

RECOMMANDATION UIT-R S.1713-1

Méthode de calcul de l'espacement angulaire minimal à la surface de la Terre entre un satellite non géostationnaire du SFS du type HEO dans son arc «actif» et un satellite géostationnaire

(Question UIT-R 241/4)

(2005-2007)

Domaine de compétence

La présente Recommandation décrit des méthodes permettant de calculer l'espacement angulaire minimum en n'importe quel point à la surface de la Terre entre un satellite à orbite terrestre élevée (HEO, *high Earth orbit*) dans son arc «actif» et:

- a) tous les emplacements visibles dans l'arc OSG;
- b) un satellite OSG *spécifique*.

La première méthode (voir l'Annexe 3) sert à déterminer si un système HEO respecte les limites de puissance surfacique équivalente (epfd) dans les bandes de fréquences où s'appliquent les limites d'epfd visées à l'Article 22 du Règlement des radiocommunications (RR). La seconde (voir l'Annexe 5) sert à évaluer le brouillage entre un réseau OSG *spécifique* et un satellite du SFS du type HEO.

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que, dans la grande majorité des projets de système à satellite à orbite terrestre élevée (HEO, *high Earth orbit*), l'apogée de chaque satellite correspond au point de latitude le plus élevé sur son orbite et que chaque satellite émet uniquement lorsqu'il se trouve dans un arc «actif» autour de l'apogée;
- b) que le paramètre essentiel pour déterminer le cas le plus défavorable de brouillage entre un système HEO et un système OSG est l'espacement angulaire minimal pour lequel un satellite HEO actif est vu par une station terrienne fonctionnant avec un satellite OSG;
- c) que l'angle sous-tendu à la surface de la Terre entre un satellite HEO et un point de l'OSG varie avec la latitude et la longitude du point à la surface de la Terre. Aussi l'espacement angulaire à une station terrienne d'un réseau OSG entre le satellite vers lequel elle émet et un satellite HEO varie-t-il avec la latitude et la longitude de cette station terrienne;
- d) que la détermination de l'espacement angulaire minimal entre un système HEO et un réseau OSG permettrait d'évaluer préalablement plus facilement les possibilités pour un système HEO d'utiliser en partage une bande avec des systèmes OSG;
- e) que dans les bandes de fréquences dans lesquelles s'appliquent les limites d'epfd visées à l'Article 22 du Règlement des radiocommunications (RR), les systèmes non OSG et les systèmes HEO y compris, sont obligés de respecter les limites d'epfd↓ en tout point de la surface de la Terre, compte tenu des liaisons descendantes provenant de tout emplacement visible dans l'arc OSG (qu'il existe ou non alors un satellite OSG à la longitude correspondant au cas le plus défavorable);
- f) que pour les systèmes HEO visés à l'alinéa a) du *considérant*, exploités dans les bandes de fréquences auxquelles s'appliquent les limites d'epfd visées à l'Article 22 du RR, l'epfd maximale correspond à l'espacement angulaire minimum à la surface de la Terre entre un satellite HEO dans son arc actif et la longitude OSG correspondant au cas le plus défavorable, et se produit lorsqu'un

satellite HEO se trouve au début ou à la fin de son arc actif (c'est-à-dire au point le plus bas en latitude dans l'arc actif);

g) que dans les bandes de fréquences auxquelles ne s'appliquent pas les limites d'epfd visées à l'Article 22 du RR, le partage de fréquences entre un système HEO et un réseau OSG spécifique exige en règle générale que soit calculé l'espacement angulaire minimum à la surface de la Terre entre un satellite HEO dans son arc actif et l'emplacement du satellite OSG spécifique;

h) que pour les systèmes HEO visés à l'alinéa a) du *considérant*, le calcul mentionné à l'alinéa g) du *considérant* donne un espacement angulaire minimum à la surface de la Terre entre un satellite HEO dans son arc «actif» et le satellite OSG spécifique, qui ne se produit pas nécessairement lorsque le satellite HEO est au début ou à la fin de son arc «actif»,

recommande

1 d'utiliser la méthode décrite dans l'Annexe 1 pour calculer l'espacement angulaire pour lequel un satellite HEO donné dans son arc actif est «vu» depuis une station terrienne donnée fonctionnant avec un satellite OSG donné, puis de calculer l'espacement angulaire minimum à la surface de la Terre en tenant compte de tous les emplacements possibles de la station terrienne et de toutes les longitudes possibles du satellite OSG;

2 d'utiliser l'Annexe 2 pour déterminer l'augmentation de la température de bruit de la liaison OSG imputable au brouillage causé par le satellite HEO;

3 d'utiliser éventuellement la méthode décrite à l'Annexe 5 pour calculer l'espacement angulaire minimum auquel un satellite HEO donné dans son arc «actif» est «vu» par une station terrienne donnée fonctionnant avec un satellite OSG spécifique.

NOTE 1 – Dans l'Annexe 3, les méthodes décrites dans les Annexes 1 et 2 sont appliquées par itération pour déterminer l'espacement angulaire minimal pour lequel un satellite actif d'un système HEO donné peut être vu par une station terrienne fonctionnant avec un satellite OSG et donc calculer le cas le plus défavorable d'augmentation de la température de bruit de la liaison OSG.

NOTE 2 – L'Annexe 4 donne des exemples d'application des Annexes 1 à 3.

NOTE 3 – L'Annexe 6 donne des exemples d'application de l'Annexe 5.

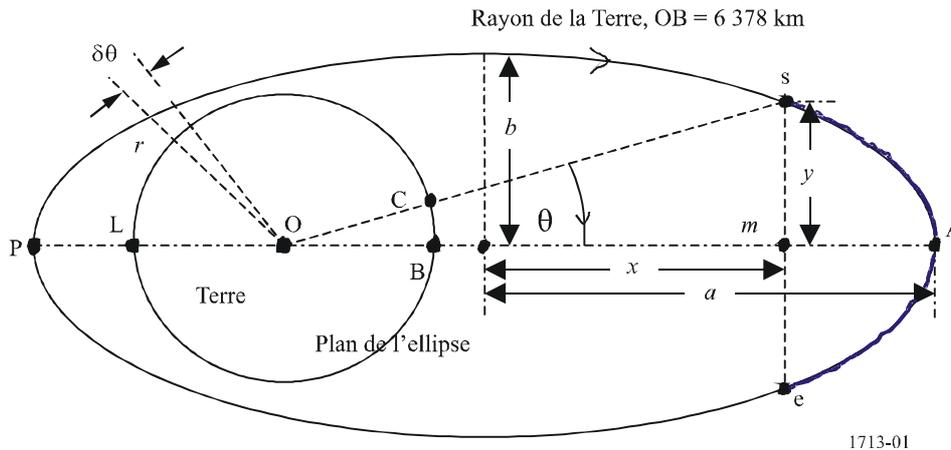
Annexe 1

Méthode de calcul de l'angle minimum, sous-tendu à la surface de la Terre, entre un satellite HEO se trouvant à l'intérieur de son axe actif et la partie visible de l'orbite géostationnaire

La Fig. 1 est une illustration en deux dimensions du trajet qu'emprunte un satellite en orbite autour de la Terre. En règle générale, l'orbite sera une orbite elliptique dont l'un des deux foyers coïncide avec le centre de gravité, O, de la Terre et dont le plan est incliné par rapport au plan équatorial de la Terre. (L'OSG est un cas particulier dans lequel l'ellipse devient un cercle dans le plan de l'équateur.)

FIGURE 1

Géométrie plan d'une orbite elliptique



Dans la plupart des systèmes HEO, un satellite sur une orbite de ce type émettra (ou recevra) uniquement lorsqu'il se trouve à l'intérieur d'un arc limité contenant l'apogée, A. Par conséquent, il ne causera (ou ne subira) de brouillage que lorsqu'il se trouvera à l'intérieur de cet arc appelé communément l'arc actif. Les systèmes HEO, dans leur grande majorité, sont conçus de façon à ce que l'apogée corresponde au point de latitude le plus élevé sur l'orbite et, en pareil cas, les niveaux de brouillage maximal peuvent être observés lorsque le satellite entre dans ou sort de son arc actif. La longueur de l'arc actif varie d'un système à l'autre. Dans la Fig. 1, le début de l'arc actif correspond à s et la fin à e. La dynamique de l'orbite est telle que le satellite se déplace rapidement dans la région du périégée, P, et relativement lentement dans la région de l'apogée. (En fait, la zone balayée par le vecteur rayon, r , par unité de temps, $(r^2/2)(\delta\theta/\delta t)$, est constante sur toute l'orbite.)

Etape 1: La première étape consiste à déterminer la longueur Os, à partir des caractéristiques fondamentales de l'orbite.

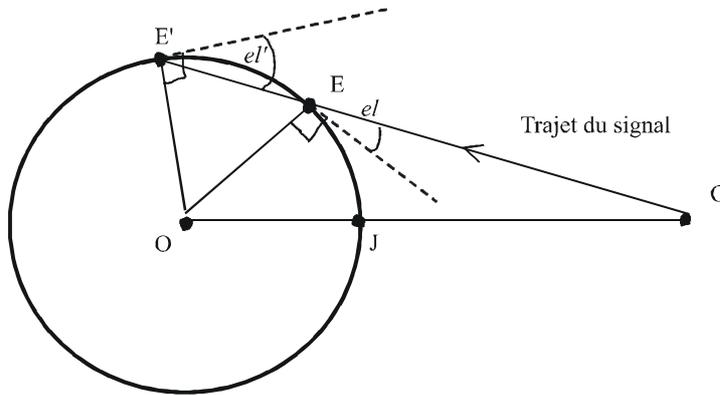
Les informations habituellement fournies à l'UIT-R concernant un système HEO sont les suivantes: hauteur de l'apogée (AB (km)); hauteur du périégée (PL (km)); excentricité, e ; inclinaison, i degrés; anomalie vraie du début (et de la fin) de l'arc actif (angle POs dans la Fig. 1, c'est-à-dire, $180^\circ - \theta^\circ$).

A la place des anomalies vraies de s et e, on indique souvent le temps que le satellite met pour aller de s à l'apogée et pour revenir de l'apogée à e, par exemple ± 4 h. Dans ces cas, on peut calculer la valeur de θ à l'aide d'une simulation par pas temporels ou d'une intégration basée sur le fait que $(r^2/2)(\delta\theta/\delta t)$ est constant, mais les deux formules sont relativement complexes. Pour les études de l'UIT-R, il est habituellement plus commode d'indiquer l'anomalie vraie de s (ou de e) ou encore l'angle θ et c'est cette hypothèse qui est faite dans la présente Recommandation; toutefois, la version électronique du tableur EXCEL annexée à la présente Recommandation contient un programme Visual Basic permettant de déduire la valeur de θ à partir du moment avant l'apogée où le satellite atteint s (ou du moment après l'apogée où le satellite atteint e).

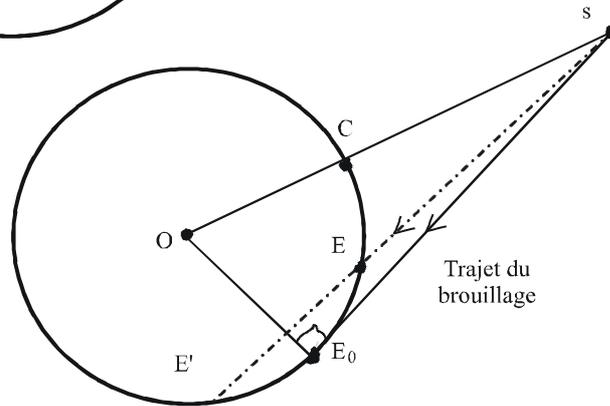
On notera que les renseignements qu'il faut fournir au Bureau des radiocommunications au titre de l'Appendice 4 du RR pour toute notification d'un système à satellites non OSG comprennent la hauteur de l'apogée, la hauteur du périégée et l'excentricité mais pas, actuellement, les limites de l'arc actif qui ne concernent que les systèmes non OSG de la catégorie HEO. Toutefois, pour les systèmes non OSG (qui comprennent implicitement les systèmes HEO) que l'on envisage d'exploiter dans les bandes auxquelles s'appliquent les limites d'epfd indiquées dans l'Article 22 du RR, l'un des paramètres à fournir au titre de l'Appendice 4 du RR est la hauteur minimale au-dessus de la surface de la Terre à laquelle un satellite quelconque du système émet. Pour un satellite HEO, cette hauteur correspond à sC dans la Fig. 1.

A partir de la Fig. 1, en utilisant l'équation d'une ellipse et la trigonométrie plane, on obtient une équation quadratique pour x exprimée en termes de AB , PL , e et θ ; on résout cette équation pour x et on peut alors déduire la longueur Os à partir du triangle Oms .

FIGURE 2
Extraits de triangle plan



Il est improbable qu'une liaison OSG soit conçue pour fonctionner avec un angle d'élévation (el) inférieur à 5° , ce qui donne pour $E'G$ une valeur de 41 124,624 km. el' peut être supérieur à 5° , mais $E'G$ dépasse manifestement cette longueur. Par conséquent, la condition pour que E soit «visible» pour G est que $35\,786 \text{ km} \leq EG < 41\,124,624 \text{ km}$



E est visible pour s mais pas E' qui est occulté par la Terre. E_0 est situé sur le contour pour lequel s a un angle d'élévation de 0° . Le triangle OsE_0 est un triangle rectangle et on a donc $sE_0 = ((Os)^2 - (6\,378)^2)^{0.5}$. Ainsi la condition pour que E soit visible pour s est $sE < ((Os)^2 - (6\,378)^2)^{0.5}$.

1713-02

Etape 2: L'Etape suivante consiste à trouver la latitude de s et sa longitude par rapport à la longitude de l'apogée simultanée, ce qui peut être fait à l'aide de la Fig. 3. Il s'agit d'une représentation en trois dimensions de l'orbite qui utilise les mêmes symboles que dans la Fig. 1. La valeur de Os est celle calculée dans l'Etape 1. En appliquant la règle du cosinus sphérique aux triangles sphériques $OBCD$ et $CODF$ dans la Fig. 3 puis la règle du sinus sphérique au triangle sphérique $ONBC$, on peut déduire que la longitude de s par rapport à A (α_C) et sa latitude (λ_C) sont données par l'équation suivante:

$$\alpha_C = -\angle FOD = -\text{tg}^{-1}(\text{tg}(\theta) / \cos(i)) \quad \text{et} \quad \lambda_C = \angle FOC = \cos^{-1}(\sin(\theta) / \sin(\alpha_C))$$

FIGURE 3

Coordonnées géographiques du début de l'arc actif d'un satellite HEO

Pour A, B, C, L, O, P, s et θ , voir la Fig. 1.

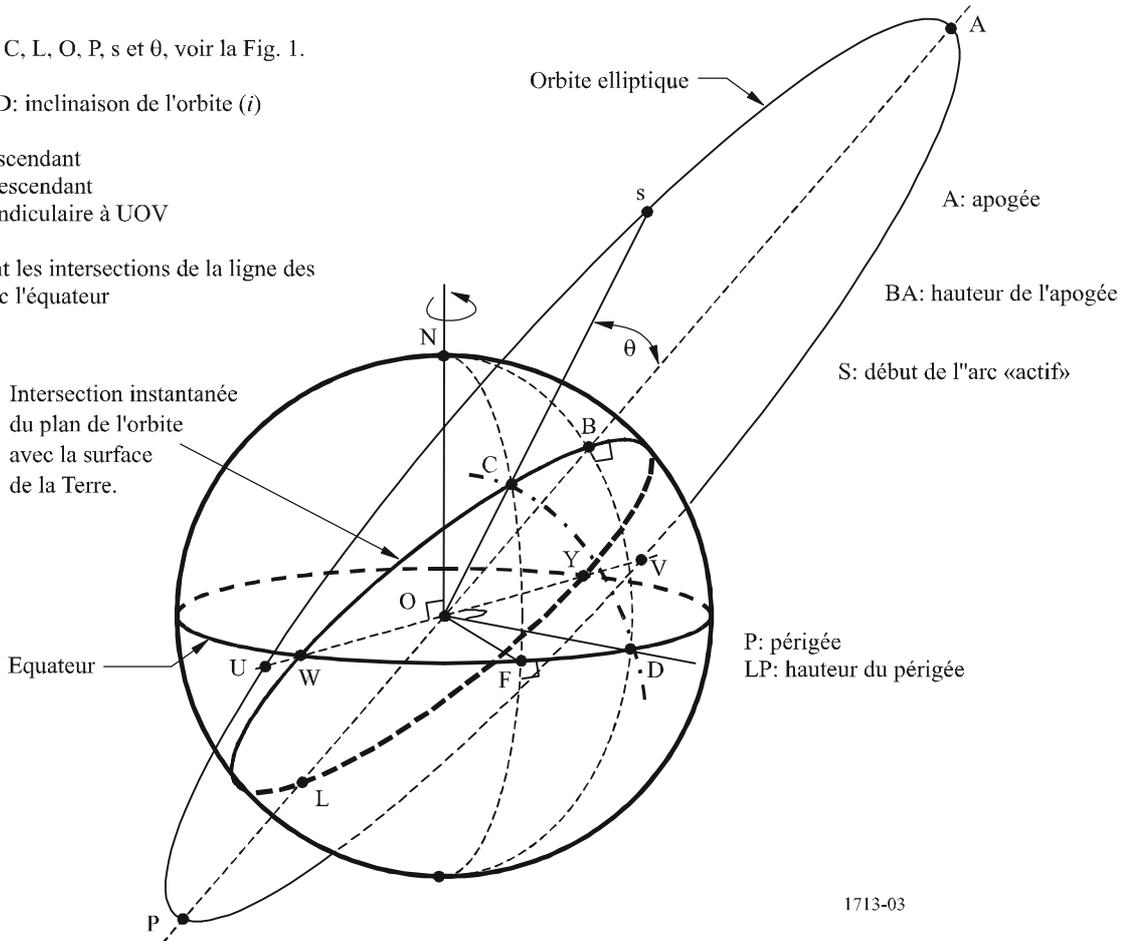
Angle BOD: inclinaison de l'orbite (i)

U: nœud ascendant

V: nœud descendant

OD: perpendiculaire à UOV

W et Y sont les intersections de la ligne des nœuds avec l'équateur



1713-03

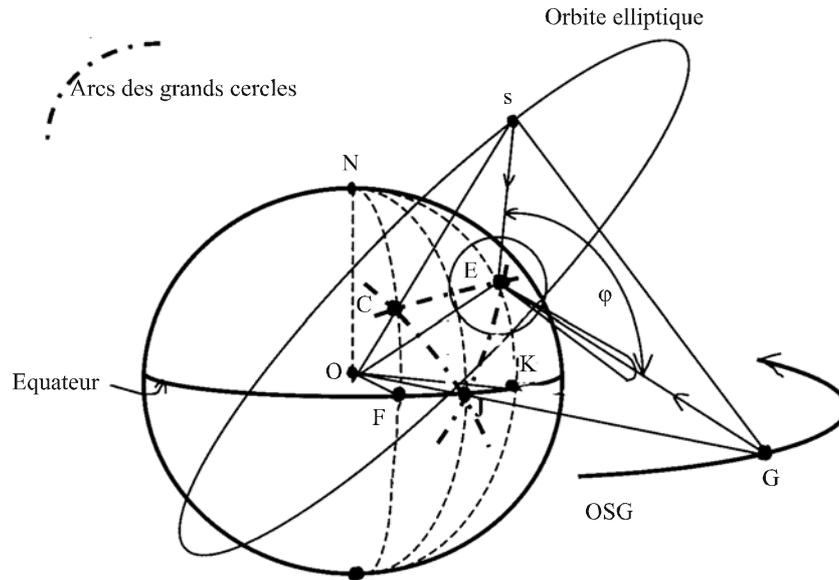
Etape 3: Après avoir trouvé la latitude et la longitude relative instantanée de s, on peut calculer l'espacement angulaire de brouillage correspondant (φ) mesuré au niveau de toute station terrienne, E, fonctionnant avec un satellite géostationnaire, G. Pour ce faire, on utilise la Fig. 4, dans laquelle les points C, O, F, N et s sont identiques à ceux de la Fig. 3. Ainsi, dans la Fig. 4, la latitude de E est λ_E , sa longitude relative par rapport à la longitude de A est α_E et la longitude de G par rapport à la longitude de A est α_G . Par conséquent, étant donné que α_C , α_E , λ_C , λ_E , α_G , OE (rayon de la Terre), OG (rayon OSG) et Os sont connus ou ont été calculés,

- en appliquant la règle du cosinus sphérique au triangle sphérique ONCE, puis la règle du cosinus plan au triangle plan OsE, on peut calculer la longueur sE;
- en appliquant la règle du cosinus sphérique au triangle sphérique OCFJ, puis la règle du cosinus plan au triangle plan OsG, on peut calculer la longueur sG; et
- en appliquant la règle du cosinus sphérique au triangle sphérique OEJK, puis la règle du cosinus plan au triangle plan OEG, on peut calculer la longueur EG.

Enfin, dans le triangle plan EsG, étant donné que les trois côtés sE, sG et EG ont été calculés, on peut calculer l'angle φ en utilisant la règle du cosinus plan.

FIGURE 4

Géométrie du brouillage causé par un satellite HEO au début de l'arc actif à une station terrienne d'un réseau OSG (c'est-à-dire trajet sE)



C, F, N, O et s: voir la Fig. 3

G: satellite géostationnaire

E: station terrienne recevant des signaux depuis G

1713-04

Ainsi, à l'aide de cette méthode, on peut calculer l'espacement angulaire de brouillage, ϕ , pour toute liaison descendante OSG (c'est-à-dire pour une station terrienne située en un lieu géographique quelconque et recevant des signaux depuis un satellite OSG sur une longitude quelconque), si l'angle d'inclinaison du satellite HEO, la hauteur de l'apogée, la hauteur du périégée, l'excentricité et l'anomalie vraie ou le temps qui s'écoule entre le moment où le satellite passe par son apogée et celui où il entre dans (ou quitte) l'arc actif sont connus.

Pour trouver la valeur minimale de ϕ , on peut écrire un programme informatique simple à faire tourner pour une série de combinaisons de α_E , λ_E et α_G , on utilise la procédure ci-dessus pour calculer ϕ pour chaque combinaison puis on choisit la valeur la plus faible. Etant donné que le brouillage ne peut se produire que pour des combinaisons de α_E , λ_E et α_G pour lesquelles E est visible à la fois pour G et s (voir la Fig. 4), mais que toutes ces combinaisons doivent être étudiées, on fait en sorte, par commodité, que le programme couvre des fourchettes importantes de valeurs des trois variables puis on exclut des calculs les combinaisons où E, occulté par la Terre, n'est pas visible pour G ou pour s ou pour les deux. Ceci est illustré dans les extraits de triangle plan, dérivés de la Fig. 4 et indiqués dans la Fig. 2.

Annexe 2

Calcul de l'augmentation du bruit sur une liaison OSG imputable au brouillage causé par un satellite HEO entrant dans son arc actif

Il ressort de la Fig. 4 que les signaux brouilleurs émis par un satellite HEO en s à la liaison entre un satellite géostationnaire en G et une station terrienne en E atteindront le récepteur de cette station

terrienne par le lobe latéral de l'antenne. L'augmentation correspondante de la température de bruit de la liaison OSG est donnée par l'équation:

$$10 \log((\Delta T/T)/100) = E_1 - 20 \log(4\pi d/\lambda) + G(\varphi) - 10 \log(kT) \quad \text{dB}$$

où:

- $\Delta T/T$: augmentation du bruit de la liaison exprimée sous forme d'un pourcentage
- E_1 : densité de p.i.r.e. de la porteuse émise par un satellite HEO, (dB(W/Hz))
- d : longueur du trajet de brouillage sE (m)
- λ : longueur d'onde (m) = $(0,3)/f$ où f est la fréquence porteuse du satellite HEO (GHz)
- $G(\varphi)$: gain de réception de l'antenne de la station terrienne à la fréquence f et à l'angle hors axe φ (dBi)
- T : température de bruit de la liaison OSG (K)
- k : constante de Boltzmann, c'est-à-dire $10 \log(k) = -228,6$ dB(W/Hz/K).

T peut être la température de bruit de la liaison descendante OSG uniquement ou la température de bruit du système OSG rapportée à l'entrée du récepteur de la station terrienne, selon la façon dont on préfère exprimer $\Delta T/T$.

Pour calculer $G(\varphi)$, étant donné que la méthode décrite dans la présente Annexe concerne le brouillage entre un système non OSG et un système OSG, il convient d'utiliser les diagrammes de gain prescrits dans la Recommandation UIT-R S.1428, où $G(\varphi)$ est exprimé en fonction de D/λ , D étant le diamètre d'antenne (m).

Annexe 3

Mise en œuvre par itération de la méthode décrite dans l'Annexe 1

Dans la pièce jointe («MinseparationHEOangle») à la présente Annexe, la méthode décrite dans l'Annexe 1 est mise en œuvre dans un tableur EXCEL qui contient des programmes Visual Basic à faire tourner pour toutes les combinaisons de latitude et de longitude de station terrienne et de longitude de satellite OSG pour lesquelles le satellite OSG et le début de l'arc actif du système HEO sont simultanément visibles. On détermine ensuite l'espacement angulaire minimal au niveau de la station terrienne pour lequel il pourrait y avoir brouillage mutuel. Par commodité pour l'utilisateur, les étapes simples décrites dans l'Annexe 2 sont intégrées dans le tableur afin d'avoir en sortie un résultat donnant la valeur maximale de $\Delta T/T$ imputable à ce brouillage, si nécessaire. Il ressort des exemples donnés dans l'Annexe 4 que le tableur couvre tous les types d'orbite avec un arc actif limité, à condition que l'arc ne coupe pas de droite entre le système OSG et la surface de la Terre, à une latitude de $\pm 81,3^\circ$.

Les seules données d'entrée nécessaires sont les paramètres suivants du système HEO:

- hauteur de l'apogée (km);
- hauteur du périogée (km);
- excentricité (fraction décimale);
- angle d'inclinaison de l'orbite (degrés);

- un (ou plus) des trois paramètres suivants pour définir le début s (ou la fin «e») de l'arc actif, c'est-à-dire:
 - angle géocentrique entre s et l'apogée (degrés),
 - ou temps qu'il faut au satellite pour aller de s à son apogée (h)¹,
 - ou hauteur de s (km).

Si l'utilisateur souhaite calculer la valeur correspondante de $\Delta T/T$, les paramètres d'entrée supplémentaires suivants sont nécessaires:

- la densité de p.i.r.e. maximale du satellite HEO (dB(W/Hz));

et les paramètres suivants pour la liaison OSG:

- diamètre (m) de l'antenne de la station terrienne de la liaison OSG;
- diagramme de gain à la réception de l'antenne de la station terrienne de la liaison OSG (dBi, en fonction de l'angle hors axe);
- la température de bruit de la liaison OSG (K);
- et enfin la fréquence (GHz).



MinseparationHEOa
ngle.xls

Annexe 4

Exemples d'application de la méthode décrite à l'Annexe 1

Les rangées 2 et 8 du Tableau 1 donnent les caractéristiques orbitales de 12 projets de systèmes HEO différents, établis à partir de données soumises à l'UIT-R. Pour illustrer de tels systèmes, on compare (voir les Fig. 5 à 7) leurs types de trace au sol. La rangée 11 du Tableau 1 donne les valeurs de la longitude de l'apogée qui ont été utilisées pour élaborer les Fig. 5 à 7; ces valeurs ne sont choisies que pour les besoins de l'illustration.

¹ La pièce jointe comprend un programme Visual Basic supplémentaire pour pouvoir utiliser cet élément de données, s'il est entré. Dans ce cas, on calcule non seulement l'espacement angulaire mais aussi les emplacements absolus de la station terrienne et du satellite OSG correspondant à cet angle, à condition que la longitude de l'apogée du système HEO soit fournie comme donnée d'entrée supplémentaire. Voir le fichier EXCEL associé appelé «MinseparationHEOangle».

TABLEAU 1

1. Système HEO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2. Hauteur de l'apogée (km)	35 970	44 640,5	39 000	35 800	52 700	40 000	50 400	27 288,3	20 180	47 669	39 300	27 470
3. Hauteur du périégée (km)	4 500	26 931,5	500	35 800	18 900	31 600	21 200	517,4	20 180	9 312,9	1 075	310
4. Excentricité de l'orbite	0,59	0,21	0,74	0	0,4	0,1	0,347	0,66	0	0,55	0,72	0,67
5. Inclinaison de l'orbite (degrés)	50	42,5	63,43	63,4	60	40	63,4	63,435	63,4	45	63,4	45
6. Angle de s par rapport à l'apogée (degrés)	35	31	(29,5)	60	(30)	37	(24)	40	(30)	(36)	25	(28)
7. Temps pour aller de s à l'apogée (h)	(-3,13)	(-3)	-3,5	(-4)	-4	(-2,95)	-3	(-2,55)	-1	(-4,5)	(-3,06)	-2
8. Hauteur de s (km)	(27 200)	(42 800)	(26 900)	N/A	(48 000)	(39 000)	(47 900)	(16 500)	N/A	(37 800)	(30 700)	(21 400)
9. Espacement angulaire minimal (degrés)	39,84	35,84	52,58	26,94	49,35	31,34	55,49	40,66	51,84	(35,47)	55,55	37,73
10. Vérification par simulation (degrés)	(39,78)	(35,78)	(52,50)	(26,86)	(49,25)	(31,40)	(55,47)	(40,91)	(51,86)	(35,51)	(55,49)	(37,26)
11. Longitude de l'apogée (degrés E)	-150	-108	-62	-43	-130	-38	-110	-83	-30	-18	27	57
12. Longitude de la station terrienne (degrés E)	-117,63	-110,81	14,89	17,33	-43,32	38,65	-34,89	-75,38	-35,33	76,63	101,86	82,72
13. Latitude de la station terrienne (degrés N)	73,63	-46,70	3,72	-7,73	-3,15	-5,44	-2,01	73,63	73,63	-5,44	2,58	73,63
14. Longitude du satellite OSG (degrés E)	-150,29	-102,22	-61,32	-58,88	-119,52	-37,55	-111,09	-108,04	-67,99	3,42	25,66	50,06
15. Exemple de rapport $\Delta T/T$ (%) ⁽¹⁾	0,204	0,072	0,150	0,200	0,058	0,108	0,058	0,572	0,386	0,043	0,122	0,312

⁽¹⁾ Valeurs calculées sur la base de l'Annexe 2 pour $E_1 = -21$ dB(W/Hz), $D = 3$ m, $T = 100$ K, $f = 11$ GHz et $G(\phi)$ de la Recommandation UIT-R S.1428-1.

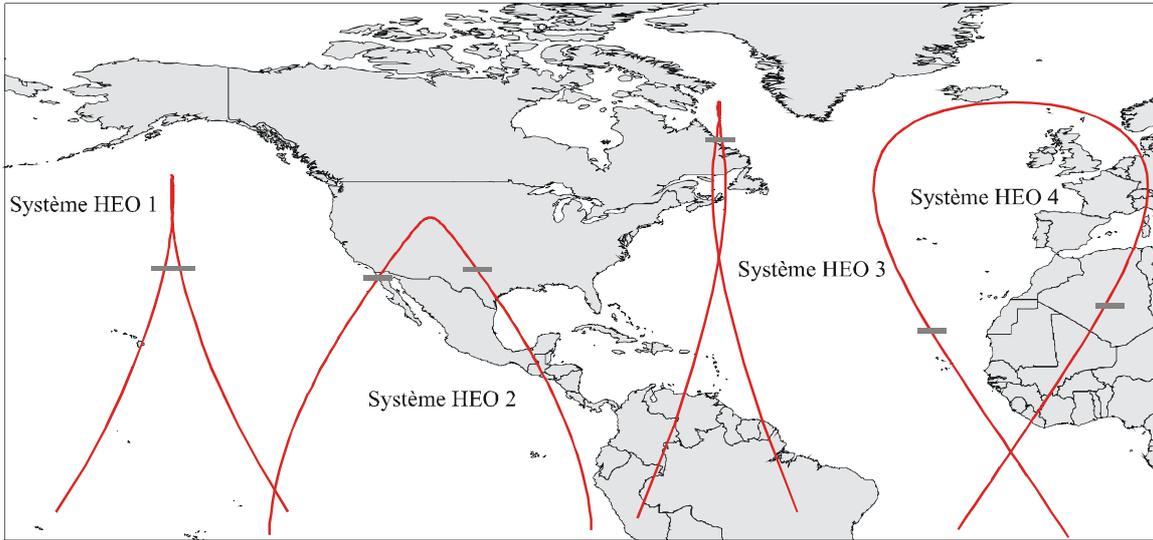
N/A = indisponible.

Les rangées 6, 7 et 8 correspondent à différentes façons d'indiquer le début (ou la fin) de l'arc actif. Dans ces trois rangées, les valeurs qui ne sont pas entre crochets correspondent à celles qui ont été soumises à l'UIT-R; celles entre crochets ont été obtenues à partir d'une simulation informatique pour chacun de ces systèmes: on s'arrête, à chaque cycle, à la valeur ne figurant pas entre crochets et on note les deux valeurs entre crochets correspondantes. Les chiffres dans la rangée 9 ont été obtenus à partir de l'Annexe 3 et on a utilisé les valeurs ne figurant pas entre crochets pour déterminer le début de l'arc actif. (Lorsqu'on a utilisé les valeurs entre crochets dans l'Annexe 3, on a obtenu des résultats légèrement différents mais ces différences sont restées dans les limites de précision des calculs effectués.) On a vérifié chaque résultat par simulation informatique, et on a ainsi obtenu les espacements angulaires minimaux indiqués en italiques dans la rangée 10; comme on peut le voir, ils concordent avec les valeurs de la rangée 9 et confirment donc la validité de l'Annexe 3.

Par ailleurs, en utilisant les valeurs de longitude de l'apogée figurant dans la rangée 11, on a obtenu la combinaison des emplacements de la station terrienne et du satellite OSG à laquelle correspondrait l'angle minimum hors axe dans chaque cas, et les résultats sont donnés dans les rangées 12, 13 et 14 du Tableau 1.

FIGURE 5

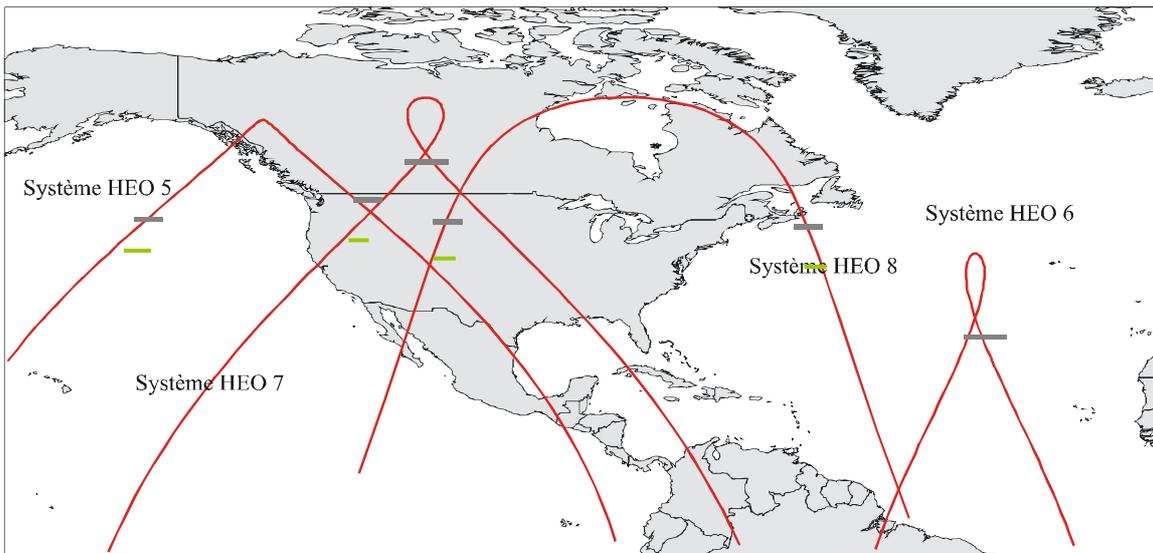
Parties des traces à la surface de la Terre des systèmes HEO 1 à 4, montrant les arcs actifs (c'est-à-dire au-dessus de ---)



1713-05

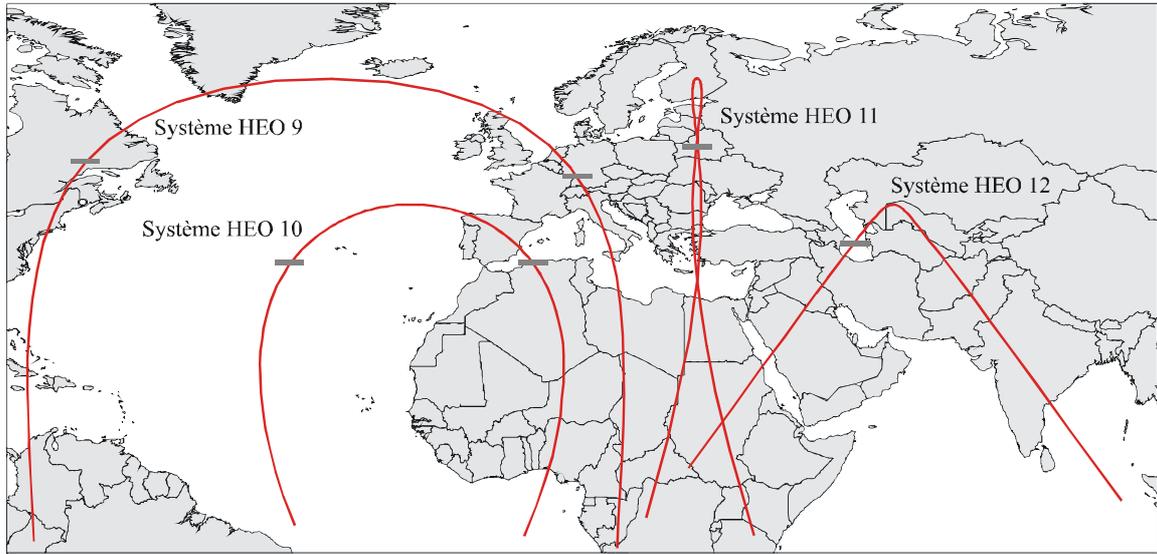
FIGURE 6

Parties des traces à la surface de la Terre des systèmes HEO 5 à 8, montrant les arcs actifs



1713-06

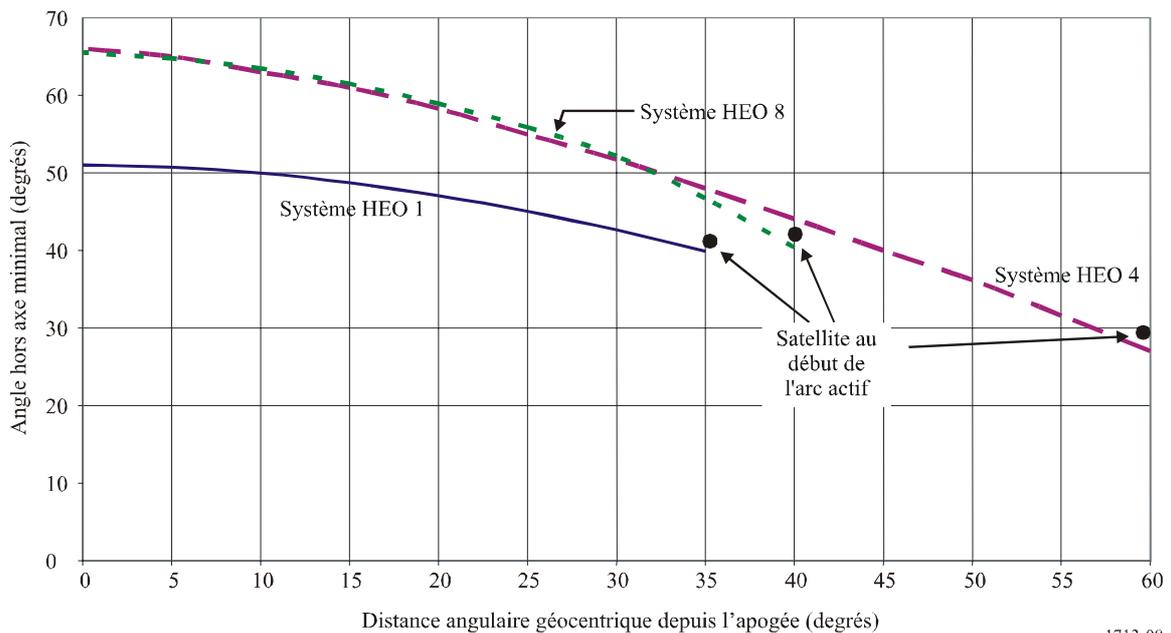
FIGURE 7
Parties des traces à la surface de la Terre des systèmes HEO 9 à 12, montrant les arcs actifs



1713-07

Enfin, l'Annexe 3 permet de vérifier la véracité de l'alinéa c) du *considérant* dans les cas pris pour exemples. Cela a été fait pour les systèmes 1, 4 et 8, l'objectif étant d'englober tous les types de systèmes en calculant l'angle minimal hors axe (ou espacement angulaire minimal) pour des valeurs de l'angle géocentrique, θ , entre un satellite HEO et l'apogée progressivement réduites. Les résultats sont représentés graphiquement à la Fig. 8.

FIGURE 8
Variation de l'angle hors axe minimal en fonction de la distance du satellite HEO par rapport à l'apogée



1713-08

La Fig. 8 montre clairement que, pour des systèmes HEO types, plus le satellite est éloigné de l'apogée de son orbite, et plus petit est l'angle hors axe minimal auquel il est vu par des stations terriennes fonctionnant théoriquement avec un satellite géostationnaire situé à la longitude la pire dans l'arc OSG pour l'orbite de ce satellite HEO particulier.

Annexe 5

Méthode de calcul de l'angle minimum, sous-tendu à la surface de la Terre à l'intérieur de l'empreinte d'un faisceau d'un satellite géostationnaire à une longitude donnée, entre ce satellite et un satellite HEO à l'intérieur de son arc actif

1 Géométrie plane d'une orbite elliptique

La Fig. 9 est une illustration bidimensionnelle du trajet suivi par un satellite HEO en orbite autour de la Terre. Les paramètres souvent utilisés pour définir l'emplacement instantané d'un satellite de ce type à l'intérieur de son orbite, c'est-à-dire l'anomalie moyenne, M , l'anomalie excentrique, E , et l'anomalie vraie, f , sont donnés par les expressions² suivantes, où les symboles sont définis comme suit:

$$M = 2\pi t/T \text{ rad}$$

$$M = E - e \sin(E) \text{ rad} \quad (\text{équation de Kepler})$$

$$f = 2 \tan^{-1}(\{(1+e)/(1-e)\}^{0,5} \tan(E/2)) \text{ rad}$$

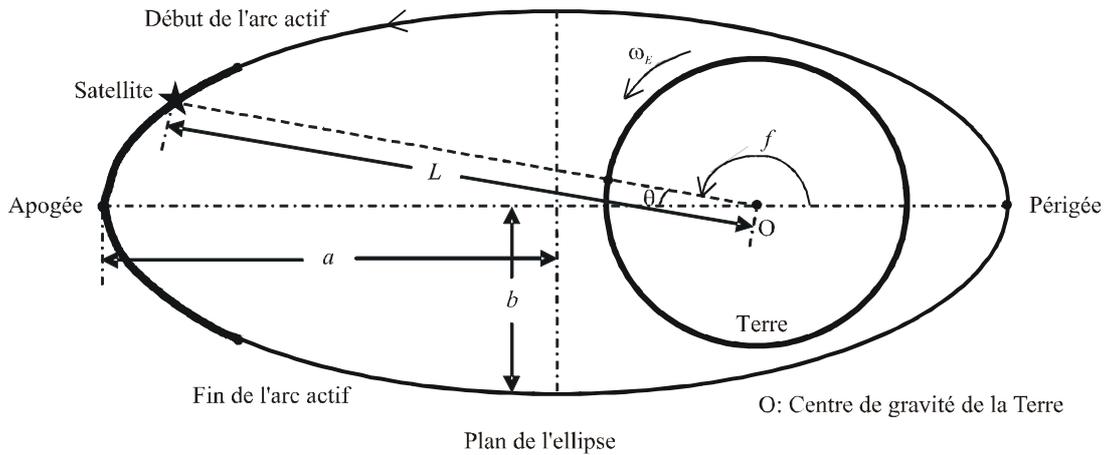
On peut en déduire par ailleurs que la longueur L entre un satellite HEO «actif» et le centre de gravité de la Terre est donnée par:

$$L = a(1 - e \cos(E)) \quad \text{km}$$

² Voir l'Annexe 1 de la Recommandation UIT-R S.1529.

FIGURE 9

Géométrie plane d'une orbite elliptique



- a : Grand rayon (km)
- b : Petit rayon (km)
- i : Angle d'inclinaison (rad)
- e : Excentricité
- f : Anomalie vraie (rad)
- E : Anomalie excentrique (rad)

- t : Temps ($t = 0$: périégée) (s)
- T : Période orbitale (s)
- θ : Angle par rapport à l'apogée (rad)
- ω_E : Vitesse angulaire de rotation de la Terre (rad/s)

1713-09

2 Calcul des coordonnées géographiques d'un satellite HEO «actif»

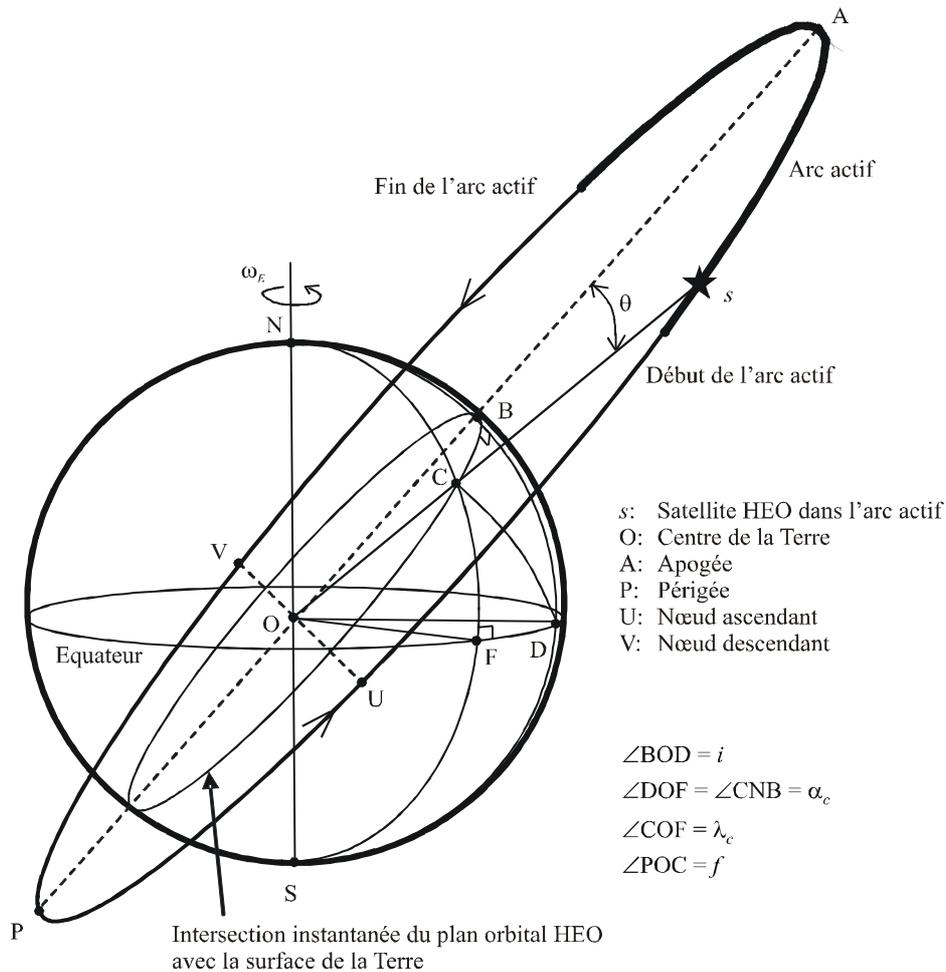
En appliquant la méthode décrite à l'Annexe 1, Etape 2, on peut calculer la latitude, λ_C , et une longitude relative, α_C , d'un satellite HEO «actif». Par ailleurs, sa longitude absolue, α , est donnée par l'expression suivante:

$$\alpha = \alpha_C + \alpha_{apogée} - \omega_E(t - t_{apogée}) \quad \text{rad}$$

$t_{apogée}$: temps à l'apogée (s)

$\alpha_{apogée}$: longitude de l'apogée (rad).

FIGURE 10
Coordonnées géographiques d'un satellite HEO



1713-10

3 Calcul de l'espacement angulaire minimum

En employant la méthode décrite à l'Annexe 1, Etape 3, il est possible de calculer l'espacement angulaire, ϕ , entre un satellite HEO «actif» et un satellite OSG spécifique, pour une station terrienne située en n'importe quel endroit géographique et recevant l'émission du satellite OSG, si on connaît l'angle d'inclinaison du satellite HEO, la hauteur à l'apogée, la hauteur au périgée, l'excentricité, la longitude de l'apogée et la longitude du satellite OSG.

FIGURE 11

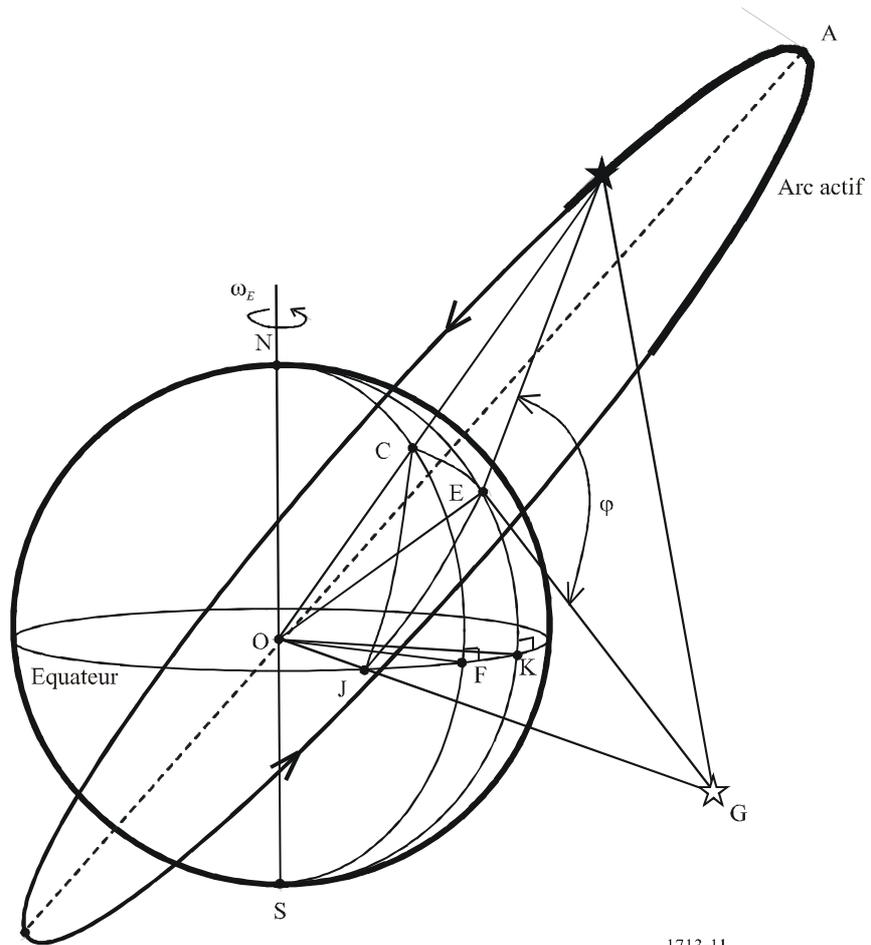
Espacement angulaire entre un satellite HEO et un satellite OSG par rapport à une station terrienne OSG à E

- s: Satellite HEO dans l'arc actif
- G: Satellite OSG
- E: Station terrienne OSG
- O: Centre de gravité de la Terre
- φ : Espacement angulaire
- α_C : Longitude du satellite HEO
- α_E : Longitude de la station terrienne OSG
- α_G : Longitude du satellite OSG
- λ_E : Latitude de la station terrienne OSG
- λ_C : Latitude du satellite HEO
- L: Distance entre s et O
- H_{OSG} : Altitude du satellite OSG
- R: Rayon de la Terre

$$\angle FOJ = \alpha_C - \alpha_G$$

$$\angle KOF = \angle CNE = \alpha_E - \alpha_C$$

$$\angle KOJ = \alpha_E - \alpha_G$$



1713-11

On notera que dans l'Annexe 1, α_E et α_G sont relatifs à α_C , tandis que dans l'Annexe 5 ces valeurs indiquent les longitudes absolues respectivement de E et de G.

Pour calculer la valeur minimale de φ , on peut écrire un programme informatique en passant en revue toute une gamme de combinaisons de α_E , λ_E et t , employant la procédure décrite à l'Annexe 1, Etape 3, pour calculer φ pour chaque combinaison, et ensuite retenir la valeur la moins élevée.

Etant donné qu'un brouillage peut se produire uniquement pour les combinaisons de α_E , λ_E et t pour lesquelles la station terrienne est visible tant pour le satellite HEO que pour le satellite OSG (mais toutes les combinaisons de ce type doivent être examinées), il convient de faire en sorte que le programme tienne compte des prolongements des trois variables, puis exclue du calcul les combinaisons où la station terrienne est cachée par la Terre soit du satellite OSG, soit du satellite HEO, ou encore des deux. (Voir l'illustration de la Fig. 2.)

Lorsque le satellite OSG n'emploie pas un faisceau à couverture mondiale, il conviendrait d'exclure les combinaisons pour lesquelles la station terrienne OSG serait à l'extérieur de la largeur de faisceau utilisable du satellite OSG.

TABLEAU 2

**Espacements angulaires minimaux pour un exemple de système OSG
doté d'un faisceau mondial**

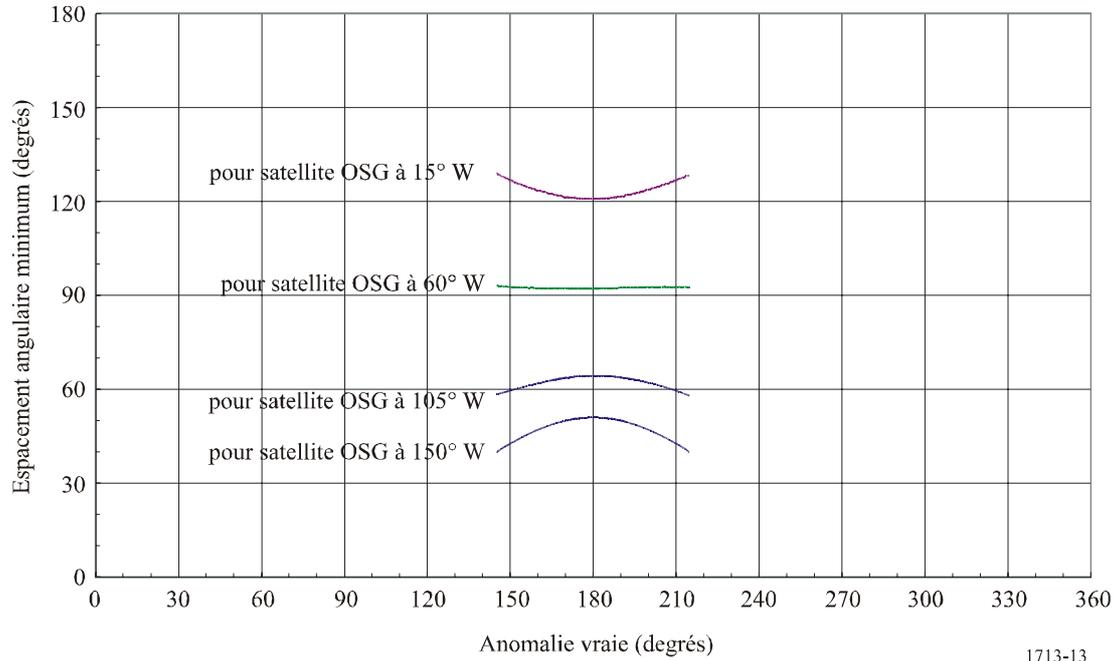
1. Système HEO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2. Hauteur de l'apogée (km)	35 970	44 640,5	39 000	35 800	52 700	40 000	50 400	27 288,3	20 180	47 669	39 300	27 470
3. Hauteur du périégée (km)	4 500	26 931,5	500	35 800	18 900	31 600	21 200	517,4	20 180	9 312,9	1 075	310
4. Excentricité de l'orbite	0,59	0,21	0,74	0	0,4	0,1	0,347	0,66	0	0,55	0,72	0,67
5. Inclinaison de l'orbite (degrés)	50	42,5	63,43	63,4	60	40	63,4	63,435	63,4	45	63,4	45
6. Longitude de l'apogée (° E)	-150	-108	-62	-43	-130	-38	-110	-83	-30	-18	27	57
7. Période de l'arc actif (h)	6,26 ⁽¹⁾	6 ⁽¹⁾	7 ⁽¹⁾	8 ⁽¹⁾	8 ⁽¹⁾	5,9 ⁽¹⁾	6 ⁽¹⁾	5,1 ⁽¹⁾	2 ⁽¹⁾	9 ⁽¹⁾	6,12 ⁽¹⁾	4 ⁽¹⁾
8. Longitude du satellite OSG (° E)	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135
9. Espacements angulaires minimums (degrés)	80,5	109,6	118,6	120,2	87,4	145,4	102,5	112,6	118,2	126,7	100,2	78,5
10. Longitude de la station terrienne (° E)	-153	76	60	-150	66	60	62	-149	59	-165	-152	-162
11. Latitude de la station terrienne (° N)	-40	62	24	18	45	22	34	-7	-6	61	35	58
12. Longitude du satellite HEO (° E)	-150,3	-114,1	-62	-43	-141,3	-38,1	-112,0	-96,8	3,7	2,6	27,3	63,4
13. Latitude du satellite HEO (° N)	38,9	35,4	63,4	63,4	48,8	40,0	62,4	59,5	54,1	36,6	63,2	38,8

⁽¹⁾ Valeurs obtenues en multipliant par deux les valeurs de la ligne 7 du Tableau 1.

Par ailleurs, les Fig. 13, 14 et 15 présentent les résultats des espacements angulaires minimaux calculés pour chaque anomalie vraie, respectivement pour les systèmes HEO 1, 4 et 8 pris comme exemples. Ces résultats montrent que l'espacement angulaire minimum entre un satellite HEO «actif» et un satellite OSG spécifique varie en fonction de la longitude du satellite OSG. En outre, ces résultats démontrent la véracité de l'alinéa h) du *considérant*; à cet égard, on peut faire observer que l'apogée intervient à une anomalie vraie de 180°, et que les courbes dans chaque Figure s'étendent de l'anomalie vraie au début de l'arc actif jusqu'à l'anomalie vraie à la fin de l'arc actif.

FIGURE 13

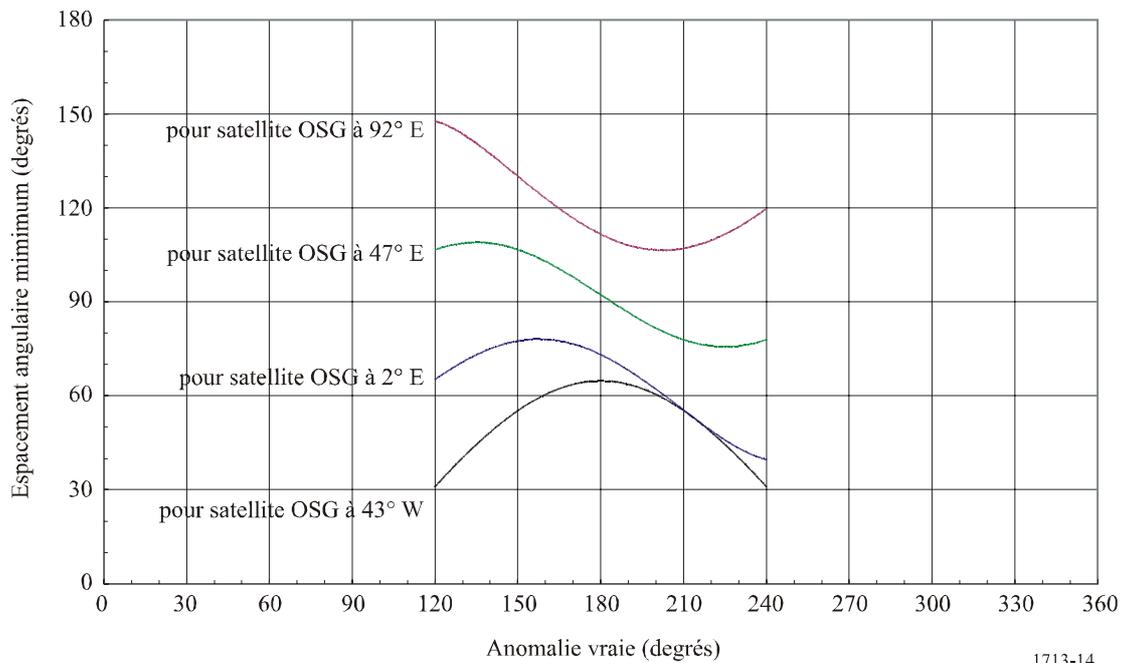
**Espacements angulaires minimaux pour l'anomalie vraie d'un satellite «actif»
d'un système HEO 1**



1713-13

FIGURE 14

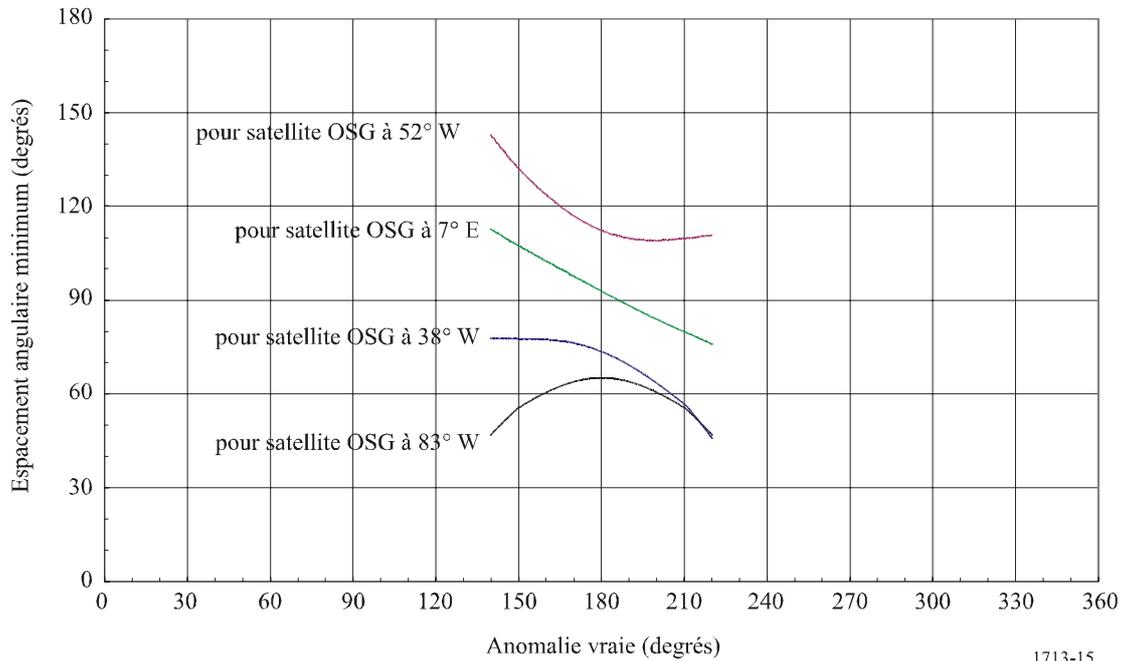
**Espacements angulaires minimaux pour l'anomalie vraie d'un satellite «actif»
d'un système HEO 4**



1713-14

FIGURE 15

Espacements angulaires minimaux pour l'anomalie vraie d'un satellite «actif» du système HEO 8



1713-15

Le Tableau 3 montre un exemple de l'empreinte d'un faisceau elliptique du satellite OSG à 135° E. Le Tableau 4 montre les résultats de l'espacement angulaire minimum trouvé entre le système HEO 4 pris comme exemple et le satellite OSG à 135° E qui possède l'empreinte de faisceau indiquée au Tableau 3. La Fig. 16 montre quant à elle l'espacement angulaire minimum pour chaque anomalie vraie dans ce cas.

TABLEAU 3

Données définissant un exemple d'empreinte de faisceau elliptique d'un satellite OSG à 135° E pris comme exemple

Longitude (° E)	Latitude (° N)	Longitude (° E)	Latitude (° N)	Longitude (° E)	Latitude (° N)
75,7	39,9	74,3	6,3	103,0	29,5
73,3	37,4	77,7	4,8	104,0	32,5
71,1	34,8	81,8	4,4	104,6	35,5
69,1	32,2	85,7	5,4	104,8	38,6
67,8	29,2	88,7	7,5	104,0	41,6
67,2	26,1	91,3	9,9	101,7	44,1
66,9	23,1	93,7	12,4	98,1	45,6
66,7	20,1	95,7	15,1	94,0	46,1
67,0	17,0	97,3	17,9	89,9	45,8
67,7	13,9	98,8	20,8	86,0	44,9
69,1	11,1	100,3	23,7	82,1	43,7
71,4	8,5	101,7	26,5	78,7	42,1

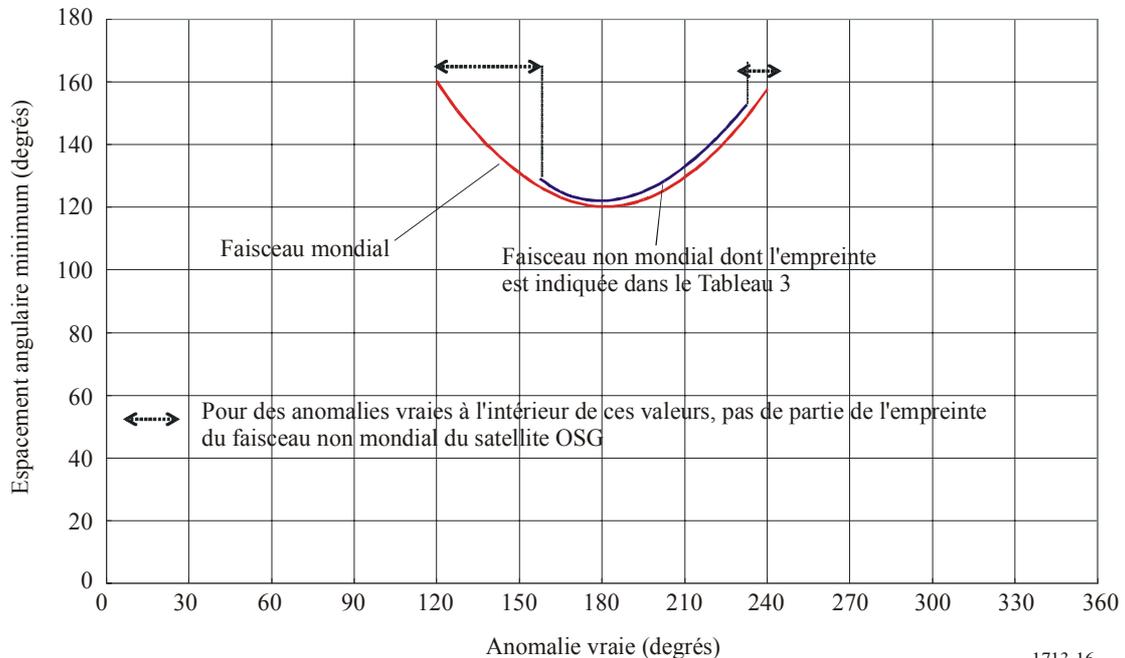
TABLEAU 4

**Espacement angulaire minimum pour un exemple de satellite OSG
doté d'un faisceau non mondial**

1. Système HEO	4
2. Hauteur de l'apogée (km)	35 800
3. Hauteur du périégée (km)	35 800
4. Excentricité de l'orbite	0
5. Inclinaison de l'orbite (degrés)	63,4
6. Longitude de l'apogée (° E)	-43
7. Période de l'arc actif (h)	8
8. Longitude du satellite OSG (° E)	135
9. Espacement angulaire minimum (degrés)	122,0
10. Longitude de la station terrienne (° E)	67
11. Latitude de la station terrienne (° N)	18
12. Longitude du satellite HEO (° E)	-39,93
13. Latitude du satellite HEO (° N)	63,29

FIGURE 16

**Espacement angulaire minimum par rapport à une anomalie vraie d'un satellite «actif»
du système HEO 4 (satellite OSG situé à 135° E)**



1713-16

Le fichier Excel «MinSepAnnex5» ci-dessous contient une routine additionnelle en Visual Basic pour la méthode de l'Annexe 5. Cet outil calculera correctement l'espacement angulaire minimum dans les deux cas suivants: un satellite OSG doté d'un faisceau mondial, et un satellite OSG doté d'un faisceau non mondial. On observera que cet outil calculera correctement l'espacement angulaire minimum à l'intérieur de l'empreinte d'un faisceau formé pour autant que cette empreinte

ne contienne pas de concavité. Dans le cas contraire, dans les données d'entrée devraient figurer des points artificiels reliant chaque concavité et, dans le cas où un espacement angulaire minimum calculé se situerait en un point géographique à l'intérieur d'une des concavités, l'utilisateur devrait supposer qu'il se situe sur le contour de l'empreinte au point le plus proche du point calculé.



MinSepAnnex5.
xls
