée par des méthodes géométriques lorsque ces satellites sont sur des orbites circulaires dont les projections sur la surface de la Terre sont récurrentes mais elle ne peut être prévue statistiquement que lorsque les orbites sont circulaires et inclinées et ont des périodes arbitraires. On peut faire en sorte qu'un système à satellites en phase, avec projections récurrentes, ait une projection unique sur la surface de la Terre; ces systèmes présentent de plus en plus d'intérêt pour les radiocommunications. Les satellites géostationnaires constituent un cas particulier, car l'équateur représente la projection de toutes les orbites équatoriales.

---

\* Les Commissions d'études 4 et 9 des radiocommunications ont apporté des modifications rédactionnelles à cette Recommandation en 2000 conformément aux dispositions de la Résolution UIT-R 44.

\*\* *Note du Directeur du CCIR* – Il est précisé, à titre d'information, que le mode d'obtention des formules de même que les antécédents historiques de la présente Annexe peuvent être trouvés dans les références bibliographiques figurant dans le Rapport 393 du CCIR (Düsseldorf, 1990).

En tout point situé à la surface de la Terre, d'où l'on peut voir les satellites d'un système à projection unique sur la surface de la Terre, les satellites successifs (non stationnaires) suivent un arc fixe qui traverse la voûte céleste d'un horizon à l'autre. De plus, sauf dans le cas des orbites inclinées, cet arc ne dépend pas de la longitude et est symétrique par rapport à la direction nord-sud.

Dans les paragraphes suivants de la présente Annexe, on examine les conditions d'exposition à une orbite équatoriale circulaire (y compris le cas particulier des orbites de satellites géostationnaires) ainsi que la probabilité d'exposition à des satellites non en phase (projection non récurrente sur la surface de la Terre).

Plusieurs administrations ont fourni des renseignements sur la mesure dans laquelle les antennes de faisceaux hertziens existants sont orientées vers l'orbite d'un satellite géostationnaire. Ces renseignements indiquent que, si le pourcentage total des faisceaux d'antennes qui coupent cette orbite est d'environ 2%, il sera beaucoup plus élevé si l'on tient compte, d'une part, des faisceaux s'étendant à  $\pm 2^\circ$  de leur axe et, d'autre part, de l'effet de la réfraction. En examinant les stations de faisceaux hertziens par rapport aux dispositions de la Recommandation UIT-R SF.406, on constate que la proportion de stations dont le faisceau d'antenne est orienté à  $\pm 2^\circ$  de l'orbite des satellites géostationnaires est, dans certains pays, de l'ordre de 10%. En outre, on n'a pas le droit de supposer que des parties importantes de l'orbite d'un satellite géostationnaire (quelle que soit leur longitude) échappent au rayonnement des antennes de faisceaux hertziens.

## 2. Quelques caractéristiques des faisceaux des antennes de faisceaux hertziens de Terre

Les systèmes de faisceaux hertziens en visibilité directe utilisent des antennes ayant un gain de l'ordre de 40 dB et des lobes dont l'ouverture angulaire à mi-puissance est de l'ordre de  $2^\circ$ . Les systèmes transhorizon utilisent généralement des antennes à gain plus élevé et des lobes à ouverture angulaire plus petite (par exemple, 50 dB et  $0,5^\circ$ ). Dans les deux cas, le trajet a une inclinaison inférieure à  $0,5^\circ$  en moyenne; elle dépasse rarement  $5^\circ$ . Lorsque la totalité d'un lobe à inclinaison négative frappe la surface de la Terre, il n'est pas exposé à une orbite. Pour les lobes dont l'axe est orienté vers l'horizon, seule leur moitié supérieure risque d'être exposée à une orbite.

Lorsqu'on utilise des réflecteurs passifs, il convient de tenir compte également de la diffraction.

Etant donné que les lobes de rayonnement passent au voisinage de la surface terrestre et traversent une couche assez épaisse de l'atmosphère, il faut, si l'on veut calculer exactement l'exposition, tenir compte de la diffraction et de la réfraction.

## 3. Directions par rapport aux orbites équatoriales circulaires

On sait que, d'après des considérations d'ordre géométrique, l'azimut  $A$  (mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre à partir du nord) et l'angle de site  $e$  d'un satellite placé sur une orbite équatoriale circulaire peuvent s'exprimer par:

$$A = \arctan(\pm \operatorname{tg} \lambda / \sin \varphi) \quad (1)$$

$$e = \arcsin \left[ (K \cos \varphi \cos \lambda - 1) / \sqrt{K^2 + 1 - 2K \cos \varphi \cos \lambda} \right] \quad (2)$$

où:

$K$ : rapport rayon de l'orbite/rayon terrestre

$\varphi$ : latitude de la station de Terre

$\lambda$ : différence de longitude entre la station de Terre et le satellite.

Si l'on élimine  $\lambda$  entre ces deux équations, on obtient:

$$A = \arccos \left\{ \left[ \frac{\operatorname{tg} e + K^{-1} \sqrt{\operatorname{tg}^2 e + (1 - K^{-2})}}{1 - K^{-2}} \right] \operatorname{tg} \varphi \right\} \quad (3)$$

En généralisant cette analyse, on peut, si besoin est, déterminer les azimuts et les angles de site pour n'importe quel système à orbite inclinée ayant une seule projection sur la surface de la Terre et dont les satellites évoluent à une altitude donnée; on peut aussi déterminer l'inclinaison et les points d'intersection avec l'équateur. Cependant, les directions de l'orbite, pour ces systèmes, dépendent à la fois de la latitude et de la longitude de la station de Terre.

Une antenne orientée vers une orbite équatoriale circulaire de satellite non géostationnaire (ou vers une autre orbite à une seule projection sur la surface de la Terre) subira certainement une exposition intermittente. Pour  $m$  satellites gravitant sur une orbite équatoriale circulaire (non géostationnaire), les antennes ayant une largeur de lobe de brouillage de  $\theta$  radians subiront le brouillage pendant une fraction de temps dont l'expression approchée est:

$$P = m \theta / (2\pi) \quad (4)$$

Dans le cas particulier de l'orbite des satellites géostationnaires,  $P$  sera égal soit à zéro soit à l'unité.

#### 4. Systèmes à satellites non en phase

Dans ce cas, on ne peut établir qu'une probabilité moyenne d'exposition au rayonnement d'un satellite. Ainsi, pour un système à  $n$  orbites, toutes de même hauteur et de même angle d'inclinaison  $i$ , la probabilité moyenne d'exposition peut s'exprimer par:

$$P = [m n \theta / (8\pi \cos \psi)] \{ \arccos [(\sin(\psi - \theta/2)) / \sin i] - \arccos [(\sin(\psi + \theta/2)) / \sin i] \} \quad (5)$$

lorsque  $\psi \leq (i - \theta/2)$ ,

et où:

$m$  : nombre de satellites sur chaque orbite

$\psi$  : latitude du point d'intersection du lobe de l'antenne et de la sphère orbitale.

On peut, dans la plupart des cas de la pratique où  $i > \theta$ , effectuer le calcul au moyen de l'équation:

$$P = \frac{m n \theta^2}{8\pi \sqrt{\sin^2 i - \sin^2 \psi}} \quad (6)$$

L'utilisation de cette équation (6) à la place de l'équation (5) donne lieu à une erreur relative qui ne dépasse pas 0,25%.

Dans le cas particulier de l'orbite polaire,  $i = \pi/2$  et l'expression ci-dessus se réduit à:

$$P = m n \theta^2 / (8\pi \cos \psi) \quad (7)$$

#### 5. Relations géométriques entre les orientations des antennes de faisceaux hertziens et l'orbite d'un satellite géostationnaire

Le cas de l'orbite d'un satellite géostationnaire est particulièrement important non seulement en ce qui concerne l'exposition des faisceaux hertziens au rayonnement des satellites, mais également en raison des restrictions apportées par la Recommandation UIT-R SF.406 en fonction de la direction des antennes de faisceaux hertziens pour protéger la réception dans les satellites géostationnaires.

L'équation (3) peut s'écrire:

$$A = \arccos \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} [\arccos (K^{-1} \cos e) - e]} \quad (8)$$

où:

$A$  : azimut (ou complément à 360°) compté à partir du sud dans l'hémisphère nord et à partir du nord dans l'hémisphère sud

$K$  : rayon de l'orbite/rayon terrestre, 6,63 par hypothèse

$e$  : angle géométrique de site d'un point situé sur l'orbite des satellites géostationnaires

$\varphi$  : latitude de la station de Terre.

Pour une latitude de station et un angle de site donnés, les valeurs de l'angle  $A$  pour les deux points de l'orbite sont mesurées de part et d'autre du méridien.

## 5.1 Effet de la réfraction atmosphérique

La réfraction atmosphérique a généralement pour effet de courber le rayon radioélectrique vers la Terre; le rayonnement d'une antenne de faisceau hertzien d'angle de site  $\varepsilon$  peut atteindre un satellite d'angle de site  $e$  où:

$$e = \varepsilon - \tau \quad (9)$$

$e$  et  $\varepsilon$  étant les valeurs algébriques et  $\tau$  la valeur absolue de la correction due à la réfraction.

L'importance de la courbure est fonction du climat de la région où se trouve la station (indice de réfraction, gradient de l'indice, etc.), de l'altitude de cette station et de l'angle de site initial  $\varepsilon$ ; la variation de  $\tau$  en fonction de  $\varepsilon$  est particulièrement rapide pour les faibles valeurs négatives de  $e$ .

La valeur de  $\tau$  peut dépasser plusieurs dixièmes de degré, ce qui est particulièrement important pour les stations de latitude moyenne ou élevée, pour lesquelles une faible modification de l'angle de site se traduit par une modification importante de l'azimut de chacun des deux points correspondants sur l'orbite du satellite géostationnaire. De plus, cette correction est variable au cours du temps avec les conditions atmosphériques. En un point de latitude donné – pour un angle de site donné – l'azimut pointé sur l'orbite balaie, au cours du temps, une certaine zone angulaire.

Pour appliquer la Recommandation UIT-R SF.406 tandis qu'une valeur moyenne de la réfraction procure une protection importante, pour obtenir une protection totale, il est souhaitable de considérer les valeurs maximale et minimale de la courbure due à la réfraction de façon à déterminer les azimuts des extrémités de cette zone angulaire; ceci peut se faire sur une base statistique. L'équation (8) peut être utilisée pour déterminer les azimuts extrêmes de la zone angulaire balayée à partir des angles de site extrêmes  $e_1$  et  $e_2$ .

La détermination de la courbure  $\tau$  en fonction du climat, de l'altitude de la station et de l'angle de site  $\varepsilon$  est malaisée, car l'hypothèse d'une atmosphère de référence de type exponentiel n'est pas toujours admissible et la probabilité de formation de conduits atmosphériques est loin d'être négligeable, surtout dans certaines zones maritimes chaudes.

Dans le cas où l'hypothèse d'une atmosphère de type exponentiel est admissible et où l'indice au sol  $N$ , et le gradient  $\Delta N$  de l'indice entre 0 et 1 000 m sont liés, des courbes donnant la correction  $\tau$  en fonction de l'angle de site  $\varepsilon$  peuvent être calculées. La détermination des corrections maximale et minimale  $\tau_1$  et  $\tau_2$  se ramène alors à l'estimation des valeurs maximale et minimale de  $N$  (ou de  $\Delta N$ ) correspondant au cas particulier étudié.

L'influence de l'altitude de la station est très difficile à estimer. Pour les angles de site positifs, le rayon radioélectrique sort rapidement de l'atmosphère, la courbure  $\tau$  est relativement faible et l'influence de l'altitude est probablement réduite. Par contre, pour les angles de site négatifs, un rayon franchissant l'horizon traverse deux fois les couches les plus denses de l'atmosphère; de ce fait, la courbure  $\tau$  est grande et sa variation en fonction de l'altitude, à angle de site constant, est vraisemblablement plus importante; cependant, on manque de données précises à ce sujet.

Provisoirement, et en vue de protéger l'orbite dans tous les cas, on adoptera les règles suivantes:

**5.1.1** dans les zones géographiques où on dispose de données sur la propagation permettant de déterminer la courbure sur une base statistique, la valeur maximale de la courbure, définie comme la valeur non dépassée pendant, par exemple, 99,5% du temps, ainsi que sa valeur minimale devraient être déduites de ces données;

**5.1.2** dans les cas où on ne dispose pas de telles données, on peut utiliser l'approximation suivante. Si l'on suppose une atmosphère de référence exponentielle, on peut calculer les limites de l'indice de réfraction au moyen de la réfraction radioélectrique au niveau de la mer  $N_0$  et du gradient  $\Delta N$  (pris dans les cartes mondiales). Une gamme de valeurs de  $N_0$  comprises entre 250 et 400 ( $\Delta N$  au niveau de la mer compris entre  $-30$  et  $-68$  respectivement) est représentative des valeurs minimale et maximale pour une grande partie du globe et pour toute l'année. Une fois ces limites établies, on peut calculer les courbes de  $\tau_1$  et  $\tau_2$  en fonction de l'angle de site de l'antenne et de l'altitude de la station.

On procède à l'intégration suivante pour calculer la correction de réfraction  $\tau$ :

$$\tau = - \int_{n_1}^{n_2} [\cotg \varepsilon / n(r)] dn \quad (10)$$

Cette intégration s'effectue selon les conditions de la loi de Snell pour des coordonnées polaires, à savoir:

$$n(r) \cdot r \cdot \cos \varepsilon = n(r_1) \cdot r_1 \cdot \cos \varepsilon_1 \quad (11)$$

où:

$$n(r) = 1 + a \cdot \exp [-b(r - r_0)]$$

$r_0$  : rayon de la Terre (6 370 km)

$r_1 = r_0 + h$  ( $h$ : altitude de la station)

$\varepsilon_1$  : angle de site au niveau de la station

$n_1$  : indice de réfraction à l'altitude de la station

$n_2$  : indice de réfraction au niveau de l'orbite

$$a = N_0 \times 10^{-6}$$

$$b = \ln [N_0 / (N_0 + \Delta N)]$$

$N_0 = 400$  et  $\Delta N = -68$  pour une courbure maximale

$N_0 = 250$  et  $\Delta N = -30$  pour une courbure minimale.

L'intégration a été faite et les résultats des calculs sont présentés à la Fig. 1.

Des formules numériques, donnant une bonne approximation de cette fonction, sont reproduites dans la Note 1 du § 4 de l'Annexe 2 à la présente Recommandation.

## 5.2 Utilisation d'une méthode graphique pour déterminer les azimuts à éviter

Pour déterminer les azimuts à éviter, on peut utiliser une méthode graphique qui tient compte de l'influence de l'horizon local réel. Les approximations qui y ont été utilisées limitent son application aux stations situées au-dessous de 70° de latitude environ. Sa précision en azimut est d'environ 0,1° et est meilleure pour les angles de site faibles.

La méthode (Fig. 2) repose sur la considération de l'orbite apparente d'un satellite géostationnaire, compte tenu de l'effet de la réfraction, de la latitude de la station de Terre, de l'angle de site de son antenne et de l'influence de l'horizon optique (réel) local.

Pour tracer l'orbite apparente (tenant compte de l'effet de réfraction), il faut relever la trace de l'orbite géométrique, en chacun de ses points, d'une certaine quantité  $\tau$  qui est fonction de l'altitude de l'orbite et de la hauteur de la station.

Pour ce faire, on peut tracer le point dont l'altitude est  $\varepsilon$  et l'azimut  $C(\varepsilon - \tau(\varepsilon))$  où  $C(\ )$  est donné par l'équation (14) de l'Annexe 2 et  $\tau(\ )$  est  $\tau_{max}(\ )$  ou  $\tau_{min}(\ )$  donné dans la Note 1 de l'Annexe 2.

La méthode peut se résumer comme suit:

**5.2.1** Sur la Fig. 2, tracer une droite passant par l'origine et par le point correspondant à la latitude de la station considérée (ceci implique que l'orbite peut, en première approximation, être assimilée à une droite dans ce petit intervalle). L'azimut de référence (0° sur la Fig. 2) pour un angle de site de valeur zéro est donné par l'équation (8).

**5.2.2** Tracer une droite horizontale correspondant à l'angle de site  $\varepsilon$  prévu pour l'antenne.

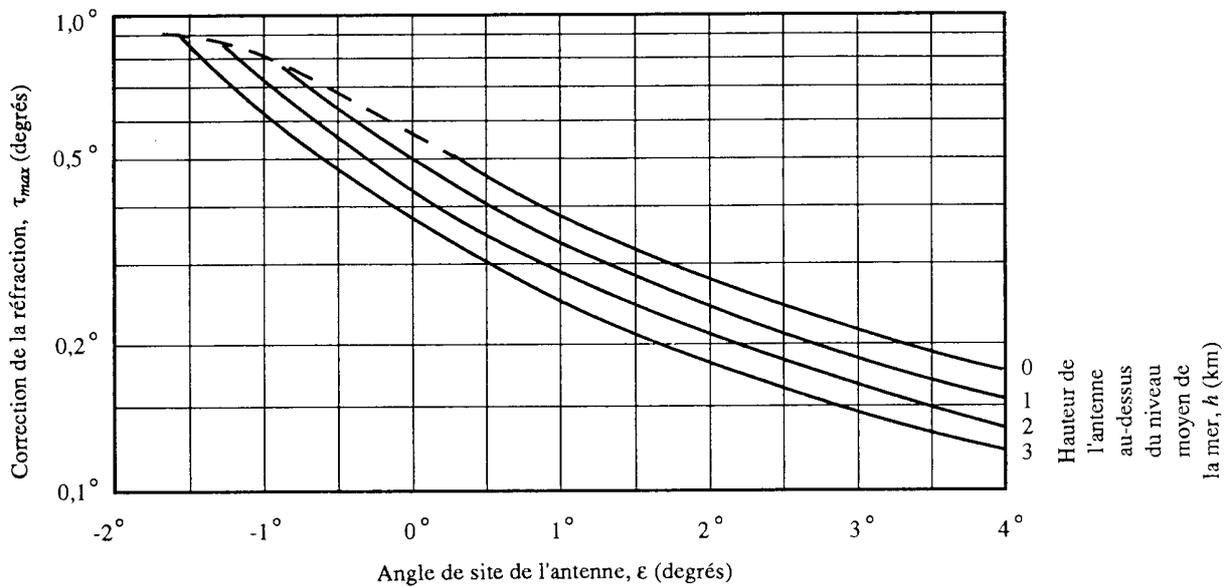
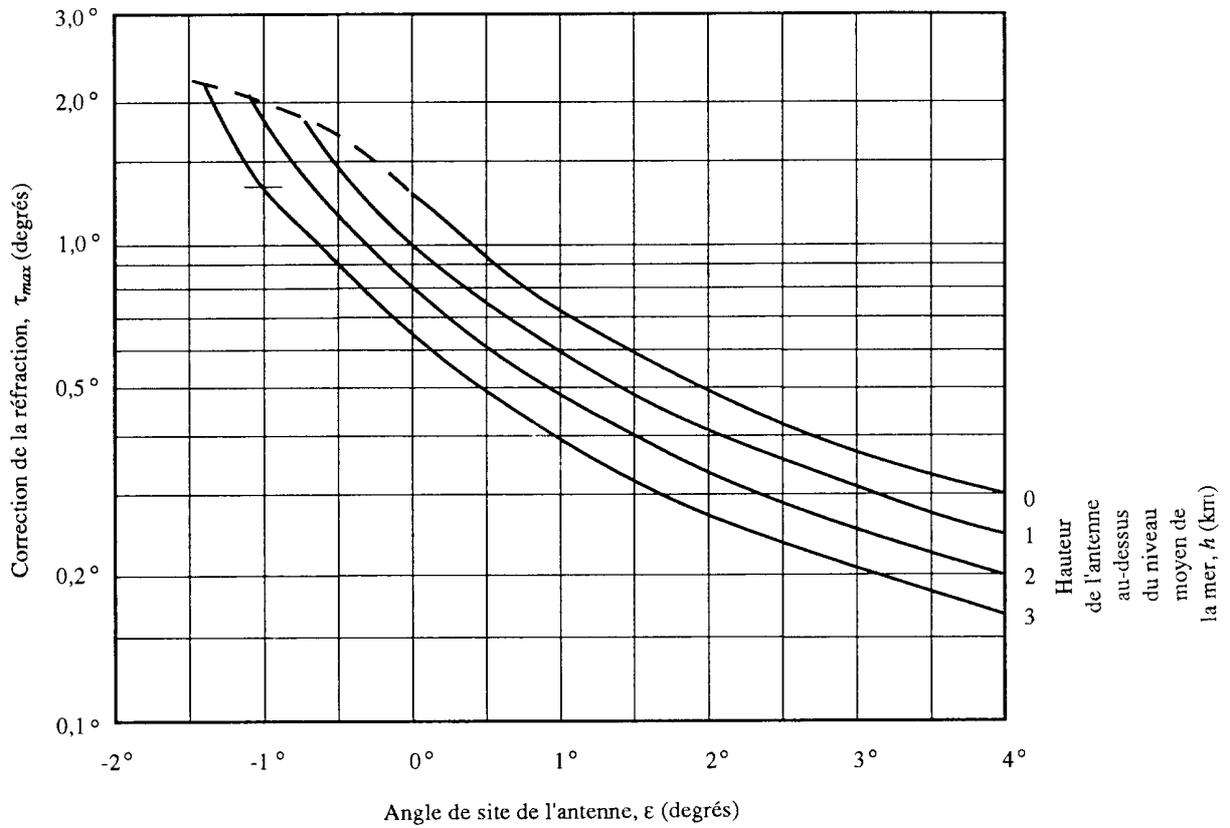
**5.2.3** Relever la trace de l'orbite géométrique, en chacun de ses points, d'une certaine quantité  $\tau$  (fonction de  $e$ ) pour tenir compte des réfractions maximale et minimale escomptées. Il en résulte deux nouvelles traces, l'une correspondant à la courbure maximale et l'autre à la courbure minimale.

**5.2.4** Tracer l'horizon local dans la région de l'azimut considéré. Pour les études préliminaires, on peut simplifier en remplaçant cet horizon par un horizon moyen approximatif.

**5.2.5** A l'aide d'un compas de 2° d'ouverture, chercher sur la droite correspondant à l'angle de site constant de l'antenne le centre du cercle tangent à la trace qui correspond à la courbure minimale: cela définit l'un des azimuts limites. Retrancher cet écart de l'azimut central déterminé à l'aide de l'équation (8).

FIGURE 1

Correction de la réfraction pour l'angle  $\epsilon$

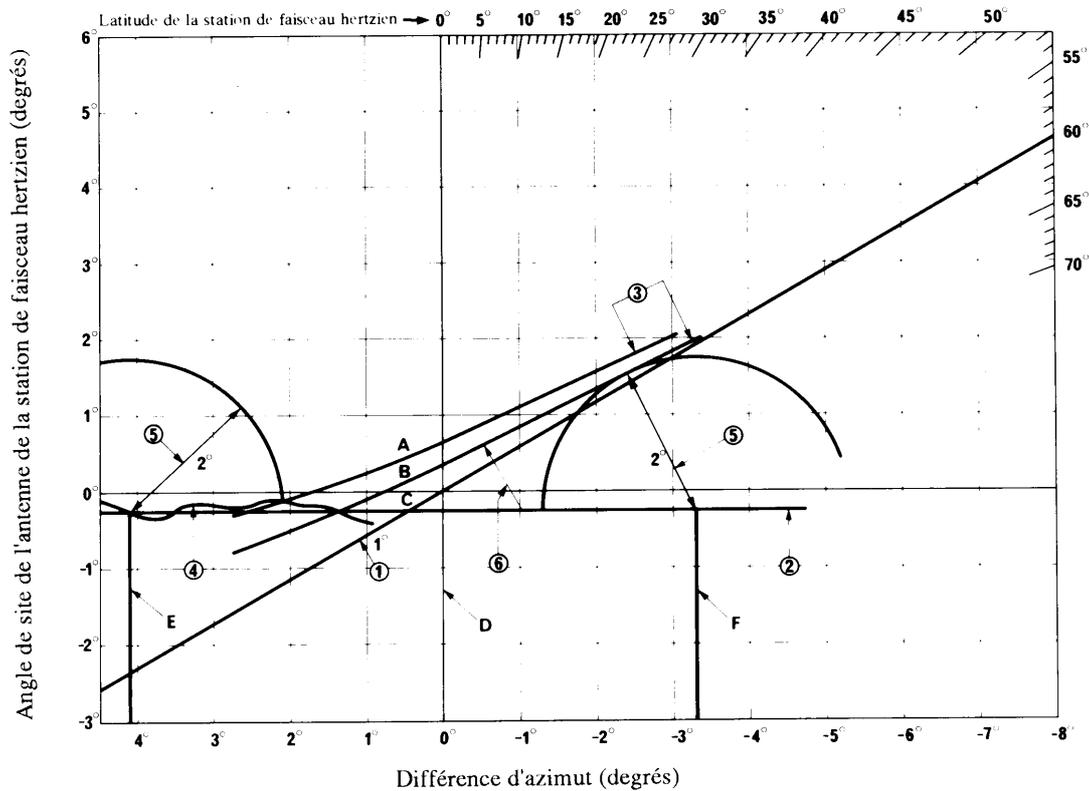


$N_0 = 400$  et  $\Delta N = -68$  pour la courbure maximale

$N_0 = 250$  et  $\Delta N = -30$  pour la courbure minimale

FIGURE 2

Exemple d'utilisation de la méthode graphique



Station de faisceau hertzien, altitude : 1 km  
 latitude : 60°  
 angle de site,  $\epsilon$  : -0,25°

A : réfraction maximale  
 B : réfraction minimale  
 C : pas de réfraction

D : azimut de référence : 74,68° (d'après l'équation (8))  
 E : limite supérieure : 74,68° + 4,1° = 78,78°  
 F : limite inférieure : 74,68° - 3,3° = 71,38°

D02-sc

De même, sur la droite qui représente l'angle de site constant de l'antenne, chercher le centre d'un deuxième cercle tel que son point d'intersection le plus rapproché avec la trace de courbure maximale se trouve juste au-dessus de l'horizon, cela définit le deuxième azimut limite. Ajouter cet écart à l'azimut central.

5.2.6 Cette construction graphique peut également être utilisée pour trouver l'écart angulaire réel entre l'azimut d'une antenne existante et celui de l'orbite; ce sera l'ouverture de compas correspondant à la distance la plus courte entre le point ayant l'azimut et l'angle de site  $\epsilon$  de cette direction d'antenne et la trace de l'orbite la plus rapprochée. On se servira de la Recommandation UIT-R SF.406 pour déterminer la puissance rayonnée maximale.

### 5.3 Méthode analytique

La méthode la plus simple pour calculer l'angle de site est d'utiliser une version informatique de la méthode de calcul analytique décrite dans l'Annexe 2. Il peut être préférable d'utiliser la méthode analytique et non la méthode graphique pour des stations situées à des latitudes élevées car les diverses approximations dont on se sert dans la méthode graphique ne sont plus valables dans ce cas.

## Méthode analytique de calcul des écarts angulaires entre les faisceaux des antennes de faisceaux hertziens et l'orbite des satellites géostationnaires

### 1. Introduction

La méthode de calcul analytique décrite dans la présente Annexe comprend:

- les premiers calculs (§ 2) au cours desquels le faisceau principal est classé en 8 zones au total;
- la première détermination de l'écart angulaire (§ 3) où l'on donne une première estimation de l'écart angulaire qui servira de point de départ pour des calculs plus détaillés (§ 4);
- calculs détaillés de l'écart angulaire (§ 4) au cours desquels on obtient une valeur précise de l'écart angulaire.

Les paramètres nécessaires pour les calculs sont les suivants:

$B$  : écart angulaire à respecter ( $\geq 2$  entre 1 et 10 GHz et  $\geq 1,5$  entre 10 et 15 GHz)

$L$  : latitude de la station (valeur absolue)

$A_0$  : azimut du faisceau principal de l'antenne (mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre ou dans le sens contraire à partir du sud dans l'hémisphère nord ou à partir du nord dans l'hémisphère sud  $0 \leq A_0 \leq 180^\circ$ )

$\epsilon_0$  : angle de site du faisceau principal de l'antenne

$\tau_{max}(\epsilon)$  : courbure atmosphérique maximale correspondant à l'angle de site  $\epsilon$  (voir la Note 1)

$\tau_{min}(\epsilon)$  : courbure atmosphérique minimale correspondant à l'angle de site  $\epsilon$  (voir la Note 1)

$\epsilon_{m1}$  : valeur minimale de l'angle de site par rapport à l'horizon pour une courbure atmosphérique maximale, telle qu'elle est perçue depuis la hauteur de l'antenne de la station, pour un azimut compris entre  $A_0 - B$  et  $A_0 + B$  (voir la Note 2)

$\epsilon_{m2}$  : valeur minimale de l'angle de site par rapport à l'horizon pour une courbure atmosphérique minimale, telle qu'elle est perçue depuis la hauteur de l'antenne de la station, pour un azimut compris entre  $A_0 - B$  et  $A_0 + B$  (voir la Note 2).

De plus, les équations suivantes sont définies:

$$F(E) = \arccos(K^{-1} \cos E) \quad (12)$$

où  $K$  est le rayon de l'orbite/rayon de la Terre, que l'on suppose être égal à 6,63

$$S(A, E) = \arcsin[\sin L \cdot \cos(F - E) - \cos L \cdot \sin(F - E) \cdot \cos A] \quad (13)$$

où  $S(A, E)$  est l'angle (degrés) entre le faisceau et l'orbite (voir la Note 3)

$$C(E) = \arccos[\operatorname{tg} L / \operatorname{tg}(F - E)] \quad (14)$$

où  $C(E)$  est l'azimut (degrés) de l'orbite correspondant à l'angle de site réfracté  $E$ . A noter que  $F$ , dans les équations (13) et (14), est calculé à partir de  $E$  à l'aide de l'équation (12).

$$\alpha = \sin L / \sqrt{(1 - K^{-2})^2 + (K^{-1} \sin L)^2} \quad (15)$$

$$\beta = \sqrt{1 - \alpha^2} \quad (16)$$

où  $\arcsin \alpha$  est l'angle entre l'horizon et la ligne normale à l'orbite des satellites géostationnaires dans la direction de l'azimut où l'orbite des satellites géostationnaires coupe l'horizon, sans tenir compte de la réfraction atmosphérique, telle qu'elle est perçue depuis la latitude  $L$ .

Il faut noter que, lorsque  $S(A, E)$  est positif, le faisceau est dirigé au-dessus de l'orbite et que, lorsque  $S(A, E)$  est négatif, le faisceau est dirigé en dessous de l'orbite.

Les calculs suivants s'effectuent en prenant pour hypothèse que l'horizon local est plat, sa hauteur étant égale à la hauteur la plus faible au-dessus de l'horizon local pour un azimut compris entre  $A_0 - B$  et  $A_0 + B$ . Si l'horizon local n'est pas plat, les conclusions des calculs seront interprétées comme suit:

- s'il ressort des calculs que l'écart angulaire est d'au moins  $B$  degrés, la conclusion est correcte même si on tient compte d'une ligne d'horizon très irrégulière;
- s'il ressort des calculs que l'écart angulaire est inférieur à  $B$  degrés, on peut utiliser la méthode graphique décrite dans l'Annexe 1 et procéder à un examen plus poussé. L'analyse graphique peut montrer que, dans certains cas, l'écart angulaire est d'au moins  $B$  degrés, car la ligne d'horizon est très irrégulière.

## 2. Premiers calculs

La Fig. 3 montre les orbites des satellites géostationnaires et les horizons apparents tels qu'ils sont perçus depuis la station.  $GSO_{\max}$  et  $GSO_{\min}$  sont les orbites des satellites géostationnaires apparentes correspondant à la courbure atmosphérique maximale et à la courbure atmosphérique minimale, respectivement.  $HOR_{\max}$  et  $HOR_{\min}$  sont les horizons apparents correspondant à la courbure atmosphérique maximale et à la courbure atmosphérique minimale, respectivement.  $H_1$  est le point d'intersection de  $GSO_{\max}$  et  $HOR_{\max}$  et  $H_2$  est le point d'intersection de  $GSO_{\min}$  et  $HOR_{\min}$ . Entre  $H_1$  et  $H_2$ , on peut raisonnablement supposer que l'horizon est une ligne droite reliant  $H_1$  et  $H_2$ .

Les azimuts  $A_{m1}$  du point  $H_1$  et  $A_{m2}$  du point  $H_2$  sont donnés par les équations suivantes:

$$E_{m1} = \varepsilon_{m1} - \tau_{\max}(\varepsilon_{m1}), \quad A_{m1} = C(E_{m1})$$

$$E_{m2} = \varepsilon_{m2} - \tau_{\min}(\varepsilon_{m2}), \quad A_{m2} = C(E_{m2})$$

où  $E_{m1}$  et  $E_{m2}$  sont les angles de site réfractés.

La Fig. 3 étant relativement complexe, il est nécessaire de classer les directions du faisceau principal selon les cas.

### 2.1 Première élimination

Dans les cas suivants, on peut facilement conclure que l'écart angulaire est d'au moins  $B$  degrés.

- a)  $A_{m1} + B \leq A_0$  : l'écart angulaire est d'au moins  $A_0 - A_{m1}$  degrés
- b)  $A_0 < A_{m1} + B$  et  $\varepsilon_0 \leq \varepsilon_{m2} - B$  : l'écart angulaire est d'au moins  $\varepsilon_{m2} - \varepsilon_0$  degrés.

Dans les autres cas, des calculs plus détaillés sont nécessaires. Ils sont exposés dans les paragraphes qui suivent.

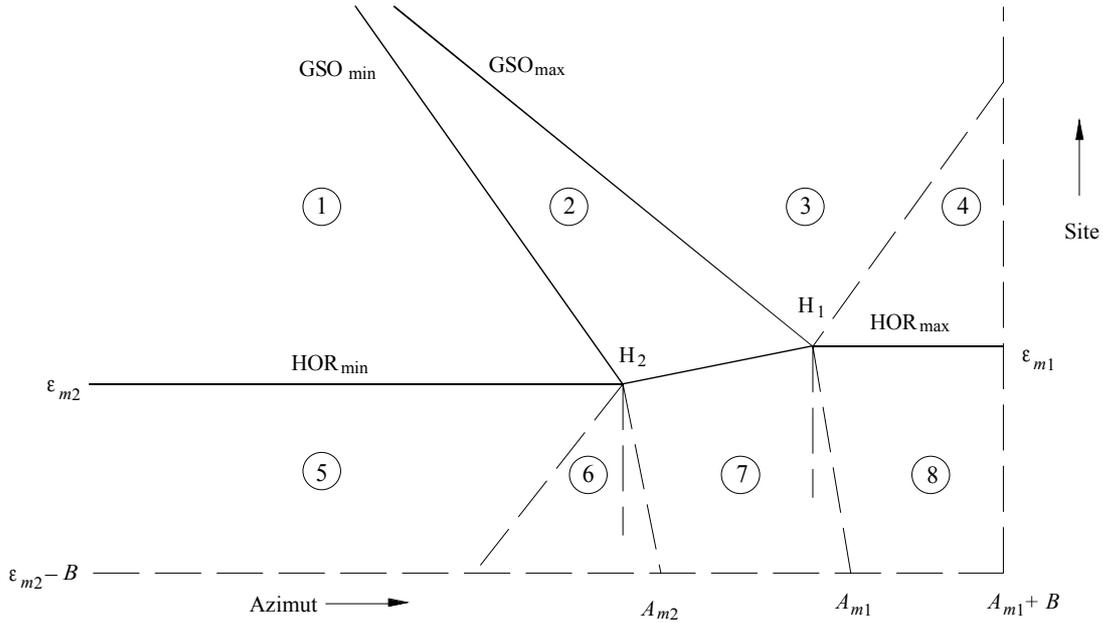
### 2.2 Classification des directions du faisceau principal

Le faisceau principal est dirigé vers ou au-dessus de l'horizon lorsque l'une des conditions suivantes est remplie:

- a)  $A_{m1} \leq A_0$  et  $\varepsilon_{m1} \leq \varepsilon_0$
- b)  $A_{m2} \leq A_0 < A_{m1}$  et  $(\varepsilon_{m1} - \varepsilon_{m2})(A_0 - A_{m1}) \leq (\varepsilon_0 - \varepsilon_{m1})(A_{m1} - A_{m2})$
- c)  $A_0 < A_{m2}$  et  $\varepsilon_{m2} \leq \varepsilon_0$

FIGURE 3

## Classification des directions du faisceau principal



$GSO_{max}$  : orbite des satellites géostationnaires apparente pour une courbure atmosphérique maximale

$GSO_{min}$  : orbite des satellites géostationnaires apparente pour une courbure atmosphérique minimale

D03

Dans les cas précédents, les directions du faisceau principal sont classées dans les Zones 1, 2, 3 et 4 selon les critères suivants (voir la Fig. 3):

Zone 1:  $S_{min} < 0$

Zone 2:  $S_{max} \leq 0$  et  $S_{min} \geq 0$

Zone 3:  $S_{max} > 0$  et  $\alpha(A_0 - A_{m1}) < \beta(\epsilon_0 - \epsilon_{m1})$

Zone 4:  $S_{max} > 0$  et  $\alpha(A_0 - A_{m1}) \geq \beta(\epsilon_0 - \epsilon_{m1})$

où  $S_{max}$  et  $S_{min}$  sont donnés par les formules:

$$E_{max} = \epsilon_0 - \tau_{max}(\epsilon_0), \quad S_{max} = S(A_0, E_{max})$$

$$E_{min} = \epsilon_0 - \tau_{min}(\epsilon_0), \quad S_{min} = S(A_0, E_{min})$$

Dans les autres cas où le faisceau principal est dirigé en dessous de l'horizon, les directions sont classées plus avant dans les Zones 5, 6, 7 et 8 comme suit (voir la Fig. 3):

Zone 5:  $\alpha(A_0 - A_{m2}) < \beta(\epsilon_0 - \epsilon_{m2})$

Zone 6:  $\alpha(A_0 - A_{m2}) \geq \beta(\epsilon_0 - \epsilon_{m2})$  et

$$(\epsilon_{m1} - \epsilon_{m2})(\epsilon_0 - \epsilon_{m2}) + (A_{m1} - A_{m2})(A_0 - A_{m2}) < 0$$

Zone 7:  $(\epsilon_{m1} - \epsilon_{m2})(\epsilon_0 - \epsilon_{m2}) + (A_{m1} - A_{m2})(A_0 - A_{m2}) \geq 0$  et

$$(\epsilon_{m1} - \epsilon_{m2})(\epsilon_0 - \epsilon_{m1}) + (A_{m1} - A_{m2})(A_0 - A_{m1}) < 0$$

Zone 8:  $(\epsilon_{m1} - \epsilon_{m2})(\epsilon_0 - \epsilon_{m1}) + (A_{m1} - A_{m2})(A_0 - A_{m1}) \geq 0$

### 3. Première détermination de l'écart angulaire

#### Zone 1

Dans ce cas, le faisceau principal est dirigé en dessous de l'orbite tant pour la courbure atmosphérique maximale que pour la courbure atmosphérique minimale. Les angles de site et d'azimut de la direction à la circonférence du faisceau avec un écart angulaire de  $B$  par rapport au faisceau principal sur la ligne approximativement normale à l'orbite sont:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_0 + \alpha \cdot B, \quad A_1 = A_0 + \beta \cdot B$$

$$\text{On calcule } E_1 = \varepsilon_1 - \tau_{min}(\varepsilon_1) \quad \text{et} \quad S_1 = S(A_1, E_1)$$

Une évaluation approximative de l'écart angulaire est donnée par la formule suivante:

$$SA = B \cdot S_{min} / (S_{min} - S_1) \quad \text{degrés}$$

On calcule  $\varepsilon_s = \varepsilon_0 + \alpha \cdot SA$  et on passe au § 4 pour un calcul plus précis.

#### Zone 2

Dans ce cas, l'écart angulaire est nul.

#### Zone 3

Dans ce cas, le faisceau principal est dirigé au-dessus de l'orbite tant pour la courbure atmosphérique maximale que pour la courbure atmosphérique minimale. Les angles de site et d'azimut de la direction à la circonférence du faisceau avec un écart angulaire  $B$  par rapport au faisceau principal sur la ligne approximativement normale à l'orbite sont:

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_0 - \alpha \cdot B, \quad A_3 = A_0 - \beta \cdot B$$

Si  $\varepsilon_3 \geq \varepsilon_{m1}$ , on calcule:

$$E_3 = \varepsilon_3 - \tau_{max}(\varepsilon_3) \quad \text{et} \quad S_3 = S(A_3, E_3)$$

Une évaluation approximative de l'écart angulaire est donnée par la formule:

$$SA = B \cdot S_{max} / (S_{max} - S_3) \quad \text{degrés}$$

On calcule  $\varepsilon_s = \varepsilon_0 - \alpha \cdot SA$  (si  $\varepsilon_s < \varepsilon_{m1}$ , mettre  $\varepsilon_s = \varepsilon_{m1}$ ), puis on passe au § 4 pour un calcul plus précis.

Si  $\varepsilon_3 < \varepsilon_{m1}$ , on calcule:

$$A_{31} = A_0 - (\varepsilon_0 - \varepsilon_{m1}) \cdot \beta / \alpha$$

où  $A_{31}$  est l'azimut de la direction à laquelle la ligne traversant le faisceau principal et normale à l'orbite coupe l'horizon local  $\text{HOR}_{max}$ .

Une évaluation approximative de l'écart angulaire est donnée par la formule suivante:

$$SA = [(\varepsilon_0 - \varepsilon_{m1}) / \alpha] \cdot S_{max} / (S_{max} - S_{31}) \quad \text{degrés}$$

où  $S_{31} = S(A_{31}, E_{m1})$  et  $E_{m1}$  ont été calculés au § 2.

(Etant donné que les ordinateurs ne peuvent traiter qu'un nombre limité de chiffres, il se peut que l'équation ci-dessus ne convienne pas dans les cas exceptionnels où  $S_{31}$  est très proche de  $S_{max}$ . Cette formule doit donc être appliquée lorsque  $|S_{max} - S_{31}| > \Delta$  degrés. Dans le cas contraire,  $SA = S_{max}$  degrés est une estimation raisonnable de l'écart angulaire. Dans ce cas,  $\Delta$  est un petit nombre approprié, par exemple  $0,001^\circ$ .)

On calcule  $\varepsilon_s = \varepsilon_0 - \alpha \cdot SA$  et on passe au § 4 pour un calcul plus précis.

#### Zone 4

Dans ce cas, les angles de site et d'azimut de la direction de l'orbite la plus proche du faisceau principal sont  $\varepsilon_{m1}$  et  $A_{m1}$ . Par conséquent, l'angle  $SA$  entre cette direction et le faisceau principal est:

$$SA = \sqrt{(\varepsilon_{m1} - \varepsilon_0)^2 + (A_{m1} - A_0)^2} \quad \text{degrés}$$

Cet écart angulaire est précis et ne nécessite aucun autre calcul.

## Zone 5

Dans ce cas, le faisceau principal est dirigé en dessous de l'horizon et également en dessous de l'orbite tant pour la courbure atmosphérique maximale que pour la courbure atmosphérique minimale.

Tout d'abord on calcule:

$$A_5 = A_0 + (\varepsilon_{m2} - \varepsilon_0) \cdot \beta / \alpha \quad \text{et} \quad S_5 = S(A_5, E_{m2})$$

où  $A_5$  est l'azimut de la direction à laquelle la ligne traversant le faisceau principal et normale à l'orbite coupe l'horizon  $\text{HOR}_{\min}$ ,  $E_{m2}$  a été calculé au § 2.

On calcule ensuite:

$$\varepsilon_{51} = \varepsilon_{m2} + \alpha \cdot B, \quad A_{51} = A_5 + \beta \cdot B$$

où la direction  $(A_{51}, \varepsilon_{51})$  s'écarte de  $B$  degrés de la direction  $(A_5, \varepsilon_{m2})$  sur la ligne traversant le faisceau principal et normale à l'orbite.

$$\text{On calcule } E_{51} = \varepsilon_{51} - \tau_{\min}(\varepsilon_{51}) \quad \text{et} \quad S_{51} = S(A_{51}, E_{51}).$$

Une évaluation approximative de l'écart angulaire est donnée par la formule suivante:

$$SA = (\varepsilon_{m2} - \varepsilon_0) / \alpha + B \cdot S_5 / (S_5 - S_{51}) \quad \text{degrés}$$

On calcule  $\varepsilon_s = \varepsilon_0 + \alpha \cdot SA$  puis on passe au § 4 pour un calcul plus détaillé.

## Zone 6

Dans ce cas, l'évaluation approximative de l'écart angulaire est donnée par l'angle entre le faisceau principal et le point  $H_2$  calculé à l'aide de l'équation suivante:

$$SA = \sqrt{(\varepsilon_{m2} - \varepsilon_0)^2 + (A_{m2} - A_0)^2} \quad \text{degrés}$$

Toutefois, la direction de l'orbite la plus proche pouvant être légèrement différente dans de très rares cas, on suppose que  $\varepsilon_s = \varepsilon_{m2}$  et l'on passe au § 4 pour un calcul plus précis.

## Zone 7

Dans ce cas, l'orbite la plus proche est dirigée vers l'horizon reliant  $H_1$  et  $H_2$  et l'écart angulaire est donné par la formule:

$$SA = [(\varepsilon_{m1} - \varepsilon_{m2})(A_0 - A_{m1}) - (\varepsilon_0 - \varepsilon_{m1})(A_{m1} - A_{m2})] / \sqrt{(\varepsilon_{m1} - \varepsilon_{m2})^2 + (A_{m1} - A_{m2})^2}$$

Cet écart angulaire est précis et ne nécessite aucun nouveau calcul.

## Zone 8

Dans ce cas, la direction de l'orbite la plus proche est le point  $H_1$  et l'écart angulaire est:

$$SA = \sqrt{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{m1})^2 + (A_0 - A_{m1})^2} \quad \text{degrés}$$

Cet écart angulaire est précis et ne nécessite aucun nouveau calcul.

#### 4. Calculs détaillés de l'écart angulaire

Dans le cas des Zones 1, 3, 5 et 6, l'écart angulaire calculé au paragraphe précédent est approximatif. Toutefois, si  $SA \geq 1,5 B$ , on peut dire, sans risque de se tromper, que l'écart angulaire est d'au moins  $B$  degrés. Par conséquent, aucun nouveau calcul ne s'impose.

Si  $SA < 1,5 B$ , il faut procéder à de nouveaux calculs pour obtenir des valeurs plus précises. Dans cette optique, il faut partir de  $\varepsilon_s$  qui a déjà été calculé et qui correspond à l'écart angulaire approximatif.

Dans le cas des Zones 1, 5 et 6, la direction de l'orbite la plus proche est située sur  $GSO_{min}$ . L'azimut  $A_s$  et l'écart angulaire  $SA$  correspondant à  $\epsilon_s$  sont donnés par les équations suivantes:

$$E_s = \epsilon_s - \tau_{min}(\epsilon_s), \quad A_s = C(E_s), \quad SA = \sqrt{(\epsilon_0 - \epsilon_s)^2 + (A_0 - A_s)^2}$$

Dans le cas de la Zone 3, la direction de l'orbite la plus proche est située sur  $GSO_{max}$ . L'azimut et l'écart angulaire correspondant à  $\epsilon_s$  sont donnés par les équations:

$$E_s = \epsilon_s - \tau_{max}(\epsilon_s), \quad A_s = C(E_s), \quad SA = \sqrt{(\epsilon_0 - \epsilon_s)^2 + (A_0 - A_s)^2}$$

Dans l'un quelconque des cas précédents, on peut calculer l'écart angulaire précis en appliquant une méthode itérative où  $\epsilon_s$  est progressivement incrémenté ou décrémenté pour converger vers une valeur minimale de  $SA$ .

Si le calcul est fait en prenant pour hypothèse que  $h_1 = 0$ , on se reportera à la Note 2. Il faut utiliser les résultats des calculs pour confirmer le respect aux dispositions de la Recommandation UIT-R SF.406.

Note 1 – La courbure atmosphérique (degrés) peut être calculée à l'aide des équations suivantes:

$$\begin{aligned} \tau_{max}(\epsilon, h) &= 1/[0,7885809 + 0,175963 h + 0,0251620 h^2 \\ &\quad + \epsilon(0,549056 + 0,0744484 h + 0,0101650 h^2) \\ &\quad + \epsilon^2(0,0187029 + 0,0143814 h)] \\ \tau_{min}(\epsilon, h) &= 1/[1,755698 + 0,313461 h \\ &\quad + \epsilon(0,815022 + 0,109154 h) \\ &\quad + \epsilon^2(0,0295668 + 0,0185682 h)] \end{aligned}$$

où  $h$  est la hauteur de l'antenne de la station au-dessus du niveau de la mer (km).

Les équations précédentes sont approximatives et ont été développées en valeurs approchées pour  $\epsilon_m \leq \epsilon \leq 8^\circ$  et  $0 \leq h \leq 4$  km, où  $\epsilon_m$  est calculé à l'aide de l'équation donnée dans la Note 2 étant entendu que  $h_1 = 0$ . L'algorithme présenté dans cette Annexe garantit que les équations précédentes ne sont appliquées que lorsque  $\epsilon \geq \epsilon_m$ .

Note 2 – Si la ligne d'horizon est formée par un terrain plat ou la mer,  $\epsilon_m$  est donné par l'équation suivante:

$$\epsilon_m = - \arccos \left[ \frac{R + h_1}{R + h} \cdot \frac{1 + N_0 \cdot 10^{-6} (1 + \Delta N / N_0)^{h_1}}{1 + N_0 \cdot 10^{-6} (1 + \Delta N / N_0)^h} \right]$$

où:

$h$ : hauteur de l'antenne de la station au-dessus du niveau de la mer (km)

$h_1$ : altitude de l'horizon (km) ( $h \geq h_1$ )

$R$ : rayon de la Terre supposé être égal à 6 370 km.

$\epsilon_{m1}$  est l'angle de site correspondant à la courbure atmosphérique maximale ( $N_0 = 400$  et  $\Delta N = -68$ ) et  $\epsilon_{m2}$  est l'angle de site correspondant à la courbure atmosphérique minimale ( $N_0 = 250$  et  $\Delta N = -30$ ). A noter que  $\epsilon_{m1} \geq \epsilon_{m2}$ .

Dans la pratique, il peut être difficile d'évaluer les valeurs précises de  $\epsilon_{m1}$  et  $\epsilon_{m2}$  compte tenu du fait que la ligne d'horizon est très irrégulière. En pareil cas, il peut être plus simple d'évaluer les valeurs de  $\epsilon_{m1}$  et  $\epsilon_{m2}$  en utilisant l'équation précédente, étant entendu que  $h_1 = 0$ . Si le calcul fait à partir de cette hypothèse montre que l'écart angulaire est d'au moins  $B$  degrés, cette conclusion est correcte même lorsque l'on tient compte du fait que la ligne d'horizon est très irrégulière. Si le calcul montre que l'écart angulaire est inférieur à  $B$  degrés, il faut refaire le calcul en utilisant les valeurs réelles de  $\epsilon_{m1}$  et  $\epsilon_{m2}$ .

Note 3 – L'équation peut être obtenue comme suit:

Supposons que les paramètres d'une station hertzienne de Terre sont les suivants:

– latitude,  $L$  (valeur absolue);

- azimut du faisceau principal de l'antenne,  $A$  (mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre à partir du sud dans l'hémisphère nord et à partir du nord dans l'hémisphère sud);
- angle de site du faisceau principal de l'antenne,  $E$  (après avoir tenu compte de l'effet de la réfraction).

Pour une station hertzienne située dans l'hémisphère nord, les calculs s'effectuent de la manière suivante:

La trajectoire du faisceau principal de l'antenne de la station hertzienne peut être représentée dans un espace à trois dimensions.

$$x = R \cos L + u (\sin E \cdot \cos L + \cos E \cdot \sin L \cdot \cos A) \quad (17)$$

$$y = -u \cdot \cos E \cdot \sin A \quad (18)$$

$$z = R \sin L + u (\sin E \cdot \sin L - \cos E \cdot \cos L \cdot \cos A) \quad (19)$$

où  $R$  est le rayon de la Terre et où l'on suppose la longitude de la station hertzienne égale à 0 (dans le plan x-z). On obtient l'équation suivante:

$$x^2 + y^2 + z^2 = R^2 + u^2 + 2Ru \cdot \sin E \quad (20)$$

Le faisceau principal de l'antenne de la station terrienne arrive à la surface d'une sphère de rayon égal à celui de l'orbite lorsque  $x^2 + y^2 + z^2 = K^2 R^2$  (où  $K$  est le rapport du rayon de l'orbite sur le rayon de la Terre, supposé égal à 6,63), c'est-à-dire que:

$$u/R = \sqrt{K^2 - \cos^2 E} - \sin E \quad (21)$$

L'écart angulaire  $S$  peut être calculé à l'aide de l'équation suivante:

$$z = K R \sin S \quad (22)$$

Par conséquent:

$$\sin S = \frac{1}{K} \left[ \sin L + (\sqrt{K^2 - \cos^2 E} - \sin E) (\sin E \cdot \sin L - \cos E \cdot \cos L \cdot \cos A) \right] \quad (23)$$

où  $S$  est positif si l'axe du faisceau de l'antenne est au-dessus de l'orbite. Cette équation peut aussi s'exprimer comme suit:

$$F = \arccos (K^{-1} \cos E)$$

$$\sin S = \sin L \cdot \cos (F - E) - \cos L \cdot \sin (F - E) \cdot \cos A \quad (24)$$

Lorsque la station hertzienne est située dans l'hémisphère sud, les équations (17) à (19) s'expriment différemment mais les résultats (équations (23) et (24)) sont identiques.

A noter que, lorsque  $S$  égale zéro, l'équation (24) précédente est identique à l'équation (8) donnée dans l'Annexe 1.

*Note 4* – Dans bien des cas pour les calculs précédents, l'écart angulaire  $SA$  entre le faisceau principal et la direction des angles de site  $\varepsilon$  et d'azimut  $A$  est calculé comme suit:

$$SA = \sqrt{(\varepsilon - \varepsilon_0)^2 + (A - A_0)^2}$$

En fait l'équation est approximative. La formule exacte est donnée par:

$$SA = 2 \cdot \arcsin \sqrt{\sin^2 \Delta\varepsilon + \cos \varepsilon \cdot \cos \varepsilon_0 \cdot \sin^2 \Delta A}$$

où:

$$\Delta\varepsilon = (\varepsilon - \varepsilon_0)/2 \quad \text{et} \quad \Delta A = (A - A_0)/2.$$

Toutefois, si  $|\varepsilon|$ ,  $|\varepsilon_0|$ ,  $|\Delta\varepsilon|$  et  $|\Delta A|$  sont relativement petits, l'équation approximative donne des valeurs suffisamment précises.

*Note 5* – On trouvera dans l'Appendice 1 ci-après un programme informatique permettant de calculer les écarts angulaires à partir des éléments donnés dans la présente Annexe.

## APPENDICE I

## DE L'ANNEXE 2

```

1000 ' SANGLE-A.BAS
1010 '*****
1020 '* Separation Angles between *
1030 '* radio-relay antenna beams and *
1040 '* the geostationary-satellite orbit *
1050 '*****
1060 SCREEN 0: WIDTH 80: CLS
1070 '----- Function definition -----
1080 DEF FNTMAX (E) = DR / (.7885809 + .175963 * H0 + .025162 * H0 ^ 2 +
E * RD * (.549056 + .0744484 * H0 + .010165 * H0 ^ 2) +
(E * RD) ^ 2 * (.0187029 + .0143814 * H0))
1090 DEF FNTMIN (E) = DR / (1.755698 + .313461 * H0 +
E * RD * (.815022 + .109154 * H0) +
(E * RD) ^ 2 * (.0295668 + .0185682 * H0))
1100 DEF FNASIN (X) = ATN (X / SQRT (-X * X + 1))
1110 DEF FNACOS (X) = -ATN (X / SQRT (-X * X + 1)) + PI / 2
1120 DEF FNF (E) = FNACOS (1 / K * COS (E))
1130 DEF FNS (A, E) = FNASIN (SINL * COS (FNF (E) - E) -
COSL * SIN(FNF(E) - E) * COS (A))
1140 DEF FNC (E) = FNACOS (TANL / TAN (FNF (E) - E))
1150 '-----
1160 ' PI : circular constant
1170 ' RD : radian to degree
1180 ' DR : degree to radian
1190 ' F : transmitter frequency
1200 ' BD : separation angle to be avoided in degree
1210 ' LD,LM,LS : latitude of the station in degrees,minutes,seconds
1220 ' PT : allowable e.i.r.p value
1230 '----- Parameter input -----
1240 PI = 4 * ATN(1): RD = 180 / PI: DR = PI / 180
1250 PRINT "Do you want print output on printer?(YIN)"
1260 A$ = INKEY$: IF A$ = "" THEN 1260
1270 IF A$ = "Y" OR A$ = "y" THEN IPRT = 1 ELSE IPRT = 0: GOTO 1320
1280 OPEN "LPT1:" FOR OUTPUT AS #1
1290 PRINT #1, STRING$(70, "-")
1300 PRINT #1, "F(GHz) Latitude A0(°) E0(°) H0(m) H1(m) ZONE "
SA(°) EIRP(dBW)"
1310 PRINT #1, STRING$(70, "-")
1320 CLS : INPUT "F : frequency (GHz) "; F
1330 IF F < 1 OR F > 15 THEN PRINT "1<=F<=15": GOTO 1320
1340 IF F <= 10 THEN BD = 2 ELSE BD = 1.5
1350 B = BD * DR
1360 INPUT "L : latitude (°, ', ") "; LD, LM, LS
1370 L = ABS((LD + LM / 60 + LS / 3600) * DR)
1380 SINL = SIN(L): COSL = COS(L): TANL = SINL / COSL
1390 INPUT "A0: antenna azimuth (°) "; A0D: A0 = A0D * DR
1400 INPUT "E0: antenna elevation (°) "; E0D: E0 = E0D * DR
1410 INPUT "H0: station height (m) "; H0: H0 = H0 / 1000
1420 INPUT "H1: horizon height (m) "; H1: H1 = H1 / 1000
1430 IF H1 > H0 THEN PRINT "H1<=H0": GOTO 1420
1440 '----- Call subroutine -----
1450 GOSUB 2000
1460 '----- Print result -----
1470 CLS : PRINT STRING$(70, "-")

```

```

1480 PRINT USING "F : frequency          ##.# (GHz) "; F
1490 PRINT USING "L : latitude          #####°##'##'"; LD; LM; LS
1500 PRINT USING "A0: antenna azimuth   #####.# (°) "; A0D
1510 PRINT USING "E0: antenna elevation  ##.# (°) "; E0D
1520 PRINT USING "H0: station height     #### (m) "; H0 * 1000
1530 PRINT USING "H1: horizon height     #### (m) "; H1 * 1000
1540 PRINT "Separation angle should be at least"; BD; "degrees."
1550 PRINT STRING$(70, "-")
1560 PRINT " The main beam is in "; C$; "."
1570 IF KF < > 3 THEN PRINT "The separation angle is";
1580 IF KF = 2 THEN PRINT USING "at least##.# degrees."; SA * RD
1590 IF KF = 1 THEN PRINT "at least"; BD; "degrees."
1600 IF KF = 0 THEN PRINT "zero."
1610 IF KF < 0 THEN PRINT "less than"; BD; "degrees."
1620 IF KF = -2 THEN PRINT "If the local horizon is not flat,"
PRINT "further investigation should be carried out."
1630 IF KF = 3 THEN PRINT "You can't see orbit from your latitude."
1640 IF SA > 90 * DR OR KF = 3 OR KF = 2 THEN GOTO 1660
1650 PRINT USING "Actual separation angle can be estimated
as ##.### degrees."; SA * RD
1660 '----- DETERMINATION OF EIRP -----
1670 IF 10 < F THEN PT = 55: GOTO 1710
1680 IF SA <= .5 * DR THEN PT = 47: GOTO 1710
1690 IF SA >= 1.5 * DR THEN PT = 55: GOTO 1710
1700 PT = 47 + 8 * (SA * RD - .5)
1710 PRINT USING "Maximum e.i.r.p shall not exceed ##.### dBW."; PT
1720 PRINT STRING$(70, "-")
1730 IF IPRT = 0 THEN 1750
1740 PRINT #1, USING "##.# #####°##'##" #####.# ###.# ##### ##, #
\ \###.## ##.##"; F; LD; LM; LS; A0D; E0D; H0 * 1000;
H1 * 1000; C$; SA * RD; PT
1750 '-----end -----
1760 PRINT "Do you continue? (Y/N)"
1770 A$ = INKEY$: IF A$ = "" THEN 1770
1780 IF A$ = "N" OR A$ = "n" THEN CLOSE #1: STOP ELSE GOTO 1320
2000 '= = = = =subroutine = = = = =
2010 ' IN  B : separation angle to be avoided in radian
2020 '     L : latitude of station in radian
2030 '     A0 : azimuth of antenna main beam in radian
2040 '     E0 : elevation of antenna main beam in radian
2050 '     H0 : height of station in km
2060 '     H1 : height of horizon in km
2080 '     N0 : refractivity at sea level in N unit
2090 '     DN : refractivity difference at 1 km above sea level in N unit
2100 '     EM1: the local horizon at maximum atmospheric bending
2110 '     EM2: the local horizon at minimum atmospheric bending
2120 '     R : Earth radius
2130 '     K : orbit radius / Earth radius
2140 '     AL : equation (12)
2150 '
2160 ' OUT SA : estimated separation angle
2170 '     C$ : judged zone
2180 '     KF : decision flag
2190 '         3 .. extreme northern or southern latitude
2200 '         2 .. SA is at least SA
2210 '         1 .. SA is at least B
2220 '         0 .. SA is 0
2230 '        -1 .. SA is less than B

```

```

2240          -2 .. If horizon is flat then SA is less than B
2250 -----
2260 R = 6370: K = 6.63: T6 = .000001
2270 N0 = 400: DN = -68: GOSUB 2290: EM1 = EM
2280 N0 = 250: DN = -30: GOSUB 2290: EM2 = EM: GOTO 2310
2290 EMH = (R + H1) / (R + H0) * (1 + N0 * T6 * (1 + DN / N0) ^ H1) /
      (1 + N0 * T6 * (1 + DN / N0) ^ H0)
2300 IF EMH = 1 THEN EM = 0: RETURN ELSE EM = -FNACOS(EMH): RETURN
2310 AL = SINL / SQR ((1 - 1 / K ^ 2) ^ 2 + (SINL / K) ^ 2)
2330 '----- PRELIMINARY CALCULATION -----
2340 EEM1 = EM1 - FNTMAX(EM1): EEM2 = EM2 - FNTMIN(EM2)
2350 IF AL > 1 THEN C$ = "PRELIM": KF = 3: RETURN ELSE BE = SQR(1 - AL ^ 2)
2360 AM1 = FNC(EEM1) : AM2 = FNC(EEM2) DEM = EM1 - EM2: DAM = AM1 - AM2
2380 '----- PRELIMINARY ELIMINATION -----
2390 IF A0 >= AM1 + B THEN SA = A0 - AM1: C$ = "PRELIM": KF = 2: RETURN
2400 IF E0 <= EM2 - B THEN SA = EM2 - E0: C$ = "PRELIM": KF = 2: RETURN
2420 '----- CLASSIFICATION OF MAIN BEAM DIRECTIONS -----
2430 IF AM1 <= A0 AND EM1 <= E0 OR AM2 <= A0 AND A0 < AM1 AND DEM *
      (A0 - AM1) <= (E0 - EM1) * DAM OR A0 < AM2 AND EM2 <= E0
      GOTO 2450 ELSE 2520
2450 ' ----- main beam is on or above the horizon -----
2460 EMAX = E0 - FNTMAX(E0): SMAX = FNS(A0, EMAX)
2470 EMIN = E0 - FNTMIN(E0): SMIN = FNS(A0, EMIN)
2480 IF SMIN < 0 GOTO 2590
2490 IF SMAX <= 0 GOTO 2630
2500 IF AL * (A0 - AM1) < BE * (E0 - EM1) GOTO 2660 ELSE 2750
2520 ' ----- main beam is below the horizon -----
2530 IF AL * (A0 - AM2) < BE * (E0 - EM2) GOTO 2780
2540 IF DEM * (E0 - EM2) + DAM * (A0 - AM2) < 0 GOTO 2850
2550 IF DEM * (E0 - EM1) + DAM * (A0 - AM1) < 0 GOTO 2880 ELSE 2920
2570 '----- PRELIMINARY DETERMINATION -----
2590 ' ----- ZONE 1 -----
2600 E1 = E0 + AL * B: A1 = A0 + BE * B: EE1 = E1 - FNTMIN(E1)
      S1 = FNS(A1, EE1)
2610 SA = B * SMIN / (SMIN - S1): IF SA > 1 THEN SA = - SMIN
2615 C$ = "ZONE 1": ES = E0 + AL * SA: GOTO 2950
2630 ' ----- ZONE 2 -----
2640 SA = 0: C$ = "ZONE 2": KF = 0: RETURN
2660 ----- ZONE 3 -----
2670 E3 = E0 - AL * B: A3 = A0 - BE * B: C$ = "ZONE 3"
      IF E3 < EM1 GOTO 2710
2680 EE3 = E3 - FNTMAX(E3): S3 = FNS(A3, EE3)
2690 SA = B * SMAX / (SMAX - S3): ES = E0 - AL * SA
      IF ES < EM1 THEN ES = EM1
2700 GOTO 3200
2710 A31 = A0 - (E0 - EM1) * BE / AL: S31 = FNS(A31, EEM1)
2720 IF ABS (SMAX - S31) <= .001 * DR THEN SA = SMAX
      ELSE SA (E0 - EM1) / AL * SMAX / (SMAX - S31)
2730 ES = E0 - AL * SA: GOTO 3200
2750 ----- ZONE 4 -----
2760 SA = SQR((EM1 - E0) ^ 2 + (AM1 - A0) ^ 2): C$ = "ZONE 4": GOTO 3450
2780 ' ----- ZONE 5 -----
2790 A5 = A0 + (EM2 - E0) * BE / AL: S5 = FNS(A5, EEM2)
2800 E51 = EM2 + AL * B: A51 = A5 + BE * B
2810 EE51 = E51 - FNTMIN(E51): S51 = FNS(A51, EE51)
2820 SA = (EM2 - E0) / AL + B * S5 / (S5 - S51)
      IF SA > 1 THEN SA = (EM2 - E0) / AL - S5
2830 ES = E0 + AL * SA: C$ = "ZONE 5": GOTO 2950

```

```

2850 ' ----- ZONE 6 -----
2860 SA = SQR ((E0 - EM2) ^ 2 + (A0 - AM2) ^ 2): ES = EM2
    C$ = "ZONE 6": GOTO 2950
2880 ----- ZONE 7 -----
2890 SA = (DEM * (A0 - AM1) - (E0 - EM1) * DAM) / SQR(DEM ^ 2 + DAM ^ 2)
2900 C$ = "ZONE 7": GOTO 3450
2920 ' ----- ZONE 8 -----
2930 SA = SQR((E0 - EM1) ^ 2 + (A0 - AM1) ^ 2): C$ = "ZONE 8": GOTO 3450
2950 ' ----- DETAILED CALCULATIONS FOR ZONES 1, 5 AND 6-----
2970 ' ----- STEP 1 -----
2980 IF SA >= 1.5 * B GOTO 3450 ELSE DE = BE * B / 60
2990 EES = ES - FNTMIN(ES)
3000 IF FNF(EES) - EES < L THEN ES = ES - DE: GOTO 2990
3010 AS=FNC(EES):SAO=SQR((ES-E0)^2+(AS-A0)^2)
3020 ES1 = ES + DE: EES = ES1 - FNTMIN(ES1)
3030 IF FNF(EES) - EES < L THEN ES1 = ES: SA = SA0: GOTO 3130
3040 AS=FNC(EES):SA=SQR((ES1-E0)^2+(AS-A0)^2)
3050 IF SA > SA0 THEN ES1 = ES: SA = SA0: GOTO 3130
3070 ' ----- STEP 2 -----
3080 ES1 = ES1 + DE: EES = ES1 - FNTMIN(ES1)
3090 IF FNF(EES) - EES < L GOTO 3450
3100 AS=FNC(EES):SA1=SQR((ES1-E0)^2+(AS-A0)^2)
3110 IF SA1 < SA THEN SA = SA1: GOTO 3080 ELSE 3450
3130 '----- STEP 3 -----
3140 IF ES1 <= EM2 GOTO 3450
3150 ES1 = ES1 - DE: IF ES1 < EM2 THEN ES1 = EM2
3160 EES=ES1-FNTMIN(ES1):AS=FNC(EES)
3170 SA1=SQR((ES1-E0)^2+(AS-A0)^2)
3180 IF SA1 < SA THEN SA = SA1: GOTO 3140 ELSE 3450
3200 ' ----- DETAILED CALCULATION FOR ZONE 3 -----
3220 ' ----- STEP 1 -----
3230 IF SA >= 1.5 * B GOTO 3450 ELSE DE = BE * B / 60
3240 EES = ES - FNTMAX(ES)
3250 IF FNF(EES) - EES < L THEN ES = ES - DE: GOTO 3240
3260 AS=FNC(EES):SAO=SQR((ES-E0)^2+(AS-A0)^2)
3270 ES1 = ES + DE: EES = ES1 - FNTMAX(ES1)
3280 IF FNF(EES) - EES < L THEN ES1 = ES: SA = SA0: GOTO 3380
3290 AS=FNC(EES):SA=SQR((ES1-E0)^2+(AS-A0)^2)
3300 IF SA > SA0 THEN ES1 = ES: SA = SA0: GOTO 3380
3320 '----- STEP 2 -----
3330 ES1 = ES1 + DE: EES = ES1 - FNTMAX(ES1)
3340 IF FNF(EES) - EES < L GOTO 3450
3350 AS=FNC(EES):SA1=SQR((ES1-E0)^2+(AS-A0)^2)
3360 IF SA1 < SA THEN SA = SA1: GOTO 3330 ELSE 3450
3380 '----- STEP 3 -----
3390 IF ES1 <= EM1 GOTO 3450
3400 ES1 = ES1 - DE: IF ES1 < EM1 THEN ES1 = EM1
3410 EES=ES1-FNTMAX(ES1):AS=FNC(EES)
3420 SA1=SQR((ES1-E0)^2+(AS-A0)^2)
3430 IF SA1 < SA THEN SA = SA1: GOTO 3390
3450 '----- JUDGMENT -----
3460 IF SA >= B THEN KF = 1: RETURN ELSE KF = -2: RETURN

```

---