

## RECOMMANDATION UIT-R S.1256

**MÉTHODOLOGIE PERMETTANT DE CALCULER LE NIVEAU TOTAL MAXIMAL DE LA PUISSANCE SURFACIQUE PRODUITE SUR L'ORBITE DES SATELLITES GÉOSTATIONNAIRES DANS LA BANDE 6 700-7 075 MHz PAR LES LIAISONS DE CONNEXION DANS LE SENS ESPACE-TERRE DES SYSTÈMES À SATELLITES NON GÉOSTATIONNAIRES DU SERVICE MOBILE PAR SATELLITE**

(Question UIT-R 206/4)

(1997)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

*considérant*

- a) que la bande 6 700-7 075 MHz est attribuée à titre primaire au service fixe par satellite (SFS) dans le sens espace-Terre, pour utilisation par les liaisons de connexion des réseaux à satellites non géostationnaires du service mobile par satellite (SMS);
- b) que la bande 6 700-7 075 MHz est également attribuée à titre primaire au SFS dans le sens Terre-espace et que la bande 6 725-7 025 MHz est soumise aux dispositions du Plan d'allotissement de l'Appendice 30B du Règlement des radiocommunications (RR) pour les réseaux à satellites géostationnaires;
- c) que, conformément au numéro S22.5A du RR, le niveau total maximal de la puissance surfacique produite sur l'orbite des satellites géostationnaires (OSG) à l'intérieur d'un angle de  $\pm 5^\circ$  de part et d'autre de cette orbite par un système à satellites non géostationnaires du SFS ne doit pas dépasser  $-168$  dB(W/m<sup>2</sup>) dans une bande quelconque large de 4 kHz;
- d) que la Résolution 115 de la Conférence mondiale des radiocommunications (Genève, 1995) (CMR-95) invite l'UIT-R à élaborer une méthodologie permettant de calculer le niveau total de la puissance surfacique produite sur l'OSG par un réseau à satellite non géostationnaire;
- e) que les réseaux à satellites non géostationnaires du SMS ont des paramètres d'orbite et de transmission qui sont spécifiés au § A.3 vii) de l'Annexe 1 à la Résolution 46 (Rév.CMR-95),

*recommande*

- 1 que la méthodologie indiquée dans l'Annexe 1 soit suivie pour calculer le niveau total maximal de la puissance surfacique (dB(W/m<sup>2</sup>) dans une bande quelconque de 4 kHz), à un emplacement quelconque de l'OSG, à  $\pm 5^\circ$  d'inclinaison de part et d'autre de cette orbite, par des liaisons de connexion dans le sens espace-Terre d'un réseau à satellite non géostationnaire fonctionnant dans la bande 6 700-7 075 MHz.

## ANNEXE 1

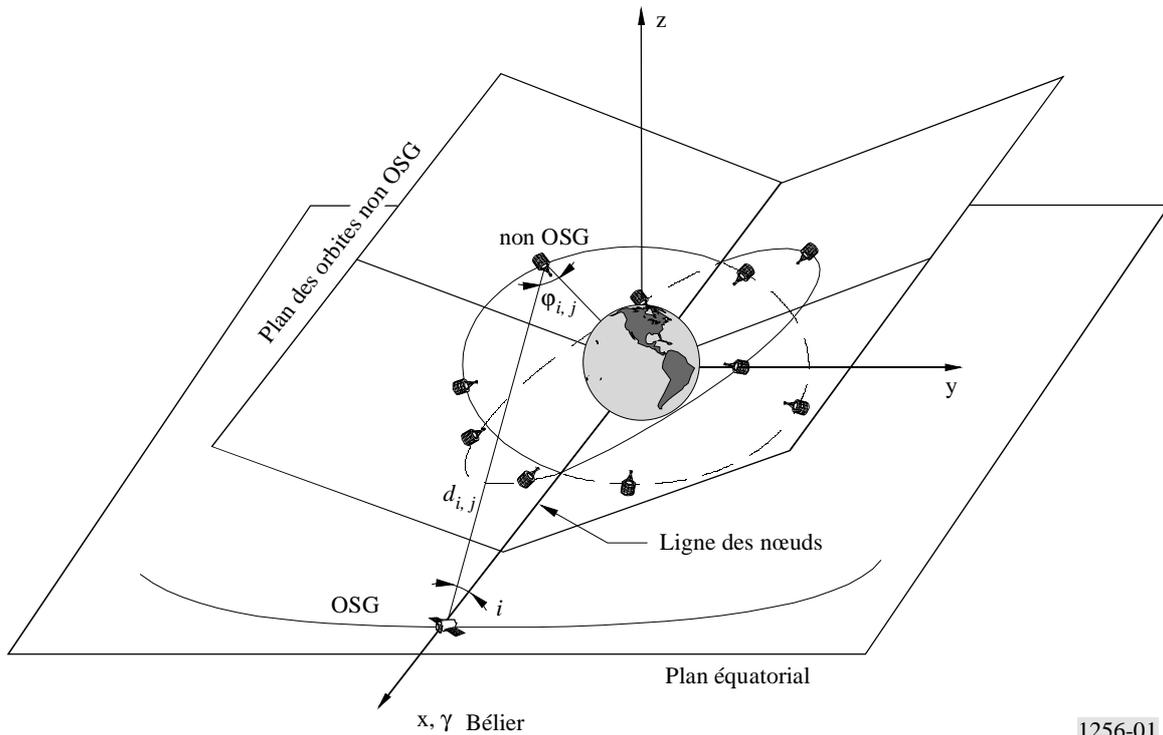
**Méthodologie****1 Description de la méthodologie**

Pour calculer le niveau total de la puissance surfacique issue d'un réseau à satellite en orbite non géostationnaire (non OSG) en un emplacement d'essai donné sur l'OSG, il faut recourir à une modélisation informatique de l'ensemble de la constellation de satellites non OSG et de l'emplacement d'essai sur l'OSG.

Si l'on part du fait que, dans une situation ordinaire, un satellite OSG parcourra l'orbite géostationnaire dans une période d'environ  $T_{OSG} = 24$  h et que la période orbitale d'un satellite non OSG ( $T_{non\ OSG}$ ) n'est pas nécessairement un sous-multiple de  $T_{OSG}$ , il faudra sans doute procéder à des simulations statistiques détaillées et longues pour évaluer le scénario du cas le plus défavorable, qui conduirait au niveau maximal de puissance surfacique à un certain point de l'OSG.

Une simulation simple et beaucoup moins longue peut être effectuée afin d'évaluer la puissance surfacique maximale à tout point de l'OSG. Au lieu d'un satellite en déplacement réel sur l'OSG, on considère un emplacement d'essai fixe sur l'OSG, dont la position orbitale est fixe par rapport à un référentiel à coordonnées cartésiennes  $0xyz$  (voir la Fig. 1) mais non par rapport au système de référence constitué par la Terre en rotation. Compte tenu de cela, le fait que les satellites non OSG ont une période  $T_{non\ OSG}$  implique que la position des satellites non OSG, vue à partir du point d'essai fixe sur l'OSG (voir la Fig. 1), reviendra au moins une fois par période orbitale  $T_{non\ OSG}$ . En outre, si les satellites non OSG sont uniformément répartis sur chaque plan de l'orbite, la même disposition géométrique des satellites non OSG reviendra selon une période égale à  $T_{non\ OSG}/N_s$  (où  $N_s$  est le nombre de satellites non OSG uniformément répartis dans un même plan). Selon ces considérations de base, le niveau composite de la puissance surfacique (intégré sur la base des satellites non OSG visibles) aura, à l'emplacement d'essai sur l'OSG, des valeurs qui se répéteront selon cette période.

FIGURE 1  
Géométrie de constellation OSG/non OSG pour calculer pfd:  $\Delta\Omega = 0^\circ$



1256-01

On peut calculer le niveau total de la puissance surfacique pour chaque échelon temporel. On peut également calculer une puissance surfacique composite maximale pour l'emplacement d'essai choisi sur l'OSG, pendant la période de simulation allant de  $T_0$  à  $T_0 + T_{non\ OSG}/N_s$ .

La valeur trouvée pour l'emplacement d'essai particulier sur l'OSG représenté sur la Fig. 1 n'est pas nécessairement le niveau maximal de puissance surfacique. Pour trouver le niveau maximal vrai de la puissance surfacique composite, la même procédure doit être répétée aux autres sites d'essai OSG, par augmentation de l'angle  $\Delta\Omega$  (voir la Fig. 2) entre l'emplacement d'essai sur l'OSG et la ligne des nœuds non OSG. Cette seconde itération sera effectuée pour des angles  $\Delta\Omega$  compris entre  $0^\circ$  et  $\Delta\Omega_{max} = 360^\circ/N_p$ , où  $N_p$  est le nombre de plans d'orbite des satellites non OSG. Si le nombre  $N_p$  est pair (comme dans les constellations LEO-F et LEO-D), la valeur  $\Delta\Omega_{max} = 180^\circ/N_p$ .

Cette méthode peut aussi être appliquée à toute constellation de satellites non OSG qui ne répond pas aux conditions orbitales requises indiquées ci-dessus (concernant, par exemple, une répartition uniforme des satellites, des orbites elliptiques). Dans ces cas, la simulation temporelle sera exécutée pendant un intervalle égal à la période minimale de répétabilité de la configuration de constellation, cette valeur étant souvent égale à la période de la constellation  $T_{non\ OSG}$ .

Le § 2 présente toutes les équations fondamentales qui sont nécessaires pour calculer le niveau total de puissance surfacique reçu d'un réseau non OSG donné à un emplacement d'essai donné sur l'OSG. La Fig. 3 montre l'organigramme de mise en œuvre logicielle de la méthodologie décrite ici.

FIGURE 2  
Géométrie de constellation OSG/non OSG pour calculer pfd:  $\Delta\Omega \neq 0^\circ$

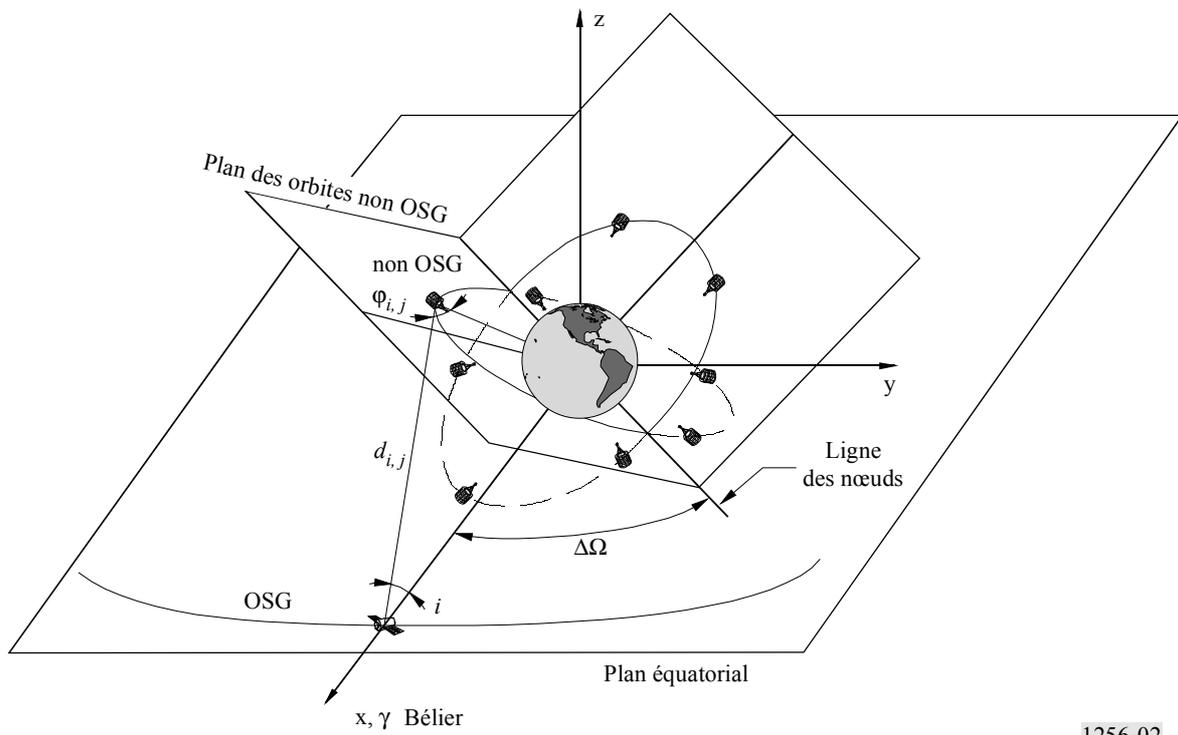
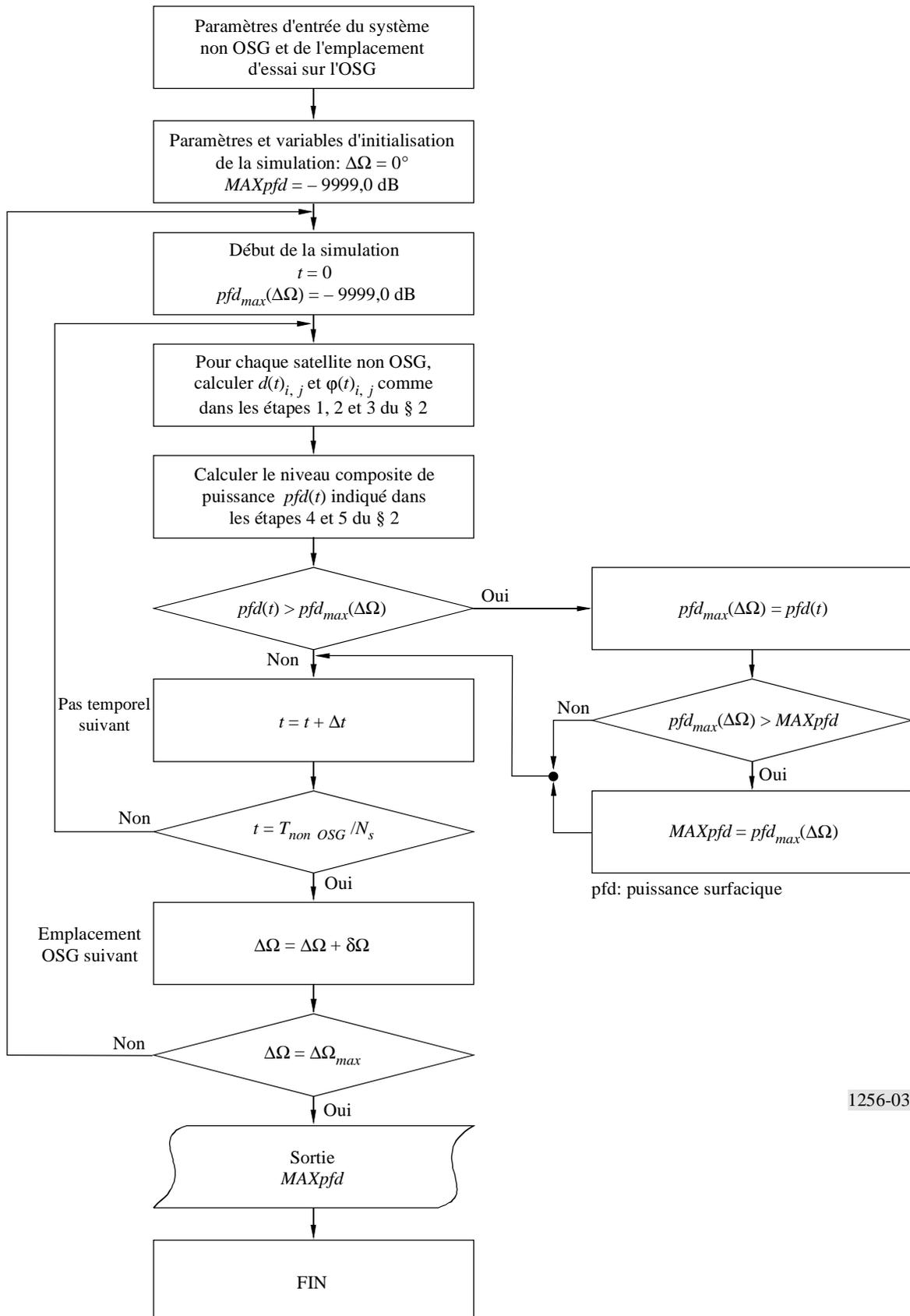


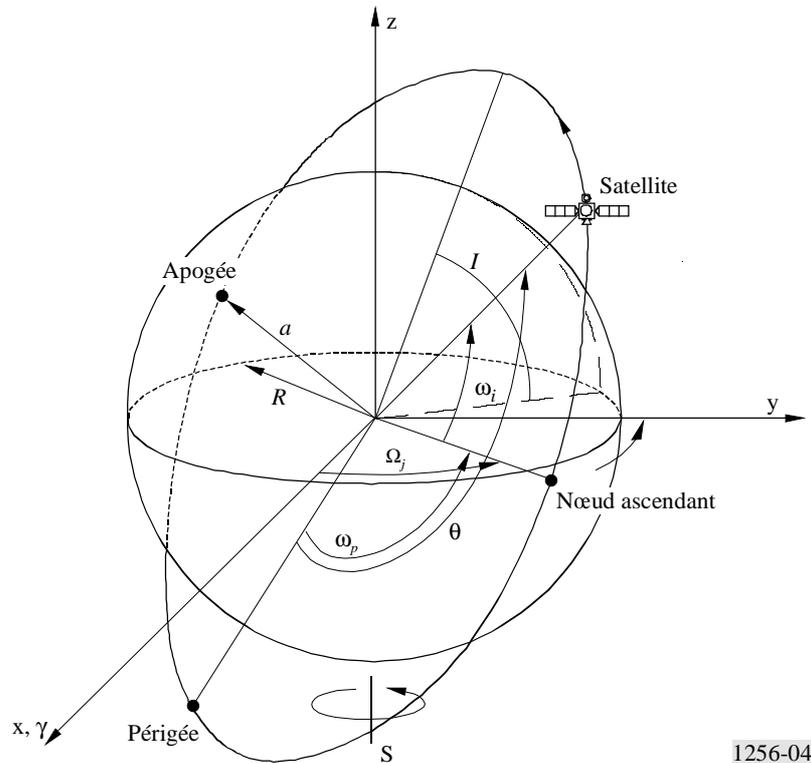
FIGURE 3  
Organigramme méthodologique



## 2 Etapes de simulation de base

Etape 1: Position orbitale des satellites non OSG

FIGURE 4  
Orbite non OSG et systèmes de référence



1256-04

La Fig. 4 décrit les divers paramètres qui sont nécessaires pour évaluer à tout instant la position d'un satellite non OSG quelconque sur son orbite. Ces paramètres sont énumérés comme suit dans le § A.3 vii) de l'Annexe 1 à la Résolution 46 (Rév.CMR-95):

- $a$ : demi grand axe; dans le cas d'une orbite circulaire, le demi grand axe est de longueur constante et égal au rayon de l'orbite
- $I$ : angle d'inclinaison de l'orbite par rapport au plan équatorial
- $\Omega_j$ : ascension droite du nœud ascendant pour le  $j^e$  plan orbital, mesurée dans le sens inverse des aiguilles d'une montre dans le plan équatorial à partir de la direction de l'équinoxe de printemps jusqu'au point où le satellite traverse le plan équatorial dans la direction sud-nord ( $0^\circ \leq \Omega_j < 360^\circ$ )
- $\omega_p$ : argument du périhélie; pour une orbite circulaire, le périhélie est égal à l'apogée; on peut donc écrire que  $\omega_p = 0^\circ$
- $\omega_i$ : angle de phase initial du  $i^e$  satellite dans son plan orbital à l'instant de référence  $t=0$ , mesuré depuis le point du nœud ascendant ( $0^\circ \leq \omega_i < 360^\circ$ )
- $\theta$ : anomalie vraie du satellite.

Pour une constellation de satellites non OSG utilisant des orbites circulaires, les paramètres  $a$  et  $I$  seront constants et  $\omega_p$  sera égal à zéro. Dans ce cas, la variation de la position de chaque satellite sera définie par  $\Omega$  et  $\theta$ .

Sur une orbite circulaire, la vitesse angulaire d'un satellite est constante. La position angulaire d'un satellite est donc égale à son anomalie vraie et est donnée par la relation suivante:

$$\theta(t)_{i,j} = \frac{360^\circ}{T} t + \omega_{i,j} \quad (1)$$

pour  $i =$  de 1 à  $N_s$  et  $j =$  de 1 à  $N_p$ , où  $N_s$  est le nombre de satellites dans chaque plan orbital et où  $N_p$  est le nombre de plans orbitaux.  $T$  est la période orbitale (s) par la relation suivante:

$$T = 2 \pi \sqrt{a^3/\mu} \quad (2)$$

où  $\mu$  est la constante gravitationnelle géocentrique et est égale à  $3,986 \text{ E}14(\text{m}^3\text{s}^{-2})$ .

Les diverses valeurs de  $\Omega_j$  dépendront de la géométrie de la constellation. Elles seront indiquées dans la liste des éléments établie conformément au § A.3 vii) de l'Annexe 1 à la Résolution 46 (Rév.CMR-95). Le même principe s'applique aux valeurs de  $\omega_{i,j}$ .

Si l'on connaît pour chaque satellite son anomalie vraie  $\theta_{i,j}(t)$  et l'ascension droite de son nœud ascendant  $\Omega_j$ , ses coordonnées géocentriques sont données par les relations suivantes:

$$x(t)_{i,j} = a \left[ \cos \Omega_j \cos \theta(t)_{i,j} - \cos I \sin \Omega_j \sin \theta(t)_{i,j} \right] \quad (3)$$

$$y(t)_{i,j} = a \left[ \sin \Omega_j \cos \theta(t)_{i,j} + \cos I \cos \Omega_j \sin \theta(t)_{i,j} \right] \quad (4)$$

$$z(t)_{i,j} = a \left[ \sin I \sin \theta(t)_{i,j} \right] \quad (5)$$

La position de l'emplacement d'essai sur l'OSG par rapport à la ligne des nœuds de la constellation non OSG est déterminée par  $\Delta\Omega$  (voir le § 1). Il en découle que, dans les équations (3), (4) et (5),  $\Omega_j = \Omega_{j,0} + \Delta\Omega$ , où  $\Delta\Omega$  va de 0 à  $\Delta\Omega_{max}$  (voir le § 1) et  $\Omega_{j,0} = \Omega_j$  pour  $\Delta\Omega = 0$ .

*Etape 2:* Distance entre le satellite non OSG et l'emplacement d'essai sur l'OSG

$x_{OSG}$ ,  $y_{OSG}$  et  $z_{OSG}$  sont les coordonnées géocentriques de l'emplacement d'essai sur l'OSG. Elles sont données par les relations suivantes:

$$x_{OSG} = a_{OSG} \cdot \cos I_{OSG} \quad (6)$$

$$y_{OSG} = 0 \quad (7)$$

$$z_{OSG} = a_{OSG} \cdot \sin I_{OSG} \quad (8)$$

où:

$a_{OSG}$ : demi grand axe de l'orbite géostationnaire (42 164 km)

$I_{OSG}$ : angle d'inclinaison de l'orbite géostationnaire ( $-5^\circ \leq I_{OSG} \leq 5^\circ$ ).

Ces équations restent constantes pendant la simulation car il est plus simple de faire varier  $\Omega_j$  dans les équations (3), (4) et (5) en augmentant le décalage  $\Delta\Omega$ .

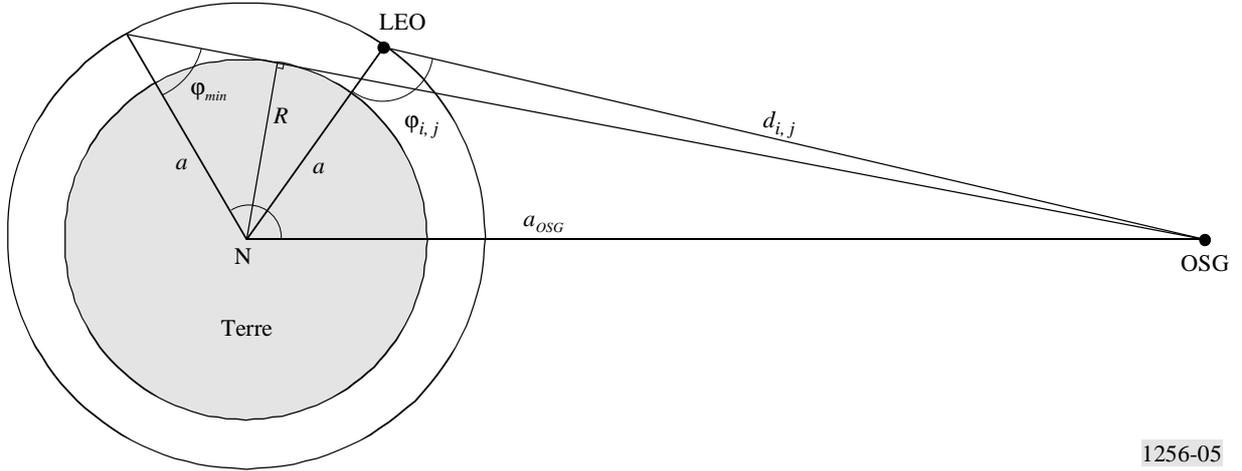
La distance entre un satellite non OSG et l'emplacement d'essai sur l'OSG peut alors être calculée au moyen du théorème de Pythagore:

$$d(t)_{i,j} = \sqrt{(x_{OSG} - x(t)_{i,j})^2 + y(t)_{i,j}^2 + (z_{OSG} - z(t)_{i,j})^2} \quad (9)$$

Étape 3: Calcul de l'angle hors axe de l'antenne du satellite nonOSG en direction de l'emplacement d'essai sur l'OSG

La Fig. 5 montre, en géométrie plane, le schéma de l'angle hors axe de l'antenne du satellite non OSG par rapport à l'emplacement d'essai sur l'OSG.

FIGURE 5  
Calcul de l'angle  $\varphi_{i,j}$



1256-05

L'angle hors axe de l'antenne d'un satellite non OSG peut être calculé au moyen du théorème de Carnot (appelé également «théorème du cosinus»).

$$\varphi(t)_{i,j} = \arccos \left( \frac{a^2 + d(t)_{i,j}^2 - a_{OSG}^2}{2 a d(t)_{i,j}} \right) \quad (10)$$

Étape 4: Calcul du gain hors axe de l'antenne d'un satellite non OSG en direction de l'emplacement d'essai sur l'OSG

A partir de l'angle hors axe calculé par l'équation (10), il est possible de calculer, pour chaque satellite visible, le gain d'antenne hors axe  $G(\varphi(t)_{i,j})$ . Cela n'est toutefois nécessaire, comme l'indique la Fig. 5, que si l'angle  $\varphi(t)_{i,j}$  est supérieur à une valeur minimale  $\varphi_{min}$  calculée comme suit:

$$\varphi_{min} = \arcsin (R/a) \quad (11)$$

Étape 5: Calcul du niveau composite de la puissance surfacique en direction de l'emplacement d'essai OSG

Le niveau composite de la puissance surfacique peut être exprimé comme suit:

$$pfd(t) = \frac{P_{crête, 4kHz}}{4\pi} \sum_{i,j=1 \text{ à } N(t)_v} \frac{G(\varphi(t)_{i,j})}{d(t)_{i,j}^2} \quad \text{pour } \varphi(t)_{i,j} \geq \varphi_{min} \quad (12)$$

où:

$P_{crête, 4kHz}$ : puissance de crête dans la bande de 4 kHz la plus défavorable, à l'entrée de l'antenne du satellite non OSG; cette valeur est supposée constante et égale pour tous les satellites non OSG

$N(t)_v$ : nombre de satellites non OSG visibles de l'emplacement d'essai OSG à l'instant  $t$ .

### 3 Nombre total d'échelons et d'incrémentations d'échelon de simulation

Deux échelons de simulation sont nécessaires pour effectuer le calcul du niveau composite maximal de la puissance surfacique émise par un réseau non OSG en direction de l'OSG: l'échelon temporel  $\Delta t$  et l'échelon d'ascension droite  $\delta\Omega$ .

Comme il n'y a aucun brouillage par alignement direct en provenance du satellite non OSG (qui utilise soit une antenne à faible gain isotrope ou une antenne émettant du brouillage par ses lobes secondaires), diverses simulations (pour constellations LEO-D et LEO-F) ont montré qu'un échelon angulaire non supérieur à  $0,5^\circ$  était suffisant pour obtenir des résultats valides. Les échelons de calcul seront alors:

$$\Delta t = \frac{T(s) \times 0,5^\circ}{360^\circ}$$

$$\delta\Omega = 0,5^\circ$$

La durée totale de la simulation pour chaque emplacement d'essai sur l'OSG et pour le nombre total d'emplacements d'essai sur l'OSG est indiquée dans le § 1.

---