ETUDES LE L'INLFUENCE DES DERIVES ORBITALES DES SATELLITES GEO-STATIONNAIRES DE COMMUNICATION SUR LES RADIO-INTERFERENCES PHASE III



# UNIVERSITÉ

SAINTE-FOY, QUÉBEC

G1K 7P4, CANADA

ETUDES LE L'INLFUENCE DES DERIVES ORBITALES DES SATELLITES GEO-STATIONNAIRES DE COMMUNICATION SUR LES RADIO-INTERFERENCES PHASE III



TL 1080 H894 1991



### UNIVERSITÉ LAVAL FACULTÉ DES SCIENCES ET DE GÉNIE DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE

 $((\equiv))$ 

### Laboratoire de Radiocommunications et de Traitement du Signal

ÉTUDES DE L'INFLUENCE DES DÉRIVES ORBITALES DES SATELLITES GÉO-STATIONNAIRES DE COMMUNICATION SUR LES RADIO-INTERFÉRENCES C

PHASE III (

#### par

Chercheur principal Ingénieur de recherche Collaborateur Dr/H.T. Huynh, ing. Roger Gagnon, ing. Dr D. Angers, ing.

présenté au

Gouvernement du Canada Ministère des communications, Ottawa Contrat 36100-0-5032

Mars 1991

### Table des matières

2.0	Introduction
2.1	Calcul des paramètres d'un point de contour
2.2	Calcul des coordonnées géographiques d'un point terrestre caractérisé
par	ses paramètres de références
2.3	Calcul des paramètres de références à partir des caractéristiques du
fais	sceau d'antenne
2.4	Calcul des paramètres de références du gain maximum quand il y a
rep	ointage des antennes
2.5	Calcul du déplacement des zones de service
	2.5.1 Le satellite ne possède pas de système de repointage
	de ses antennes (pire cas)
	2.5.2 Le satellite possède un système de repointage
	de ses antennes (meilleur cas)
2.6	Résultats
2.7	Conclusion
apitre	3. CALCUL DES INTERFERENCES
3.1	Introduction
3.2	Calcul des interférences
3.3	Résultats et discussion
	3.3.1 Cas d'un seul satellite brouilleur
	3.3.2 Cas de deux satellites brouilleurs
3.4	Conclusion
apitre	4. CONCLUSION

### **CHAPITRE 1**

### INTRODUCTION

Ce rapport présente les résultats de la dernière phase du contrat portant sur l'influence des dérives orbitales des satellites géo-stationnaires de communication sur les radio-interférences: il s'agit d'examiner l'effet que l'absence du contrôle des mouvements nord-sud des satellites mis sur orbite stationnaire provoque sur la surface de couverture terrestre; de ces résultats, examiner les radio-interférences que les antennes terrestres subissent .

La première phase de ce travail, exécutée en 1988-89, vise à effectuer une recherche bibliographique, à synthétiser les résultats connus et finalement proposer une formulation préliminaire pour les deux problèmes de déplacement des surfaces de couverture et des interférences sur les antennes terrestres.

La deuxième phase, ayant eu lieu en 1989-90, correspond aux développements analytiques et numériques pour des situations générales. Cette phase fournit d'une part une formulation mathématique plus précise, d'autre part des programmes écrits en Pascal pour calculer les déplacements des surfaces de couverture terrestre, tout aussi bien que les interférences terrestres, caractérisées par le rapport C/I des puissances de la porteuse principale et des porteuses interférantes. Dû à une complexité assez grande du problème, et à une formulation inédite des phénomènes d'interférences, les résultats de cette deuxième phase ont reçu beaucoup d'attention de plusieurs intervenants dans ce projet. D'après les commentaires des participants au séminaire du mois d'avril 1990, les résultats semblent, dans certains cas, un peu anormaux. A la demande du responsable du projet, Monsieur Michel Gaudreau du Ministère fédéral des communications, la première partie de la troisième phase devrait être concentrée sur la vérification à la fois de la formulation mathématique et de la programmation.

La troisième phase du projet, également terminale, consiste donc en une vérification détaillée des démarches analytiques et un contrôle de la programmation d'une part et, d'autre part, le traitement de quelques cas de couvertures non-communes des satellites connus. Etant donné

le changement de l'ingénieur de recherche, le travail de vérification devient un peu plus onéreux et prend plus de temps que normalement.

Analytiquement, on a découvert deux erreurs de signe: l'une est mineure et l'autre affecte assez sérieusement l'effet des interférences. Etant donné une ramification relativement compliquée du programme de calcul des interférences, nous avons décidé de le reprendre à partir de zéro, pour ainsi éviter d'échapper quelques erreurs commises pendant le processus de contrôle. Les résultats numériques doivent être obtenus pour diverses situations, permettant ainsi de juger la validité des formules et des programmes.

Le chapitre 2 reprend le développement mathématique du déplacement des surfaces de couverture des antennes de satellite. Les notations et les symboles mathématiques sont identiques à ceux déjà utilisés dans le rapport de la phase II (2). L'intérêt de ce chapitre est de clarifier la formulation analytique avec les grahiques géométriques où la signification de chaque paramètre utilisé est bien illustrée. Le lecteur peut maintenant suivre le développement mathématique de manière beaucoup plus simple. De plus, les calculs sont cette fois effectués de manière plus complète, c'est-à-dire, qu'ils donnent des résultats correspondant à toutes les situations possibles: le pire cas, où on ne repointe pas l'antenne du satellite, avec ou sans ajustement de la position de l'antenne du satellite par rapport au lacet du mouvement du satellite; le meilleur cas avec ou sans ajustement du lacet , où on repointe l'antenne du satellite vers la position fixe du récepteur terrestre. Toutefois, on suppose que l'antenne terrestre poursuit toujours le satellite principal.

Le chapitre 3 présente les résultats des interférences pour les situations déjà examinées dans la phase II (2). On se rend compte que l'erreur analytique décelée dans plusieurs situations affecte effectivement le rapport C/I des puissances principale et d'interférence. De plus, on y présente l'effet des interférences dans la situation d'un satellite interférant éloigné en même temps qu'un autre satellite interférant américain de grande couverture, le sattelite principal étant canadien de couverture très étroite et pointé vers Ottawa. Cet exemple illustre l'utilité et la flexibilité des programmes développés dans cette dernière phase du projet.

Dans l'appendice 1, on inclut deux programmes écrits en C pour remplacer ceux présentés dans la phase II. Ce langage C est choisi tout simplement pour permettre une portabilité plus facile et un suivi plus systématique. Plusieurs commentaires sont ajoutés aux programmes, ce qui aidera les utilisateurs potentiels à les modifier, les exécuter et à les adapter à toute autre circonstance.

Les auteurs profitent de cette occasion pour remercier chaleureusement Monsieur Michel Gaudreau pour sa collaboration et sa compréhension tout au long de ce projet. Finalement, les remarques de Monsieur Mario Caron du Centre de recherche en Communications sont bien appréciées par les auteurs; elles portent principalement sur le rapport de la phase I (1), qui est considéré comme préliminaire. Les erreurs soulignées par M. Caron sont d'ailleurs déjà corrigées dans la phase II. Toutefois, il s'est donné la peine pour nous suggérer une méthode de calcul des déplacements des surfaces de couverture terrestre. Son rapport nous est parvenu au moment où la première partie du travail avait été achevée. Pour souligner l'intérêt de sa méthode, son rapport est inclus dans celui-ci comme appendice 2.

### CHAPITRE 2

### DEPLACEMENT DES ZONES DE SERVICE

#### 2.0 Introduction

Ce chapitre consiste essentiellement en une description plus précise et complète des formules déjà présentées dans la phase II en rapport avec l'étude du déplacement des zones de service. Quelques correctifs mineurs ont dû être apportés à certains endroits. Les formules présentées dans la phase II étaient correctes dans l'ensemble à l'exception d'une inversion de 180 degrés de la zone de service associée à un angle  $\psi$  donné. En effet, on a pu découvrir, à l'aide d'outils graphiques, que la zone de couverture obtenue pour  $\psi = 0$  était en fait celle qu'on aurait dû avoir pour  $\psi = 180$  degrés.

Ces erreurs se résument en fait à des erreurs de signes dans le calcul de l'angle b, qui, selon notre convention, doit être positif à gauche de l'axe satellite-centre terrestre. Ces correctifs mineurs ont cependant peu d'incidences sur les résultats présentés au chapitre 2 de la phase II puisque les différentes surfaces ont été correctement identifiées malgré l'inversion qui était présente. Il suffit de comparer les résultats présentés dans ce rapport à la section 2.6 avec les résultats correspondants de la phase II pour s'en convaincre.

Nous avons ajouté à ces résultats le cas où il y a contrôle du lacet en plus du contrôle directionnel des antennes(meilleur cas). Cela afin de vérifier et démontrer que les zones obtenues pour  $\psi=0$ ,  $\psi=180$  et i<sub>0</sub>=0 sont les mêmes. La formule pour calculer cet angle de lacet a également été corrigée puisque celle fournie dans l'addenda de la phase II était incorrecte. La nouvelle formule est facilement obtenue en calculant la dérivée de la trajectoire du satellite par rapport au plan équatorial. En se référant à la figure 2.0a on a:

$$\sin \alpha = \frac{dz}{Rd\psi}$$

2.0.1







Figure 2.0b

· 6

Comme

 $z = R \sin l_s (t) = R \sin i_o \sin \psi$ 

$$\frac{dz}{d\psi} = R\sin i_o \cos \psi$$

-1 r

Donc

et

$$\alpha = \sin^{-1} \left[ \sin i_{o} \cos \psi \right]$$
 2.0.2

Le tracé de l'angle de lacet a en fonction de  $\psi$  et i<sub>0</sub> est présenté à la figure 2.0b.

Nous espérons que les précisions et correctifs apportés dans ce rapport réussiront à dissiper les doutes qui pouvaient subsister en ce qui concerne la validité des formules développées dans le cadre de ce contrat.

## 2.1 Calcul des paramètres de références d'un point de contour

Soit un point T correspondant à un contour à 3 dB dont on connait les coordonnées terrestres  $l_k$  et  $L_k$ . On désire calculer les paramètres de références  $(a_k, b_k, d_k)$  qui définissent ce point dans le référentiel du satellite. Dans ce système de coordonnées (figure 2.1),  $b_k$  est positif s'il est à gauche de l'axe OS et négatif s'il est à sa droite. Donc, l'écart de longitude entre le point T et le satellite S doit être:

$$\delta L_k = L_s - L_k \tag{2.1.1}$$

En effet, si  $L_k < L_s$ ,  $b_k$  sera positif et négatif si  $L_k > L_s$ . Ceci n'était pas clairement indiqué dans la phase II. En se référant à la figure 2.1, il est aisé d'obtenir les formules suivantes:

$$R\sin l_k = d_k \sin \alpha_k$$

donc

et

$$\alpha_k = \sin^{-1} \left[ \frac{R}{d_k} \sin l_k \right]$$
 2.1.2

 $R\cos l_k\,\sin\,\delta L_k\,=d_k\,\cos\,\alpha_k\,\sin\,\beta_k$ 





donc

$$\beta_k = \sin^{-1} \left[ \frac{R \cos l_k \, \sin \delta L_k}{d_k \, \cos \alpha_k} \right]$$
2.1.3

Cette dernière formule peut être modifiée pour être uniquement fonction de  $l_k$  et  $dL_k$ . En effet:

$$\cos \alpha_k = \sqrt{1 - \sin^2 \alpha_k} = \sqrt{1 - \frac{R^2}{d_k^2} \sin^2 l_k}$$

donc

$$\beta_{k} = \sin^{-1} \left[ \frac{R \cos l_{k} \sin \delta L_{k}}{d_{k} \sqrt{1 - \frac{R^{2}}{d_{k}^{2}} \sin^{2} l_{k}}} \right]$$
2.1.4

Pour obtenir  ${\bf d}_k$  , il suffit de calculer:

$$d_k = \left| \overrightarrow{OT} - \overrightarrow{OS} \right|$$

Soit (X, Y, Z) les coordonnées cartésiennes du point T,  $d_k^2$  est obtenu par:

$$d_{k}^{2} = (D_{0} + R - X)^{2} + Y^{2} + Z^{2} = (D_{0} + R)^{2} + R^{2} - 2(D_{0} + R)X$$
  
et comme  $X = R \cos l_{k} \cos \delta L_{k}$ 

on obtient finalement:

$$d_{k} = \left\{ \left( D_{0} + R \right)^{2} + R^{2} - 2R(D_{0} + R) \cos l_{k} \cos \delta L_{k} \right\}^{\frac{1}{2}}$$
2.1.5

- 9

# 2.2 Calcul des coordonnées géographiques d'un point terrestre caractérisé par ses paramètres de références

Dans cette section nous désirons calculer les coordonnées géographiques  $(l_k, L_k)$ d'un point de contour à 3 dB en situation de dérive nord-sud, connaissant les paramètres de références de ce point  $(\alpha_k, \beta_k, d_k)$ 

Pour y arriver, nous procédons d'abord au calcul des coordonnées cartésiennes X,Y et Z pour en déduire ensuite les coordonnées géographiques.

Les coordonnées X' et Y peuvent être obtenues à l'aide de la figure 2.2a où l'axe X' est dans le plan de l'orbite. La coordonnée Y est la distance QP:

$$Y = QP = SP - SQ$$
$$Y = (D_0 + R)\cos\psi - ST\cos\theta$$

Comme ST est la projection de  $d_k$  sur le plan orbital, on obtient:

$$ST = d_k \cos \alpha_k$$
  

$$Y = (D_0 + R) \cos \psi - d_k \cos \alpha_k \cos(\psi + \beta_k)$$
  
2.2.1

La coordonnée X' est la distance OL:

$$X' = OL = OP - LP$$
  

$$X' = (D_0 + R) \sin \psi - ST \sin \theta$$
  

$$X' = (D_0 + R) \sin \psi - d_k \cos \alpha_k \sin(\psi + \beta_k)$$
  
2.2.2

La figure 2.2b permet de calculer les coordonnées X et Z. La coordonnée X est la distance OP:



Figure 2.2a



Figure 2.2b

ľ

$$X = OP = OQ - PQ = X' \cos i_o - TK \sin i_o$$

comme

$$TK = d_k \sin \alpha_k$$

on obtient:

$$X = X' \cos i_o - d_k \sin \alpha_k \sin i_o \qquad 2.2.3$$

La coordonnée Z est la distance PT:

$$Z = PT = KQ + LT$$
  

$$Z = X' \sin i_o + d_k \sin \alpha_k \cos i_o$$
  
2.2.4  
2.2.4

Maintenent que les coordonnées X,Y et Z sont obtenues, il est aisé de dériver une expression pour les coordonnées géographiques  $l'_k$  et  $L'_k$ . On obtient  $l'_k$  par:

$$l'_k = \sin^{-1}\left\{\frac{Z}{R}\right\}$$
 2.2.5

Pour déterminer  $L'_{k,i}$ , il suffit de noter à partir de l'équation 2.1.1 que:

$$L'_k = L_s - \delta L'_k \qquad 2.2.6$$

A l'aide de la figure 2.2a, on obtient:

$$\psi - \delta L_k' + \eta = 90^\circ \qquad \qquad \delta L_k' < 0$$

On a donc:

$$\delta L'_k = -90^\circ + \psi + \eta$$

Finalement on obtient:

$$L'_{k} = L_{s} + 90^{\circ} - \psi - \eta$$
 2.2.7

avec  $\eta = Angle(Y, X)$ 

La fonction Angle(Y,X) est une fonction permettant de calculer l'arctangente de Y/X dans les 4 quadrants. Notons que la formule 2.2.7 obtenue ici est similaire à celle obtenue dans la phase II à l'exception d'une inversion du signe de  $\delta L'_k$ 

On nous a fait remarqué récemment que les expressions obtenues dans les pages qui précèdent semblent indiquer que la valeur de  $d_k$  demeure fixe lors de la dérive du satellite alors qu'elle devrait en général varier. Ceci est vrai si les antennes sont repointées (meilleur cas). Mais en ce qui concerne le pire cas (pas de système de repointage), la distance doit nécessairement rester la même. Pour s'en convaincre, il suffit d'examiner la figure 2.1, de considérer le satellite fixe et de faire tourner la terre par rapport à son centre. Peu importe le sens de la rotation, on voit très bien que la distance  $d_k$  ne change pas. Les coordonnées géographiques du point de contour correspondant à des paramètres de références donnés vont changer lors de la dérive du satellite mais la distance entre ce point et le satellite demeurera fixe tant que les antennes ne sont pas repointées.

### 2.3 Calcul des paramètres de références à partir des caractéristiques du faisceau d'antenne

Cette section présente les équations nécessaires au calcul des paramètres de référence lorsque l'on ne connaît pas les coordonnées de la zone de couverture mais que l'on connaît les caractéristiques du faisceau d'antennes du satellite.

Soit le faisceau d'antenne caractérisé par les demi-ouvertures à 3 dB,  $BW_v$  et  $BW_h$  et les coordonnées  $l_0$  et  $L_0$  du gain maximum. Dans un plan perpendiculaire à la direction du gain maximum, l'équation du contour du faisceau à une distance  $d_0$  est:

$$r^{2} = \frac{R_{1}^{2}R_{2}^{2}}{R_{1}^{2}\sin^{2}\theta + R_{2}^{2}\cos^{2}\theta}$$
2.3.1

où:

$$R_1 = d_0 \tan(B W_V)$$
  $R_2 = d_0 \tan(B W_H)$ 



Figure 2.3a







Figure 2.3c

Comme on peut le voir à la figure 2.3a, ceci est l'équation d'une ellipse. Il suffit d'avoir  $BW_v=BW_h$  pour obtenir un faisceau circulaire. Pour être plus général, on y a introduit un angle de rotation f qui servira à compenser l'effet de rotation du faisceau causé par le mouvement de lacet d'un satellite en orbite géosynchrone. Dans le cas où le satellite possède un système de contrôle de lacet, on utilise l'équation 2.0.2 pour calculer f dans les équations 2.3.2 à 2.3.4.

En se référant aux figures 2.3b à 2.3c, on obtient d'abord les coordonnées (W,V,H) pour ensuite déterminer les paramètres de références.

On obtient la coordonnée H par:

$$H = SB = SA - AB$$
  

$$H = d_0 \cos \alpha_0 - PQ \sin \alpha_0$$
  
comme  $PQ = r \cos(\theta + \varphi)$  alors  

$$H = d_0 \cos \alpha_0 - r \cos(\theta + \varphi) \sin \alpha_0$$
  
et V par:  
2.3.2

$$V = r\sin(\theta + \varphi)$$
 2.3.3

De plus W est donné par:

$$W = AP + PQ \cos \alpha_0$$
  

$$W = d_0 \sin \alpha_0 + r \cos(\theta + \varphi) \cos \alpha_0$$
  
2.3.4

On peut déduire facilement l'équation pour  $\alpha_k$  comme suit:

$$\frac{W}{D} = \sin \alpha_k \qquad D = \sqrt{d_0^2 + r^2}$$

$$\alpha_k = \sin^{-1} \left\{ \frac{W}{\sqrt{d_0^2 + r^2}} \right\}$$
2.3.5





<sub>où</sub>  $(\alpha_0, \beta_0, d_0)$  sont calculés à l'aide des équations 2.1.1 à 2.1.5.

En se basant sur la figure 2.3d on obtient l'équation pour  $\beta_k$  par:

$$\beta_k = -tg^{-1}\left(\frac{V}{H}\right) + \beta_0$$
2.3.6

On remarque ici une différence de signe avec l'équation 2.2.13 de la phase II.

On obtient d<sub>k</sub> en calculant l'intersection du vecteur possédant les angles  $\alpha_k$  et  $\beta_k$  avec une sphère de rayon R dont l'équation est:

$$X^2 + Y^2 + Z^2 = R^2$$

où

$$X = (D_0 + R) - d_k \cos \alpha_k \cos \beta_k$$

 $Y = d_k \, \cos \alpha_k \, \sin \beta_k$ 

 $Z=d_k\,\sin\alpha_k$ 

On obtient un polynôme du second degré de la forme:

$$Ad_k^2 + Bd_k + C = 0$$

Où

$$A = 1$$
  

$$B = -2(D_0 + R) \cos \alpha_k \cos \beta_k$$
  

$$C = (D_0 + R)^2 + R^2$$

Que l'on résout par la méthode classique:

$$d_k = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$$
 2.3.7

Quand le discriminant est négatif, le point de contour ne rencontre pas la surface de

la terre.

### 2.4 Calcul des paramètres de références du gain maximum quand il y a repointage des antennes

Dans le cas où le satellite dispose d'un système de repointage de ses antennes, les paramètres de référence de chaque point du contour vont changer pendant le déplacement du satellite sur un orbite géosynchrone. Heureusement, il n'est pas nécessaire de recalculer les paramètres de tous les points du contour à chaque position du satellite car les angles suivants sont fixes:

$$\alpha r_k = \alpha_k - \alpha_0 \tag{2.4.1}$$

$$\beta r_k = \beta_k - \beta_0 \tag{2.4.2}$$

Ceci est vrai seulement si les caractéristiques du faisceau des antennes sont invariables. Pour déterminer les paramètres de référence de chaque point du contour, il suffit seulement de calculer les nouveaux paramètres de références du gain maximum à l'aide des nouvelles équations développées plus loin et de calculer:

$$\alpha'_k = \alpha r_k + \alpha'_0 \tag{2.4.3}$$

$$\beta'_k = \beta r_k + \beta'_0 \tag{2.4.4}$$

Pour déterminer  $d'_{k}$ , on se servira de l'équation 2.3.7 en remplaçant  $\alpha_k$  et  $\beta_k$ , par les nouveaux angles tels que calculés par les équations 2.4.3 et 2.4.4.

Nous allons maintenant obtenir de nouvelles équations pour les paramètres de références du gain maximum  $(\alpha'_0, \beta'_0, d'_0)$ 

A l'aide de la figure 2.4a on peut trouver  $d'_0$  en calculant la longueur du vecteur reliant le point de gain maximum de coordonnées  $(l_0(t), L_0(t))$ .

$$l_0(t) = l_0$$
 2.4.5

$$L_0(t) = \psi + L_0 - L_s \tag{2.4.6}$$



Figure 2.4a

et le satellite de coordonnées  $(l_s(t), L_s(t))_{:}$ 

$$l_{s}(t) = \sin^{-1}(\sin i_{o} \sin \psi)$$

$$L_{s}(t) = \psi + \Delta L(t)$$
2.4.7
2.4.8

$$\Delta L(t) = \psi - tg^{-1}(\cos i_o tg\psi)$$
 2.4.9

Pour déterminer  $d'_0$ , il suffit de calculer:

$$d'_0 = \left| \overrightarrow{OT} - \overrightarrow{OS} \right|$$

où

$$\vec{OT} = \begin{cases} X_T = R \cos l_o(t) \sin L_o(t) \\ Y_T = R \cos l_o(t) \cos L_o(t) \\ Z_T = R \sin l_o(t) \end{cases}$$
$$\vec{OS} = \begin{cases} X_S = (D_0 + R) \cos l_s(t) \sin L_s(t) \\ Y_S = (D_0 + R) \cos l_s(t) \cos L_s(t) \\ Z_S = (D_0 + R) \sin l_s(t) \end{cases}$$

Donc:

$$d'_{0} = \left( \left( X_{T} - X_{S} \right)^{2} + \left( Y_{T} - Y_{S} \right)^{2} + \left( Z_{T} - Z_{S} \right)^{2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

On obtient après quelques manipulations l'expression suivante:

$$(d'_0)^2 = R^2 + (D_0 + R)^2 - 2R(D_0 + R) [\cos l_s(t) \cos l_o(t) \cos (L_s(t) - L_o(t)) + \sin l_s(t) \sin l_o(t)]$$

$$2.4.10$$

Pour obtenir  $z'_o$ , il suffit de calculer la distance normale entre le point de gain maximum et le plan de l'orbite. L'équation générale d'un plan dans l'espace est donnée par:

$$aX+bY+cZ=d$$

La constante d correspond à la distance normale entre le plan et l'origine. Pour calculer  $z'_o$ , on détermine l'équation du plan de l'orbite du satellite, puis on lui applique une translation au point de gain maximum. La valeur du paramètre d dans cette dernière forme de l'équation du plan de l'orbite sera égale à la valeur recherchée de  $z'_o$ ,. L'équation du plan de l'orbite est:

$$-\sin(i_o)X + \cos(i_o)Z = 0$$

Si on le déplace à la coordonnée  $(X_T, Y_T, Z_T)$  on obtient:

$$-\sin(i_{o})(X - X_{T}) + \cos(i_{o})(Z - Z_{T}) = 0$$
  
$$-\sin(i_{o})X + \cos(i_{o})Z = -\sin(i_{o})X_{T} + \cos(i_{o})Z_{T} = z'_{o}$$

et comme:

$$X_T = R \cos l_o(t) \sin L_o(t)$$
$$Z_T = R \sin l_o(t)$$

On obtient finalement:

$$z'_{a} = R \sin l_{a}(t) \cos i_{a} - R \cos l_{a}(t) \sin L_{a}(t) \sin i_{a} \qquad 2.4.11$$

Notons ici la différence entre l'équation 2.4.11 et l'équation 2.3.6 correspondante de la phase II. On obtient maintenant:

$$L_0(t) = \psi + L_0 - L_s$$

alors qu'on avait:

$$L_0(t) = \psi + L_s - L_0$$

On peut trouver  $\alpha'_o$  aisément par:

$$\alpha'_o = \sin^{-1}\left\{\frac{z'_o}{d'_o}\right\}$$
2.4.12

Pour déterminer  $\beta'_o$ , il suffit d'appliquer la loi du cosinus en se référant à la figure 2.4b. On obtient:

$$V^{2} = (D_{o} + R)^{2} + (d'_{o} \cos \alpha'_{o})^{2} - 2(D_{o} + R)d'_{o} \cos \alpha'_{o} \cos \beta'_{o} - \frac{1}{V^{2}} = R^{2} - (z'_{o})^{2}$$

Donc:

$$\beta'_{o} = \cos^{-1}\left\{\frac{\left(D_{o} + R\right)^{2} + \left(d'_{o} \cos \alpha'_{o}\right)^{2} - V^{2}}{2(D_{o} + R)d'_{o} \cos \alpha'_{o}}\right\}$$
2.4.13

Cette équation ne nous permet cependant pas de déterminer le signe de  $\beta'_o$  car le résultat de arccosinus() est numériquement toujours positif entre 0 et 180 degrés. Il existe donc une indétermination sur le signe de  $\beta'_o$  tel qu'obtenu par l'équation 2.4.13. Pour résoudre ce problème, il suffit de recalculer les coordonnées du gain maximum en utilisant les valeurs des paramètres de références obtenues par les équations 2.4.10 à 2.4.13 dans les équations 2.2.1 à 2.2.7. Si on obtient les coordonnées initiales du gain maximum,  $\beta'_o$  est positif si non il doit être négatif.

#### 2.5 Calcul du déplacement des zones de service

Dans cette section nous utiliserons les équations développées aux sections précédentes pour calculer le déplacement d'une zone de service pour toutes valeurs de y et d'inclinaison de l'orbite  $i_0$ , que le satellite possède ou non un système de repointage des antennes. ou que l'on connaisse les coordonnées géographiques de la zone de couverture ou les caractéristiques du faisceau d'antenne.



# 2.5.1 Le satellite ne possède pas de système de repointage de ses antennes (pire cas)

Dans cette situation, il suffit de calculer les paramètres de références  $(\alpha_k, \beta_k, d_k)$ pour chaque point du contour à l'aide des équations 2.1.1 à 2.1.5 si l'on connaît les coordonnées  $(l_k, L_k)$  des points du contour, ou les équations 2.3.1 à 2.3.7 si l'on connaît les caractéristiques du faisceau (BW<sub>h</sub> Bw<sub>v</sub> et l<sub>0</sub> L<sub>0</sub>).

Une fois ces trois paramètres obtenus pour chaque point k, on suppose que ceux-ci demeurent fixes durant la dérive du satellite et on calcule les nouvelles coordonnées géographiques  $(l'_k, L'_k)$  de chacun des points à l'aide des équations 2.2.1 à 2.2.7. Dans le cas où l'on dispose seulement des caractéristiques du faisceau, il faut en plus calculer les paramètres  $(\alpha_0, \beta_0, d_0)$  du gain maximum à l'aide des équations 2.1.1 à 2.1.5. Voir figure 2.5.

# 2.5.2 Le satellite possède un système de repointage de ses antennes (meilleur cas)

On procède ici de la même façon qu'à la section 2.5.1 sauf que maintenant les paramètres de références du gain maximum  $(\alpha_0, \beta_0, d_0)$  ne sont plus fixes et devront être recalculés à chaque valeur de y et i<sub>0</sub> à l'aide des équations 2.4.10 à 2.4 13  $(\alpha'_0, \beta'_0, d'_0)$  pour obtenir de nouveaux paramètres  $(\alpha'_k, \beta'_k)$  comme suit:

$$\alpha'_k = \alpha_k - \alpha_0 + \alpha'_0$$
$$\beta'_k = \beta_k - \beta_0 + \beta'_0$$

 $d'_k$  quant à lui est calculé à l'aide de l'équation 2.3.7 en utilisant  $\alpha'_k$  et  $\beta'_k$  comme paramètres.

#### 2.6 Résultats

Nous avons repris les résultats présentés à la phase II en tenant compte des corrections présentées dans les sections 2.1 à 2.4. Ces résultats sont présentés aux figures 2.6.1 à 2.6.11. Nous avons ajouté aux résultats de la phase II, les figures 2.6.3, 2.6.8 et



Figure 2.5

2.6.11, le cas où le satellite possède un système de contrôle du lacet. Ces nouvelles courbes permettent de vérifier la validité des équations présentées.

En effet, si on examine celles-ci, on remarque que les zones de couverture pour y = 0, y = 180 et  $i_0 = 0$  sont confondues..

Notons également que les courbes présentées ici sont plus précises et régulières que celles présentées dans le précédent rapport, lesquelles ont été tracées à main levée. On a pu développer un programme qui nous permet d'afficher directement les résultats calculés sur un globe terrestre. La projection utilisée pour ce faire est une simple projection parallèle de l'image 3D sur le plan 2D de l'écran.

Enfin, les deux derniers résultats présentés, les figures 2.6.12 et 2.6.13, constituent un cas extrême où la dérive est excessive. Mais ce cas extrême permet cependant de tester à fond l'algorithme et le contrôle du lacet.

Dans le cas de la figure 2.6.12, il n'y a aucun contrôle de l'antenne. On peut alors observer les déplacements en latitude et en longitude de la zone de couverture. De plus, dans ce cas, l'antenne subit un angle de rotation (angle de lacet) variant en fonction de y. Le faisceau a été choisi assez excentrique afin de mieux visualiser cet effet de rotation.

A la figure 2.6.13, on considère la même situation, mais cette fois-ci avec un contrôle parfait de l'angle de lacet. On remarque que malgré la dérive de la zone de service, le faisceau demeure parallèle à son axe d'origine.

#### 2.7 Conclusion

......

Une vérification approfondie des équations présentées à la phase II pour le calcul des déplacements des zones de service a permis de constater la validité de ces équations dans leur ensemble. On a pu découvrir à quelques endroits des erreurs de signes qui avaient pour effet global une inversion de 180 degrés des zones de couverture.

En effet, on a pu constater lors du traçace des résultats pour un angle de y=0 que le déplacement obtenu de la zone correspondait en fait à celle qu'on aurait eu pour y=180 degrés. Cette découverte n'a cependant pas d'impact important sur les courbes présentées à

la phase II relatives aux zones de couverture car ces zones étant identifiées à la main, elles l'ont été correctement malgré l'inversion présente.

Cependant, cette inversion de 180 degrés des zones de couverture aura, comme nous le verrons plus loin, un impact plus marqué sur les résultats présentés au chapitre suivant relatifs au calcul de C/I, par rapport à ceux présentés à la phase II (surtout pour le pire cas).

Une nouvelle équation, exacte celle-ci, pour le calcul de l'angle de lacet a été également présentée.

Une description, que nous espérons plus claire et plus détaillée, a été donnée à l'aspect mathématique du problème du déplacement des zones de couverture.

Tout ceci nous permet d'avoir une bonne confiance en la méthode développée dans ce contrat pour le calcul des zones de couverture.



.


















.







# **CHAPITRE 3**

# **CALCUL DES INTERFERENCES**

### 3.1 Introduction

Dans le rapport de la phase II (2), nous avons présenté une formulation globale en ce qui concerne le calcul des interférences que subit une antenne réceptrice terrestre quelconque. Cette méthodologie tient compte, et ce de manière générale, de tous les rayonnements montants des émetteurs terrestres, aussi bien que de tous les rayonnements descendants des émetteurs de satellites. En pratique, ce sont les rayonnements descendants qui jouent le rôle dominant. Dans ce chapitre, nous donnons donc seulement les résultats numériques des rapports  $[C/I]_D$  (porteuse sur interférence) dus à ces rayonnements descendants. Toutefois, le programme développé permet d'analyser toute situation quelconque. Il s'agit tout simplement d'une opération d'addition des puissances qui interviennent dans le calcul.

Il est important de noter que cette méthode de calcul englobe tous les paramètres discutés au chapitre 2. En effet, si l'on considère un ensemble de N satellites brouilleurs en présence du principal, étant donné une corrélation nulle entre eux, la puissance totale I des interférences est la somme des puissances individuelles que le récepteur principal reçoit de chacun des satellites brouilleurs. Le problème se réduit donc à calculer la puissance provenant d'un seul satellite brouilleur. Cette puissance, telle que discutée dans le chapitre 2, dépend de tous les paramètres caractérisant la position du satellite en orbite inclinée, ainsi que des paramètres contrôlant les antennes terrestres et des satellites.

## **3.2** Calcul du rapport C/I

La formulation générale du problème de calcul des radio-interférences est présenté en détail dans (2). Cette formulation est contenue de manière complète dans le programme inclus



dans l'appendice 1. Cependant, pour quelqu'un qui ne s'intéresse qu'à l'interférence à la réception terrestre, seuls les rayonnements descendants qui importent. Dans la suite de ce chapitre, nous allons discuter ce problème étape par étape. Considérons le réseau des satellites montré à la fig.3.1.a. Un groupe de N satellites brouilleurs  $S_{Bi}$  contribue à provoquer l'interférence au récepteur, chacun d'une puissance  $I_i$ ; tandis que la puissance reçue au récepteur du satellite principal  $S_U$  est C. L'effet des interférences est donc mesuré par le rapport [C/I]<sub>D</sub> où I est la puissance totale des interférences définie comme:

$$I = I_1 + I_2 + \dots + \dots I_N$$
 3.2.

Pour alléger l'écriture, nous utisons C/I pour désigner le rapport  $[C/I]_D$ . Calculer I revient ainsi à déterminer chacun des I<sub>i</sub>. La fig3.1.b montre les paramètres géométriques impliqués dans le processus de calcul.

Quand il y a une poursuite parfaite du satellite principal, l'angle  $\phi_{RU}$  est nulle. Et quand il y a un repointage parfaite de l'antenne du satellite principal, l'angle  $\eta_{TU}$  s'annulle. La puissance utile C et la puissance d'interférence I<sub>i</sub> reçues à la station terrestre sont respectivement:

$$C = P_{sU}g_{TU}(\eta_{TU})G_{RU}(\phi_{RU})/l_{D}$$
 3.2.2

$$I = P_{SB} g_{TB} (\gamma_{TB}) G_{RU} (\phi_{RB}) / I'_{D}$$
 3.2.3

Pour la clarté de la compréhension, nous reprenons la définition des paramètres comme suit:

 $P_{Si}$ : puissance de transmission du satellite utile (i = U) ou brouilleur (i = B);  $G_{RU}$ :. gain de l'antenne de réception de la station terrestre utile;

g<sub>Ti</sub> : gain de l'antenne de transmission du satellite utile (i = U) ou brouilleur (i = B);  $l_{\rm D}(l'_{\rm D}) = \frac{(4\pi D_{\rm i})^2}{2^2}$ :

affaiblissement de réception en espace libre sur la liaison descendante utile ( $l_D$ ) ou brouilleuse ( $l'_D$ ),  $D_i$  représentant la distance entre l'antenne de réception de la station terrestre et l'antenne de transmission du satellite;  $f = c/\lambda$  correspond à la fréquence moyenne de la bande commune aux deux réseaux;  $\phi_{Ri}$ : angle entre la direction de réception à gain maximal de l'antenne terrestre et le satellite utile (i = U) ou du satellite brouilleur (i = B);

 $\gamma_{\text{TB}}$ : angle entre la direction de transmission à gain maximal de l'antenne du satellie brouilleur et la station terrestre;

 $\eta_{TU}$ : angle entre la direction de transmission à gain maximal de l'antenne du satelliie utile et la station terrestre;

Pour utiliser ces formules, on a besoin de connaître les patrons de rayonnement des antennes, car les gains de transmission et de réceptions en dépendent. Dans le programme développé, on demande effectivement la définition de ces patrons, soit de type circulaire soit de type ellitique. De plus, la puissance maximale et l'ouverture à 3dB doivent être également spécifiés.

#### 3.3 Résultats et discussion

Pour comparer les résultats de cette phase avec les résulaats obtenus dans (2), nous avons repris des situations identiques traitées dans (2). De plus, nos considérons un réseau de deux satellites brouilleurs en présence du principal

#### 3.3.1 Cas d'un seul satellite brouilleur

Les résultats présentés aux figures 3.3.1 aux 3.3.8 sont obtenus pour les conditions suivantes:

a) Même inclinaison du satellite utile et brouilleur. Cette inclinaison est donnée en abcisse en degrés

b) Pour les figures 3.3.1 à 3.3.4 inclusivement, le patron utilisé est celui de service fixe avec un diamètre d'antenne de 20 mètres et une fréquencede 4.5 GHz.

c) Pour les figures 3.3.5 à 3.3.8 inclusivement le patron utilisé est celui du service de radio-diffusion avec un diamètre d'antenne de 1.5 mètres et une fréquence de 12 GHz.

d) Pour ces situations, on suppose une poursuite parfaite du satellite principal. l'attitude x et la logitude y sont montrées en parenthèse (x,y).





Faisceau utile 0.5° x 1°: Point maximum (50.72)



------

Fig. 3.3.1b

Paramètres: comme figure 3.3.1a







Faisceau brouilleur  $0.5^{\circ} \times 1^{\circ}$ : Point maximum (35.80) Faisceau utile  $0.5^{\circ} \times 1^{\circ}$ : Point maximum (50.72)

Point maximum (50.72<sub>)</sub>





52

.



Paramètres: comme figure 3.3.3a



Paramètres: comme figure 3.3.3a

.



Long. satellite brouilleur  $122^{\circ}$ , satellite utile  $112.5^{\circ}$ , Pire cas Faiscau brouilleur  $3^{\circ} \ge 1^{\circ}$ : Point maximum (38.100) Faisceau utile  $3^{\circ} \ge 0.^{\circ}$  5: Point maximum (52.95)



Paramètres: comme figure 3.3.5a





Paramètres: comme figure 3.3.5a



Paramètres: comme figure 3.3.5a





- - - -

Paramètres: comme figure 3.3.7a



Fig. 3.3.8a

Paramètres: comme figure 3.3.7a



e) Le pire cas et le meilleurr cas sont considérés pour chaque situation. Les deux satellites sont supposés correspondre ensemble au pire ou au meilleur cas.

Etant donné une grande variation d'un nombre élevé de paramètres, il parait quasiimpossible de dégager une conclusion globale. Les fifures 3.3.1 à 3.3.4 montrent l'effet de la dérive pour des couvertures régionales des satellites utile (Est du Canada) et brouilleur (Est des Etats Unis). Les stations réceptrices utiles considérées se trouvent au Canada dans ce faisceau régional et on voit comment une dérive nor-sud d'un satellite américain couvrant l'Est des Etats-Unis les affecte. En absence de repointage, l'interférence est maxmimale pour une station située à (45, 80) pour une inclinaison de  $i_0 = 9^0$ .

Les figures 3.3.5 à 3.3.8 montrent l'effet de la dérive pour des couvertures globales du Canada et des Etats-Unis. Les stations couvrent de l'Ouest à l'Est du Canada. Les résultats montrent que l'effet de la dérive dépend très fortement de l'emplacement de la station, ce qui est tout à fait naturel. De plus, quand le satellite repointe son antenne, la situation s'améliorent nettement.

#### 3.3.2 Cas de deux satellites brouilleurs

Considérons maintenant la situations de deux satellites brouilleurs en présence du principal. Notre formulation offre une simplicité de calcul, où on a nullement besoin de situer les positions relatives entre les satellites en jeu. En effet, même si les angles  $\psi_B$  et  $\psi_U$ , de même que les autres paramètres nécessaires aux calculs, sont des coordonnées relatives de chacun des satellites; comme on calcule séparément la puissance d'interférence, chaque groupe de paramètres entrent en jeu de manière indépendante. On n'a donc pas besoin de tenir compte la simultanéité de ces cordonnées. Ainsi, la situation que nous analysons est la suivante:

La station réceptrice est de type de service fixe, ayant une antenne de 20 mètres de diamètre et opérant à la fréquence 4.5 GHz.; elle se trouve à 45<sup>0</sup> nord et 80<sup>0</sup> ouest. Elle reçcoit le signal utile provenant d'un satellite géo-stationnaire ( $i_0 = 0^0$ ) à la lattitude  $L_S = 112.5^0$  ouest . Son antenne, pointé vers le point 45<sup>0</sup> nord et 80<sup>0</sup> ouest, est de type elliptique dont l'ouverture de 3dB est définie par BW<sub>V</sub> = 0,7<sup>0</sup> et BW<sub>H</sub> = 1,2<sup>0</sup>.

Ce système de communication est perturbé par deux satellites brouilleurs évoluant dans le même plan orbital d'inclinaison Le premier satellite brouilleur  $S_{B1}$  se trouve à la

lattitude  $L_S = 99^0$  ouest . Son antenne est de type ellitique dont l'ouverture de 3dB est définie par  $BW_V = 1,5^0$  et  $BW_H = 3,0^0$ , son antenne pointant vers le point  $38^0$  nord et  $100^0$  ouest. Le deuxième satellite brouilleur  $S_{B2}$  se trouve à la à la lattitude  $L_S = 95^0$  ouest . Son antenne est de type circulaire dont l'ouverture de 3dB est de  $1,0^0$ , son antenne pointant vers le point  $38^0$  nord et  $80^0$  ouest.

Les zônes de couverture quand tous les trois satellites se trouvent en orbite géostationnaire sont montrées à la figure 3.3.9. Ce graphique montrent qualitativement le phénomène d'interférence potentiel entre ces satellites. Le mouvement des surfaces de couverture risqueraient de provoquer un effet sérieux. Les résultats numériques sont donnés aux figures 3.3.10 à 3.3. 25. Les familles de courbes montrées correspondent à un angle  $\psi_{B2}$  fixe, en fonction de l'inclinaison orbitale commune i<sub>0</sub>, et paramétrisées en  $\psi_{B1}$ Les figures 3.3.10 à 3.3.17 correspondent au cas où les antennes des satellites restent solidement fixés au corp des satellites (pire cas). les autres figures 3.3.18 à 3.325 correspondent au cas de repointage des antennes des satellites (meilleur cas). Il est surprenant de remarquer que le rapport C/I ne descend jamais en bas de 55 dB.

Pour cette situation précise, on n'observe pas de tendance présise pour l'effet des interférences. Dans plusieurs cas, cette interférence globale diminue quand l'inclinaison augmente. Par contre, pour d'autres, cette effet devient minimun pour un angle d'inclinaison entre 5 et 6 degrés.

#### 3.4 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre la formulation simple permettant de calculer l'effet global des interférences provoquées par l'abscence du contrôle nord-sud des satellites en orbite géo-synchrones. On observe que dès que l'inclinaison de l'orbite devient perceptible. i.e. dépassant 0,1 degré, il est nécessaire que la station terrestre poursuit son satellite.

Nous avons également étudié un réseau de deux satellites brouilleurs en dérive.et le satellite principal géo-stationnaire. Il en ressort que l'effet de l'interférence globale ne suit vraiment pas une loi qualitative précise. Toutefois, on se rend compte que si le satellite principal est géo-stationnaire, l'effet de l'interférence n'est pas très significative. En effet, pour la configuration étudiée, le rapport C/I est toujours supérieur à 55dB.



fig. 3.3.9





fig. 3.11

••












72





74







•









.

# **CHAPITRE 4**

## CONCLUSION

Ce rapport, le troisième et dernier du projet portant sur l'étude des effets de la dérive des satellites géostationnaires, vise à mette un point final sur la construction d'une m.thodologie à la fois analytique et numérique pour déterminer le mouvement des surfaces de couverture terrestre ainsi que pour quantifier le rapport C/I au récepteur.

Etant donné la grande complexité du problème, on doit accorder beaucoup d'attention à la vérification des développements mathématiques et de la programmation. Les résultats mathématiques présentés dans ce rapport peuvent être considérés comme définitifs, car les résultats obtenus sont tout à fait cohérents avec des interprétations physiques de la circonstance.

Le chapitre 2 reprend reprend la présentation des raisonnements mathématiques pour mieux suivre le développement des formules analytiques. Ainsi, avec l'aide des figures géométriques définissant clairement la configuration, les formules sont dérivées de manière plus accessible. Ces formules, présentées de manière plus rigoureuse que celles du (2), sont par la suite utilisées pour calculer le rapport C/I entre les puissances de la porteuse pricipale et des interférences.

Il est important de noter que la formulation du problème des interférences présentées dans (2) est rigoureusement exacte. Les résultats mathématiques de(2), en ce qui concerne le calcul du rapport C/I, restent donc valables. La seule modification à apporter est le changement des termes provenant du chapitre 2, ce qui est tenu compte dans le programme de calcul de C/I. La partie mathématique de (2) n'est donc pas reprise dans ce rapport; par contre, on y trouve une discussion sur la technique de simplication de la procédure de calcul, quand on s'intéresse particulièment aux rayonnements descendants, c'est-à-dire, à la reception terrestre des puissances des satellites utile et brouilleurs. A prime abord, le cacul des puissances d'interférence pour un réseau de plusieurs satellites semble complexe; toutefois, dû à un raisonnement simple, ce problème se réduit à un calcul équivalent à celui d'un seul satellite brouilleur!

Les programmes, écrits en language C, sont organisés de manière systématique pour couvrir la configuration la plus générale: Un ensemble de N satellites brouilleurs et un principal, chacun peut être en dérive ou non, avec le repointage de l'antenne ou non etc... Quant aux calculs des rapport C/I, en plus des conditions précédemment mentionnées, on peut décire l'antenne de trasmission tout aussi bien que de réception, soit par la géométrie de l'antenne (i.e, la taille et la fréquence), soit par une description du gain et du diagramme de rayonnement.(puissance maximale, type d'antenne, ouverture de 3dB) Cette généralité permet aux utilisateurs d'utiliser ces programmes pour analyser la situation qui les intéressent.

Quant au comportement même du rapport C/I, on observe qu'il est impossible de dégager une conclusion générale sur l'effet des dérives sur la performance des récepteurs terrestres, car le nombre de parètres en jeu est trop nombreux. Quelques conclusions qualitatives pourraient quand même être formulées:

a) Malgré une variation imprévisible, il est noté que dans le cas où le rapport C/I diminue avec l'inclinaison de l'orbite, il parait que ce rapport, tout au moins pour les situations analysées dans ce rapport, reste supérieure à 25 dB. Cette valeur, en communications numériques, pourrait être acceptable, dépendemment de la modulation utilisée.

b) Si le satellite principal est géostationnaire, l'influence des satellites en dérive, en cas de poursuite parfaite, tout au moins pour la situation considérée dans ce rapport, n'est pas particulièrement forte, car le rapport C/I ne descend jamais en bas de 50 dB.

Pour pouvoir conclure de manière vraiment fiable, il faudra examiner un grand nombre de situations réelles. Ces programmes développés dans ce projet sont effectivement l'outil de travail nécessaire à de telles études. Et d'ailleurs c'est le but visé, i.e. établir une méthodologie fiable permettant à quiconque s'intéressant à ce problème de pouvoir analyser sa situation et en tirer une conclusion valable!.

83

## **APPENDICE 1**

· ---

.,

Les programmes pour calculer le déplacement des surfaces de couvertures terrestre et le rapport C/I C:\MEGAMAX\DESATI\BRUIT.C Laser C 25-Mar-91 08:44 Page # 1 1 #include <math.h> 2 #include <stdio.h> 3 #include "define.h" 4 5 6 double AttenuationAtmosphere(); 7 double AttenuationPluie(); double TemperatureBruit(); 8 9 double PuissanceReception(); double GainAntenneStation(); 10 double GainAntenneSatellite(); 11 12 double SignalMontant(); 13 double SignalDescendant(); 14 double InterferenceMontante(); 15 double InterferenceDescendante(); double ErreurPointageStation(); 16 double ErreurPointageSatellite(); 17 18 double DistanceSatelliteStation(); 19 20 21 double 22 AttenuationAtmosphere(f,elev) 23 24 double f,elev; 25 26 { 27 double rw,hs,ho,hw,Ag; 28 double go,gw; 29 30 rw = 10; 31 hs = 0;go = 0.001\*((7.1/(sqr(f)+.36))+(4.5/(sqr(f-57)+.98)))\*sqr(f); 32 33 gw = 0.0001\*(0.067+(3/(sqr(f-22.3)+7.3)))\*rw\*sqr(f); 34 ho = 6; 35 hw = 2.2+(3/(sqr(f-22.3)+3));36 Ag = (go\*ho\*exp(-hs/ho)+gw\*hw)/sin(elev); 37 return(Ag); 38 } 39 40 double 41 AttenuationPluie(f,elev,lat) 42 double f,elev,lat; 43 44 45 { 46 double Ap,a,b,ls,hr,hs,rp; 47 double teta,phi; 48 49 teta = elev\*RadToDeg; 50 phi = lat\*RadToDeg; 51 a = 4.21E-5\*powerd(f, 2.42);52 b = 1.41\*powerd(f,-0.0779); 53 hr = 5.1-2.15\*log10(1+powerd((double)10, (phi-27)/25)); hs = 0.5;54 55 if (teta >= 10) {

```
C:\MEGAMAX\DESATI\BRUIT.C Laser C
                                        25-Mar-91 08:44
                                                             Page # 2
  56
               ls = (hr-hs)/sin(elev);
   57
               }
   58
           else {
   59
               ls = 2*(hr-hs)/(sqrt(sqr(sin(elev))+(hr-hs)/4250)+sin(elev));
   60
               }
   61
           rp = 90/(90+4*ls*cos(elev));
   62
           Ap = a*powerd((double)40,b)*ls*rp;
   63
           return(Ap);
   64
           }
   65
       double
   66
       TemperatureBruit(f,elev,lat)
  67
   68
   69
           double f,elev,lat;
   70
   71
           {
   72
           double tempi,temp2,Ag,Ap;
   73
   74
           Ag = AttenuationAtmosphere(f,elev);
   75
           Ap = AttenuationPluie(f,elev,lat);
   76
           temp1 = 280*(1-powerd((double)10,-Ag/10));
   77
           temp2 = 280*(1-powerd((double)10,-Ap/10));
   78
           return(temp2);
   79
           }
   80
   8i
       double
   82
       PuissanceReception(type, pt, phi, gamma, dist, station, sat, ant)
   83
   84
           short
                        type;
   85
           double
                        pt,phi,gamma,dist;
   86
           statMod
                        *station;
   87
           satMod
                        *sat;
   88
           satGain
                        *ant;
   89
   90
   91
           {
   92
           double
                        gainStat,gainSat;
   93
           double
                        perte,lambda,pr;
   94
           statGain
                        *statAnt;
   95
   96
           statAnt = &(station->ant);
   97
           lambda = statAnt->lambda;
   98
           perte = sqr(4*PI*dist/lambda);
   99
           gainStat = GainAntenneStation(type,phi,&(station-)ant));
  100
           gainSat = GainAntenneSatellite(gamma, sat, ant, &(station->pos));
  101
           pr = pt*gainStat*gainSat/perte;
  102
           return(pr);
  103
           }
  104
  105
       double
  105
       SignalMontant(sysUtile,sysBruit)
  107
  108
           sysComm
                        *sysUtile;
  109
           sysComm
                        *sysBruit;
  110
```

. . . . . .

.....

......

. . . . . . . . . .

....

```
C:\MEGAMAX\DESATI\BRUIT.C
                           Laser C
                                        25-Mar-91 08:45
                                                             Page # 3
 111
           {
 112
           satMod
                        *su;
           statMod
 113
                        *tu;
  114
           double
                        phi,gamma;
  115
           satPos
                        suStat; ----
  115
           satGain
                        *rAnt;
  117
           double
                        cm, dist;
  118
           double
                        ρT;
  119
           short
                        type;
  120
  121
           type = sysUtile->statType;
  122
           pT = sysUtile->pTStat;
  123
           su = &(sysUtile->sat);
  124
           tu = &(sysUtile->tStat);
  125
           rAnt = &(su-)rAnt);
  126
           suStat.io = 0;
  127
           suStat.Ls = (&(su-)pos))->Ls;
  128
           suStat.psi = (&(su->pos))->psi;
  129
  130
           if (su->derive) {
  131
               if (tu->poursuite) { -
  132
                   phi = 0;
  133
                    }
  134
               else {
  135
                    phi = ErreurPointageStation(&(tu->pos),&suStat,&(su->pos));
  136
                    }
  137
               if (!su->direct) {
  138
                    CalculNouvellesCoordGainMax(&(rAnt->gMax),&(rAnt->gMax),&(su->pos));
  139
                    }
               }
  140
  141
           else {
  142
               (&(su->pos))->io = 0;
  143
               phi = 0;
  144
               }
  145
           gamma = ErreurPointageSatellite(&(rAnt-)gMax),&(tu-)pos),&(su-)pos));
  146
           dist = DistanceSatelliteStation(&(tu->pos),&(su->pos));
  147
           cm = PuissanceReception(type,pT,phi,gamma,dist,tu,su,rAnt);
  148
           return(ca);
  149
           }
  150
  151
       double
       SignalDescendant(sysUtile,sysBruit)
  152
  153
  154
                        *sysUtile;
           sysComm
  155
           sysComm
                        *sysBruit;
  156
  157
           {
  158
           satMod
                        *su;
  159
           statMod
                        *ru;
  160
           double
                        phi,gamma;
  161
           satPos
                        suStat;
  162
           sat6ain
                        *tAnt;
  163
           double
                        cd, dist;
  164
           double
                        pT;
  165
           short
                        type;
```

. ....

```
166
167
         type = sysUtile->statType; 
168
         pT = sysUtile->pTSat;
169
         su = &(sysUtile->sat);
170
         ru = &(sysUtile->rStat); ____
171
         tAnt = &(su->tAnt);
172
         suStat.io = 0; ....
173
         suStat.Ls = (&(su->pos))->Ls;
174
         suStat.psi = (&(su->pos))->psi;
175
176
         if (su-)derive) {
177
             if (ru->poursuite) {
178
                 phi = 0;
179
                  }
180
             else {
181
                  phi = ErreurPointageStation(&(ru->pos),&suStat,&(su->pos));
182
183
             if (!su->direct) {
184
                  CalculNouvellesCoordGainMax(&(tAnt->gMax),&(tAnt->gMax),&(su->pos));
185
                  }
             }
186
187
         else {
188
              (&(su->pos))->io = 0;
189
             phi = 0;
190
              }
191
         gamma = ErreurPointageSatellite(&(tAnt-)gMax),&(ru-)pos),&(su-)pos));
192
         dist = DistanceSatelliteStation(&(ru->pos),&(su->pos));
193
         cd = PuissanceReception(type,pT,phi,gamma,dist,ru,su,tAnt);
194
         return(cd);
195
         }
196
197
     double
198
     InterferenceMontante(sysUtile, sysBruit)
199
200
          sysComm
                      *sysUtile;
201
          sysComm
                      *sysBruit;
202
203
         {
204
          satMod
                      ¥su,¥sb;
205
         statMod
                      *tb;
206
          sat6ain
                      *rAnt;
207
         double
                      phi,gamma;
208
          satPos
                      sbStat:
209
          double
                      ia,dist;
210
          double
                      pT;
211
          short
                      type;
212
213
          type = sysBruit->statType;
214
          pT = sysBruit->pTStat;
215
          su = &(sysUtile->sat);
216
          sb = &(sysBruit->sat);
217
          tb = &(sysBruit->tStat);
218
          rAnt = &(su->rAnt);
219
          sbStat.io = 0;
220
          sbStat.Ls = (&(sb->pos))->Ls;
```

### C:\MEGAMAX\DESATI\BRUIT.C Laser C 25-Mar-91 08:46 Page # 5

221

222 223

224

225

226

227

228

229

230

231

233

234

237

238

239

240 241

247

251

254

257

263 264

266 267

269

271

```
sbStat.psi = (&(sb->pos))->psi;
         if ((su->derive) AND (sb->derive)){
             if (!su->direct) {
                 CalculNouvellesCoordGainMax(&(rAnt->gMax),&(rAnt->gMax),&(su->pos));
                 }
             if (tb->poursuite) {
                 phi = ErreurPointageStation(&(tb->pos),&(sb->pos),&(su->pos));
                 }
             else {
                 phi = ErreurPointageStation(&(tb-)pos),&sbStat,&(su-)pos));
232
                 }
             }
         if ((su->derive) AND (!sb->derive)) {
235
             (&(sb->pos))->io = 0;
236
             if (!su->direct) {
                 CalculNouvellesCoordGainMax(&(rAnt->gMax),&(rAnt->gMax),&(su->pos));
                 }
             phi = ErreurPointageStation(&(tb->pos),&(sb->pos),&(su->pos));
         if ((!su->derive) AND (sb->derive)) {
242
             (&(su->pos))->io = 0;
243
             if (tb->poursuite) {
244
                 phi = ErreurPointageStation(&(tb->pos),&(sb->pos),&(su->pos));
245
                 }
246
             else {
                 phi = ErreurPointageStation(&(tb->pos),&sbStat,&(su->pos));
249
                 }
249
             3
250
         if ((!su->derive) AND (!sb->derive)) {
             (\&(su-)pos)) - io = 0;
252
             (&(sb->pos))->io = 0;
253
             phi = ErreurPointageStation(&(tb->pos),&(sb->pos),&(su->pos));
255
         gamma = ErreurPointageSatellite(&(rAnt->gMax),&(tb->pos),&(su->pos));
256
         dist = DistanceSatelliteStation(&(tb-)pos),&(su-)pos));
         im = PuissanceReception(type,pT,phi,gamma,dist,tb,su,rAnt);
258
         return(im);
259
         }
260
261
    double
262
    InterferenceDescendante(sysUtile, sysBruit)
         sysComm
                     *sysUtile;
265
         sysComm
                     *sysBruit;
         {
268
         satMod
                     *su,*sb;
         statMod
                     ¥ru;
270
         sat6ain
                     *tAnt;
         double
                     phi,gamma;
272
         satPos
                     suStat;
273
         double
                     id, dist;
                     pT;
274
         double
275
         short
                     type;
```

\MEGAMAX\DESATI\BRUIT.C Laser C 25-Mar-91 08:47 Page # 6

276 277

278

279

280

281

282

283

284

285

286 287

288

289

290

291

292

293

294

295

296

297

298

299

300

301

302

303

304

305

306

307

308

309

310

311

312

313

315

316

317

318

321

- Heren . . . . . . . . . . . .

type = sysUtile->statType; pT = sysBruit->pTSat; su = &(sysUtile-)sat); sb = &(sysBruit->sat); ru = &(sysUtile->rStat); tAnt = &(sb->tAnt); suStat.io = 0; suStat.Ls = (&(su->pos))->Ls; suStat.psi = (&(su->pos))->psi; if ((su->derive) AND (sb->derive)) { if (!ru-)poursuite) { phi = ErreurPointageStation(&(ru->pos),&(sb->pos),&suStat); } else { phi = ErreurPointageStation(&(ru->pos),&(sb->pos),&(su->pos)); } if (!sb->direct) { CalculNouvellesCoordGainMax(&(tAnt-)gMax),&(tAnt-)gMax),&(sb-)pos)); } } if ((su->derive) AND (!sb->derive)) { (&(sb->pos))->io = 0; if (ru->poursuite) { phi = ErreurPointageStation(&(ru-)pos),&(sb-)pos),&(su-)pos)); 1 else { phi = ErreurPointageStation(&(ru->pos),&(sb->pos),&suStat); } } if ((!su->derive) AND (sb->derive)) { (&(su->pos))->io = 0; if (!sb->direct) { CalculNouvellesCoordGainMax(&(tAnt->gMax),&(tAnt->gMax),&(sb->pos)); } phi = ErreurPointageStation(&(ru-)pos),&(sb-)pos),&(su-)pos)); } 314 if ((!su->derive) AND (!sb->derive)) { (&(su->pos))->io = 0;  $(\alpha(sb-)pos)) - io = 0;$ phi = ErreurPointageStation(&(ru->pos),&(sb->pos),&(su->pos)); 319 gamma = ErreurPointageSatellite(&(tAnt->gMax),&(ru->pos),&(sb->pos)); 320 dist = DistanceSatelliteStation(&(ru->pos),&(sb->pos)); id = PuissanceReception(type,pT,phi,gamma,dist,ru,sb,tAnt); 322 return(id);

323 }

```
C:\MEGAMAX\DESATI\GAIN.C
                           Laser C
                                      25-Mar-91 08:50
                                                          Page # 1
      #include
   1
                  ⟨math.h⟩
   2
      #include
                  <stdio.h>
   3
      #include
                   "define.h"
   5
      double LatitudeSatellite();
    6
      double LongitudeSatellite();
   7
   8
      double CalculAngleLacet();
   9
   10 double DistanceInterSatellite();
   11 double DistanceSatelliteStation();
   12 double DistanceInterStation();
   13 double ErreurPointageStation();
   14 double ErreurPointageSatellite();
   15 double DirectionStationEllipse();
   16 double GainAntenneSatellite();
   17 double GainAntenneStation();
   18 double GainAntenneServiceFixe();
       double GainAntenneServiceRadio();
   19
   20
   21
   22
   23
       /* Calcule la distance entre deux positions de satellites */
   24
   25
      double
       DistanceInterSatellite(sata, satb)
   26
   27
   28
           satPos
                       *sata,*satb;
   29
           Ł
   30
   31
           double
                       lka,lkb;
   32
           double
                       Lka,Lkb;
   33
           double
                       dist,S;
   34
   35
           lka = LatitudeSatellite(sata);
   36
           lkb = LatitudeSatellite(satb);
           Lka = LongitudeSatellite(sata);
   37
   38
           Lkb = LongitudeSatellite(satb);
   39
           S = orbiteRayon;
   40
           if (Lka == Lkb) {
               if (1ka == 1kb) dist = 0.0;
   41
   42
               else {
   43
                   dist = sqrt(2*5*5-2*5*5*cos(1ka-1kb));
   44
                   }
               }
   45
   46
           else {
   47
               dist = sqrt((2*S*S)-2*S*S*(cos(1ka)*cos(1kb)*cos(Lka-Lkb)+
   48
                           sin(lka)#sin(lkb)));
   49
               }
   50
           return(dist);
   51
           }
   52
   53
       /* Calcule la distance entre la position d'un satellite et une
           station terrestre, ou une coordonnee terrestre quelconque */
   54
```

55

......

- - -

```
56 double
57 DistanceSatelliteStation(station, sat)
58
 59
         geoCoord
                     *station;
                                    60
        satPos
                     *sat;
61
 62
        -{
 63
         double lkt,Lkt,lks,Lks;
 64
         double R,S,dist;
 65
 66
         R = terreRayon;
 67
         S = orbiteRayon;
 68
        lkt = station->lk;
 69
         Lkt = station->Lk;
 70
       lks = LatitudeSatellite(sat);
 71
         Lks = LongitudeSatellite(sat);
 72
         if (Lks == Lkt) {
 73
             if (Ikt == Iks) dist = S - R;
 74
             else {
 75
                 dist = sqrt((S*S)+(R*R)-2*R*S*cos(lkt-lks));
 76
                 }
 77
             }
 78
         else {
 79
             dist = sqrt((S*S)+(R*R)-2*R*S*(cos(1kt)*cos(1ks)*cos(Lkt-Lks)+
 80
                         sin(lkt)#sin(lks)));
 81
             }
 82
         return(dist);
 83
         }
 84
 85
 86
 87 /* Calcule la distance entre deux stations terrestres ou deux
         coordonnees terrestres quelconques */
 88
 89
 90 double
 91 DistanceInterStation(sta, stb)
 92
 93
         geoCoord
                     *sta,*stb;
 94
 95
         Ł
 96
         double
                     dist,R;
 97
 98
         R = terreRayon;
 99
         if (sta-)Lk == stb-)Lk (
100
             if (sta-)lk == stb-)lk dist = 0.0;
101
             else {
102
                 dist = sqrt(2*R*R-2*R*R*cos(sta->1k-stb->1k));
103
                 }
104
             }
105
         else {
             dist = sqrt(2*R*R-2*R*R*(cos(sta->1k)*cos(stb->1k)*
105
107
                     cos(sta->Lk-stb->Lk)+sin(sta->lk)+sin(stb->lk)));
108
             }
109
         return(dist);
110
         }
```

```
MEGAMAX\DESATI\GAIN.C
                          Laser C
                                      25-Mar-91 08:51
                                                          Page # 3
111
 12 /* Calcule l'angle entre une station (ou coordonnee terrestre)
113
114
          et deux positions de satellites */
                             . . . . . . .
115
     double
16 ErreurPointageStation(station, sata, satb)
117
118
          geoCoord
                      *station;
119
          satPos
                      *sata,*satb;
120
121
          {
122
          double a,b,c;
123
124
          double phi;
125
          a = DistanceSatelliteStation(station, sata);
126
          b = DistanceSatelliteStation(station, satb);
127
          c = DistanceInterSatellite(sata,satb);
128
          phi = acos(((a*a)+(b*b)-(c*c))/(2*a*b));
 129
          return(phi);
130
          }
131
132
     /* Calcule l'angle entre un satellite et deux coordonnees ou
133
          stations terrestres #/
134
135
     double
 136
     ErreurPointageSatellite(stata, statb, satellite)
137
 138
          geoCoord
                      *stata,*statb;
139
          satfos
                      *satellite;
140
141
          {
142
          double a,b,c;
143
          double gamma;
144
 145
          a = DistanceSatelliteStation(stata, satellite);
 146
          b = DistanceSatelliteStation(statb,satellite);
 147
          c = DistanceInterStation(stata,statb);
 148
          gamma = acos(((a*a)+(b*b)-(c*c))/(2*a*b));
149
          return(gamma);
 150
          }
151
152
153
154
         Calcule l'angle teta d'une station a l'interieur de la zone
      /*
155
          de couverture du faisceau de l'antenne d'un satellite 🛛 */
156
157
     double
158
     DirectionStationEllipse(gainMax, station, satellite, gamma, phi)
159
160
          geoCoord
                      *gainMax, *station;
161
          satPos
                      *satellite;
162
          double
                      gamma,phi;
163
164
          {
 165
          refAngles gainMaxRef, stationRef;
```

- ---- .

-----

······

.....

-- -- -

```
166
         double
                      s,ak,bk,ao,bo;
167
         double
                      teta;
168
169
         CalculNouveauxAnglesReferences(&gainMaxRef,gainMax,satellite);
170
         CalculNouveauxAnglesReferences(&stationRef,station,satellite);
171
         ao = gainMaxRef.ak;
172
         bo = gainMaxRef.bk;
173
         ak = stationRef.ak;
174
         bk = stationRef.bk;
175
         s = (sin(ak)-sin(ao)*cos(ganma))/(sin(gamma)*cos(ao));
176
         if (bk < bo) {
177
              teta = acos(s)-phi;
178
              }
179
         else {
180
              teta = -acos(s)-phi;
181
              }
182
         return(teta);
183
         }
184
185
186
     /* Calcul le gain de l'antenne du satellite
                                                       ¥/
187
189 double
189
     GainAntenneSatellite(gamma, sat, ant, station)
190
191
         double
                      ganna;
         satMod
192
                      *sat;
193
         satGain
                      *ant;
194
         geoCoord
                      *station;
195
196
          {
197
         double v,h,r;
198
         double phi,BWh,BWv,go;
199
         double gain,teta;
200
         satPos *ps;
201
202
         ps = &(sat-)pos);
203
         if (!sat->lacet) phi = 0;
204
         else phi = CalculAngleLacet(ps);
205
         go = ant - \lambda go;
206
         BWv = ant->BWv;
207
         BWh = ant->BWh;
208
         if (dabs(gamma) > 0.00005) {
209
              v = sqr(tan(BWv));
210
              h = sqr(tan(BWh));
211
              teta = DirectionStationEllipse(&(ant-)gMax),station,ps,gamma,phi);
212
              r = sqrt((v*h)/(v*sqr(sin(teta))+h*sqr(cos(teta))));
213
              gain = go/(1+powerd(gamma/atan(r),2.5));
214
              }
215
         else gain = go;
216
         return(gain);
217
         }
218
219
220
    /* Calcul le gain de l'antenne d'une station terrienne */
```

```
221
222
     double
223
     GainAntenneStation(type, phi, antenne)
224
                         225
         short
                     type;
226
         double
                     phi;
227
         statGain
                     *antenne;
228
229
         {
230
         double gain;
231
232
         if (type == ServiceFixe) {
233
             gain = GainAntenneServiceFixe(phi,antenne);
234
235
         if (type == ServiceRadio) {
236
             gain = GainAntenneServiceRadio(phi,antenne);
237
             }
238
         return(gain);
239
         }
240
241
     double
     GainAntenneServiceFixe(phi, antenne)
242
243
244
         double
                     phi;
245
         statGain
                     *antenne;
246
247
         {
248
         double gMax,g1,pm,pr,pd;
249
         double D,ld,gain,gainDb;
250
251
         D = antenne->Diam;
252
         ld = antenne->lambda;
253
         gMax = 10#log10(antenne->gMax);
254
         qi = 2+i5*logi0(D/ld);
         pm = (20*ld/D)*sqrt(gMax-g1);
255
256
         pr = 15.85*powerd(D/ld,-0.6);
257
         pd = 100*1d/D;
258
         phi = dabs(phi)*RadToDeg;
259
         if ((D/ld) >= 100) {
260
             if ((phi >= 0) && (phi < pm)) gainDb = gMax - 0.0025*sqr(D/ld)*phi;
261
             if ((phi >= pm) && (phi < pr)) gainDb = g1;
262
             if ((phi >= pr) && (phi < 48)) gainDb = 32-25*log10(phi);
263
             if ((phi >= 48) && (phi <= 180)) gainDb = -10;
264
             }
265
         else {
266
             if ((phi >= 0) && (phi < pm)) gainDb = gMax - 0.0025*sqr(D/ld)*phi;
267
             if ((phi \ge pm) && (phi \le pd)) gainDb = g1;
268
             if ((phi >= pd) && (phi < 48)) gainDb = 52-10*log10(D/ld)-25*log10(phi);
             if ((phi >= 48) && (phi <= 180)) gainDb = 10-10*log10(D/ld);
269
270
              }
271
          gain = powerd((double)10,gainDb/10);
272
          return(gain);
273
          }
274
275 double
```

### C:\WEGAMAX\DESATI\GAIN.C Laser C 25-Mar-91 08:53 Page # 6

ال مهند.

276 GainAntenneServiceRadio(phi,antenne) 277

278 double phi; 279 statGain \*antenne;… 280 281 { 282 double gMax, phio; 283 double D, ld, gain, gainDb; 284 285 D = antenne->Diam; 286 ld = antenne->lambda; 287 gMax = 10#log10(antenne->gMax); 288 phio = 70\*(ld/D)\*DegToRad; if ((phi >= 0.000\*phio) && (phi < 0.250\*phio)) gainDb = gMax; 289 290 if ((phi >= 0.250\*phio) && (phi < 0.707\*phio)) gainDb = gMax-12\*sqr(phi/phio); if ((phi >= 0.707\*phio) && (phi < 1.260\*phio)) gainDb = gMax-9-20\*log10(phi/phio); 291 if ((phi >= 1.260\*phio) && (phi < 9.550\*phio)) gainDb = gMax-8.5-25\*log10(phi/phio); 292 if (phi >= 9.550\*phio) gainDb = gMax - 33; 293 294 gain = powerd((double)10,gainDb/10); 295 return(gain); 296 }

```
C:\MEGAMAX\DESATI\INIT.C
                            Laser C
                                       25-Mar-91 08:53
                                                            Page # 1
   1 #include
                   <math.h> _____
   2 #include
                   <stdio.h>
   3
      #include
                   "define.h"
   4
   5 void
               InitSystemeComm();
   6
      void
               InitSystemeUtile();
   7
      void
               InitSystemeBruit();
   8
      void
               InitStation();
   9
      void
               InitAntenneSatellite();
      void
  10
               InitSatellitePos();
  11
  12
  13
  14
  15 void
      InitSystemeComm(sysUtile,sysBruit)
  16
  17
  18
           sysComm
                       *sysUtile;
  19
           sysComm
                       *sysBruit;
  20
  21
           {
  22
           InitSystemeUtile(sysUtile);
  23
           InitSystemeBruit(sysBruit);
  24
           }
  25
  26
      void
  27
      InitSystemeUtile(sysUtile)
  28
  29
           sysComm
                       *sysUtile;
  30
  31
           Ł
  32
           double
                       diam,f;
  33
           satMod
                       *sat;
  34
           statMod
                       *rStat;
  35
           statMod
                       #tStat;
  36
  37
           sat = &(sysUtile-)sat);
  38
           rStat = &(sysUtile->rStat);
  39
           tStat = &(sysUtile-)tStat);
  40
           sysUtile->pTStat = 1;
  41
           sysUtile->pTSat = 1;
  42
          sysUtile->statType = ServiceFixe;
  43
           if (sysUtile-)statType == ServiceFixe) {
  44
               diam = 20;
  45
               f = 4.5E9;
  46
               }
  47
           else {
  48
               diam = 0.5;
  49
               f = 12E9;
  50
               }
  51
           InitStation(rStat,48,-100,diam,f);
  52
          rStat->poursuite = 1;
  53
           InitStation(tStat,49,-105,diam,f);
  54
           tStat->poursuite = 1;
  55
           InitAntenneSatellite(&(sat-)rAnt),40,-90,3,1);
```

1. m. .

-

C:\MEGAMAX\DESATI\UTIL.C Laser C 14-Apr-91 07:56 Page # 1 1 #include <math.h> 2 #include <stdio.h> 3 #include "define.h" 4 5 void PrintAnglesReferences(); 6 void PrintCoordCartesien(); 7 void PrintCoordGeogr(); double DistancePointSatellite(); 8 9 double ArcTangent(); 10 double LongitudeSatellite(); double LatitudeSatellite(); 11 12 double CalculAngleLacet(); 13 void CalculNouveauxAnglesReferences(); CalculAnglesReferences(); 14 void 15 void CalculCoordCartesien(); 16 void CalculCoordGeogr(); 17 void CalculFaisceauReference(); 18 double DistanceSatelliteStation(); 19 void CalculNouvellesCoordGainMax(); 20 21 22 int Determinant; 23 24 /\* Calcule l'arctangente de y/x entre + ou - PI radians et evite les problemes numeriques quand x est tres petit 25 ¥/ 26 27 28 double 29 ArcTangent(y, x) 30 31 double y,x; 32 33 { 34 double r; 35 36 if  $((y \le x) AND (y \ge -x))$  { 37 r = atan(y/x);38 } if ((y > x) AND (y > -x)) { 39 40 r = (PI/2) - atan(x/y);41 } 42 if ((y  $\langle = x \rangle$  AND (y  $\langle -x \rangle$ ) { r = (-PI/2) - atan(x/y);43 44 ) 45 if ((y > x) AND (y < -x)) ( if  $(y \ge 0) r = PI + atan(y/x);$ 46 47 else r = -PI+atan(y/x); 48 } 49 return(r); 50 } 51 52 /\* Imprime les angles de rfrences ak et bk et la distance dk 53 entre le point terrestre k et le satellite \*/ 54

=:-

\_\_\_\_\_

. . . . . . . . . . . .

••••

55 void

```
56
      PrintAnglesReferences(stream, angles)
  57
   58
           FILE
                        *stream;
   59

    refAngles

                        angles;
   60
   61
           {
   62
           fprintf(stream, "Alpha: %8.3f deg.\n", angles.ak*RadToDeg);
   63
           fprintf(stream, Beta: %8.3f deg.\n",angles.bk*RadToDeg);
   64
           fprintf(stream, "Dist: %8.3f meters\n", angles.dk);
   65
           }
   66
   67
       /* Imprime les coordonnes cartsiennes d'un point terrestre */
  68
  69
      void
  70
      PrintCoordCartesien(stream, rect)
  71
  72
           FILE
                        *stream;
   73
           rectCoord
                       rect;
  74
   75
           Ł
   76
           fprintf(stream, "X: %8.3f \n", rect.x/terreRayon);
  77
           fprintf(stream, "Y: %8.3f \n", rect.y/terreRayon);
  78
           fprintf(stream, "Z: %8.3f \n", rect.z/terreRayon);
   79
           }
  80
  81 /* Imprime les coordonnes gographiques d'un point terrestre */
  82
  83
      void
  84
      PrintCoordGeogr(stream,geo)
  85
  86
           FILE
                        *stream;
  87
           geoCoord
                        geo;
  88
  89
           {
   90
           if (Determinant < 0) {
   91
               fprintf(stream, "Latitude: ********
                                                           ");
   92
               fprintf(stream, "Longitude: *******\n");
   93
               }
   94
           else {
   95
               fprintf(stream,"Latitude: %8.3f deg. ",geo.lk*RadToDeg);
   96
               fprintf(stream, "Longitude: %8.3f deg.\n",geo.Lk*RadToDeg);
  97
               }
  98
           }
  99
  100 /* Imprime les valeurs des param
tres d'un faisceau dont la
 101
           caractristique est connue: les angles d'onverture du
 102
           faisceau BWh et BWv, la position du satellite sur son
  103
           orbite gostationnaire, les coordonnes gographiques
  104
           du gain maximum, l'angle de lacet du faisceau psi,
 105
           l'angle d'inclinaison de l'orbite io et la position
 106
           angulaire psi du satellite sur son orbite gosynchrone
 107 */
 108
 109
      PrintFaisceauParameters(stream, BWv, BWh, posSatelGeoStat, gainMax, psi, io, phi)
 110
```

- - - - - -

Laser C

14-Apr-91 07:56

Page # 2

C:\MEGAMAX\DESATI\UTIL.C

```
14-Apr-91 07:57
C:\MEGAMAX\DESATI\UTIL.C
                           Laser C
                                                          Page # 3
 111
          FILE
                       *stream;
 112
           double
                       BWv, BWh;
 113
          geoCoord
                       posSatelGeoStat;
 114
          geoCoord
                       gainMax;
 115
           double
                       psi,io,phi;
 115
           {
 117
 118
           fprintf(stream, "Faisceau: Horiz.:
                                                     %5.if deg. Vert.: %5.if deg.\n*,BWh*RadToDeg,BWv*RadToDeg);
 119
           fprintf(stream,*Longitude Satellite:
                                                     %5.1f deg.\n*,posSatelGeoStat.Lk*RadToDeg);
           fprintf(stream,"Position Gain Max.: Lat.: %5.1f deg. Long.: %5.1f\n",gainMax.1k*RadToDeg
 120
                                                                                                                   *** ** **
 121
                       ,gainMax.Lk*RadToDeg);
           fprintf(stream, "Inclinaison Orbite:
 122
                                                     %5.1f deg.\n",io*RadToDeg);
           fprintf(stream, "Psi: %5.1f deg. Phi: %8.3f deg. \n",psi*RadToDeg,phi*RadToDeg);
 123
 124
           }
 125
      /* Calcule la latitude du satellite en fonction de l'inclinaison
 126
           de l'orbite et de la position angulaire du satellite
  127
                                                                   ¥/
 128
 129 double
  130 LatitudeSatellite(s)
 131
           satPos *s;
 132
 133
  134
           {
 135
           double 1s;
  136
  137
           ls = asin(sin(s->io)*sin(s->psi));
 138
           return(ls);
 139
           }
  140
  141
       /* Calcule la longitude du satellite en fonction de l'inclinaison
           de l'orbite et de la position angulaire du satellite
 142
                                                                   -¥/
  143
  144
       double
  145 LongitudeSatellite(s)
  146
  147
           satPos *s;
  148
  149
           ł
  150
           double x,y,dL;
  151
  152
           y=cos(s->io)*sin(s->psi);
  153
           x=cos(s->psi);
  154
           dL=s->psi-ArcTangent(y,x);
           return(dL+s->Ls);
  155
  156
           }
  157
       /* Calcule la latitude et l'cart de longitude en fonction
  158
           de l'inclinaison de l'orbite et la position angulaire */
  159
  160
  161
       TestSatelliteMouvement(stream, io)
  162
  163
           FILE
                   *stream;
  164
           double io;
  165
```

.

----

Page # 4

```
166
         {
167
         double ls,dL,psi;
168
         int
                  i;
         satPos sat;
169
170
171
         sat.io = io;
172
         sat.Ls = 0;
173
         fprintf(stream, "Io: %.2f\n", io*RadToDeg);
174
         for (i=-12; i <= 12; ++i) {
175
             sat.psi = ((double)i*PI/i2);
176
             ls = LatitudeSatellite(&sat);
i77
             dL = LongitudeSatellite(&sat);
178
              fprintf(stream, "Psi: %.0f Lat: %.4f Long: %.4f\n",
179
                      sat.psi*RadToDeg,ls*RadToDeg,dL*RadToDeg);
180
             }
181
         }
182
i 83
     /* Calcule les angles de rfrences d'un point de contour par
184
         rapport au satellite sur son orbite gostationnaire */
i85
186
    void
187
     CalculAnglesReferences(angles, pt, ps)
188
189
                      *angles;
         refAngles
190
         geoCoord
                      *pt;
191
         satPos
                      *ps;
192
193
         {
194
         double dLk;
195
         double 1k,dk;
196
         double zd;
197
         double R,D;
198
199
         dLk = ps - \lambda Ls - pt - \lambda Lk;
200
         lk = pt - \lambda lk;
201
         R = terreRayon;
202
         D = orbiteRayon;
203
         dk = sqrt((D*D) + (R*R) - 2*R*D*cos(1k)*cos(dLk));
204
         zd = (R/dk)*sin(lk);
205
         angles->dk = dk;
208
         angles->ak = asin(zd);
207
         angles->bk = asin((R*cos(lk)*sin(dLk))/(dk*sqrt(1-zd*zd)));
208
         }
209
210
211
     /* Calcule les coordonnes cartsiennes d'un point de contour
212
          partir de ses angles de rfrences
                                                 ¥/
213
214 void
215 CalculCoordCartesien(angles, point, satel)
216
217
          refAngles
                      *angles;
218
         rectCoord
                      *point;
219
          satPos
                      *satel;
220
```

221 { 222 double D,dk,ak,bk; 223 double x,psi,io; 224 double xp; 225 double y; - -double z; 226 227 228 psi = satel->psi; 229 io = satel->io; 230 D = orbiteRayon; 231  $dk = angles - \lambda dk;$ 232  $ak = angles - \lambda ak;$ 233 bk = angles - bk;234 xp = D\*sin(psi) - dk\*cos(ak)\*sin(psi+bk); x = xp\*cos(io) - dk\*sin(ak)\*sin(io); 235 y = D\*cos(psi) - dk\*cos(ak)\*cos(psi+bk); 236 237 z = dk\*sin(ak)/cos(io) + x\*tan(io); 238  $point \rightarrow x = x;$ 239 point - y = y;240 point - z = z;241 } 242 /\* Calcule les coordonnes gographiques d'un point de contour 243 partir de ses coordonnes cartsiennes ¥/ 244 245 246 void 247 CalculCoordGeogr(geo,rect,satel) 248 249 geoCoord \*geo; 250 rectCoord \*rect; 251 satPos +satel; 252 253 { 254 double lk,Lk,x,y,z,Ls,R,dLk; 255 double psi; 256 257 R = terreRayon; 258 Ls = satel->Ls; 259 psi = satel->psi; 260  $x = rect - \lambda x;$ 261 y = rect->y; 262 z = rect - z;263 lk = asin(z / R);264 dLk = ArcTangent(y,x) - (PI/2) + psi; 265 Lk = Ls - dLk;if ((Lk < -PI) AND (Lk > -3\*PI)) Lk += (2\*PI); 266 267 if ((Lk > PI) AND (Lk < 3\*PI)) Lk -= (2\*PI); 268 geo->1k = 1k; 269 geo->Lk = Lk; 270 } 271 272 /# Calcule les angles de rfrences d'un contour 3 dB lorsque 273 les caractristiques du faisceau sont connues. Ces caractristiques sont les angles d'ouvertures BWh et BWv l'angle 274 275 de lacet phi et les angles de rfrences de la position

```
C:\MEGAMAX\DESATI\UTIL.C
                                       14-Apr-91 07:58
                            Laser C
                                                            Page # 6
 276
           du gain maximum #/
 277
 278
      void
 279
      CalculFaisceauReference(gainMax,contour,phi,teta,BWv,BWh)
 280
 281
           refAngles
                       gainMax;
 282
           refAngles
                       *contour;
 283
           double
                       phi,teta;
 284
           double
                       BWv,BWh;
 285
 286
           {
 287
           double
                       R1, R2;
 288
           double
                       ai,bi,di;
 289
           double
                       r,zp,yp;
 290
           double
                       h,v,w;
 291
           double
                       ak,bk,dk;
 292
 293
           di = gainMax.dk;
  294
           ai = gainMax.ak;
  295
           bi = gainMax.bk;
 296
           R1 = di*tan(BWv);
 297
           R2 = di*tan(BWh);
 299
           zp = R1*sin(teta);
 299
           yp = R2*cos(teta);
 300
           r = sqrt(R1*R1*R2*R2/(zp*zp+yp*yp));
 301
           h = di*cos(ai) - r*cos(teta+phi)*sin(ai);
  302
           v = r*sin(teta+phi);
 303
           w = di*sin(ai) + r*cos(teta+phi)*cos(ai);
           ak = asin(w/sqrt(di*di+r*r));
 304
 305
           bk = -ArcTangent(v,h)+bi;
 306
           dk = DistancePointSatellite(ak,bk);
  307
           contour - \lambda ak = ak;
  309
           contour - bk = bk;
  309
           contour - dk = dk;
  310
           }
  311
  312
      /* Permet de calculer l'angle de lacet du satellite sur son
  313
           orbite */
  314
  315
       double
  316
      CalculAngleLacet(s)
  317
  318
           satPos *s;
  319
  320
           {
  321
           double phi;
  322
  323
           phi = asin(sin(s->io)*cos(s->psi));
  324
           return(phi);
  325
           }
  326
  327
       double
  328
       CalculAutreAngleLacet(s)
  329
  330
           satPos *s;
```

----

. ....

C:\MEGAMAX\DESATI\UTIL.C Laser C 14-Apr-91 07:59 Page # 7				
221				
222		1	· · · ·	
333		i daubla aki lat is aci.		
334		uodute putitatitoipsti		
335		lat = LatitudeCatellite(c).		
336		$i_{\alpha} = c_{i_{\alpha}}$		
227		$nci = c_n \ln c_i$		
338		nhi = acin	((sin(in)*ros(lat)-ros(in)*sin(lat))/cos(nsi));	
339		return(phi):		
340		}		
341		•		
342				
343	/*	Pernet de	calculer la distance dk lorsque l'on connait les	
344		angles de	rfrences ak et bk */	
345		-		
346	dou	louble		
347	Dis	DistancePointSatellite(ak,bk)		
348				
349		double ak	,bk;	
350				
351		{		
352		double A, B, C, D, R, dk;		
353		double det;		
354				
355		D = orbitekayon;		
305 957		R = terrekayon;		
307 250		$\mathbf{R} = -2\mathbf{x}\mathbf{D}\mathbf{x}\cos(\mathbf{x}\mathbf{b})\mathbf{x}\cos(\mathbf{b}\mathbf{b}),$		
250		P = (D - D) x(D + D),		
360		$d = 10^{-1} \text{ K/s} (0^{-1} \text{ K/s})$		
361		$if (det )=0) \{$		
362		dk = (-B-sort(det))/(2*A);		
363		Determinant = 1:		
364		}		
365		else {		
366		dk = 0	\$	
367		Determinant = -1;		
368	<pre>printf("Erreur: Determinant &lt; 0\n");</pre>			
369	}			
370	return(dk);			
371		}		
3/2				
3/3	/*	/* calcule les nouveaux angles de rirences du gain maximum		
3/9 075		voladne v.antenue on zatellite ezt tebolute */		
3/0 570				
3/0. דרנ	YULU CalaullauvaauvaalaaDafaasaaasialauDafaasi Kuu kultiin N			
270	ourearwayeaayungreskelelentes(aarnuqxkel)agrungx <sup>1</sup> 291611126)			
379		rofAnaloc	¥nainMavDnf≠	
380		denCoord	-yuxiniuxicary BrainMaxe	
381		satPos	*satellite:	
382		2		
383		{		
384		double	ls,Lst,Ls,dL;	
385		double	5, R, 10, L0, V2, A;	

· · · · · · · · · · · ·

· -- •

· · · ·

. .....

,

.
# C:\MEGAMAX\DESATI\UTIL.C Laser C 14-Apr-91 07:59 Page # 8

ļ  . . .

. ....

.

206	daubla	den zan han			
000 007	rostCoord	dop;zop;dop; gainMaxPost:			
207	rectouru	gaidhaveas			
300 200	geosooru	yalinaxueu;			
383	retailgres	gainmaximumker;			
390	double	lop,Lop;			
391	double	psi,io;			
392					
393	Ls = satell	ite->Ls;			
394	psi = satellite->psi;				
395	io = satellite->io;				
396	lo = gainMax->lk;				
397	Lo = gainMa	x->Lk;			
398	R = terreRa	yon;			
399	S = orbiteR	ayon;			
400	dop = Dista	<pre>nceSatelliteStation(gainMax, satellite);</pre>			
401	zop = R*sin	<pre>(lo)*cos(io) - R*sin(psi+Lo-Ls)*cos(lo)*sin(io);</pre>			
402	aop = asin(zop/dop):				
403	V2 = (R*R - 200*200):				
404	$A = don \star cos(aon):$				
405	hon = acos((5*S + A*A - V2)/(2*S*A));				
406	painMaxRef-Jak = ann:				
407	garniance; zak - avp; nainMayPaf-NhV = hon;				
408	garmancervon – vopj nainMaxQof-ldk = dang				
100	yaımaxmet-70K - Vop; anioMaviau-Dof ak a soor				
410	gainnaximum	Neliak – dopj Dof bl. v baci			
410	gainmaximumket.ok ≃ oop;				
411	gainmaximumkei.dk = dop; Calavicandontariar(tari-Manianac (tari-Mancala i itit))				
412	CalculCoordCartesien(&gainMaximum&ef,&gainMaxRect,satellite);				
413	CalculCoordGeogr(&gainMaxGeo,&gainMaxRect,satellite);				
414	lop = gainMaxGeo.lk;				
410	Lop = gainMaxGeo.Lk;				
415	if ((dabs(lop-lo) > 0.00005) DR (dabs(Lop-Lo) > 0.00005)) {				
417	gainMaxRef->bk ∗= −1;				
418	, ,				
419	}				
420					
421	void				
422	CalculNouvelles	CoordGainMax(gMax,gainMax,sat)			
423					
424	geoCoord	*gMax;			
425	geoCoord	*gainMax;			
426	satPos	*sat;			
427	{				
428	refAngles	angles;			
429	rectCoord	rect;			
430	•	•			
431	CalculAnglesReferences(&angles,gMax,sat);				
432	CalculCoordCartesien(&angles,▭,sat);				
433	CalculCoord	Geogr(gainMax,▭,sat);			
434	}				

and the second second 

## **APPENDICE 2**

. .**.** 

.

-----

.. مەرىخىيە

~~~

.....

#### CALCUL DU DEPLACEMENT DE LA SURFACE DE COUVERTURE EN FONCTION DE LA DERIVE DU SATELLITE

par

**Mario Caron** 

## <u>CALCUL DU DÉPLACEMENT DE LA SURFACE DE COUVERTURE EN</u> <u>FONCTION DE LA DÉRIVE DU SATELLITE</u>

### 1. ÉNONCÉ DU PROBLÈME ET DE L'APPROCHE

Le problème consiste à déterminer le mouvement des surfaces de couverture d'un satellite en fonction du mouvement du satellite lui-même autour de sa position nominale. Lorsque la position d'un satellite géostationnaire n'est plus contrôlée, le satellite dérive en latitude et en longitude. Une étude complète du déplacement du satellite a été faite par Frick [1]. En l'absence de contrôle, le satellite se déplacera selon une période ( $T_{sat}$ ) de 53.249 ans pour effectuer, lorsqu'observez à l'équateur, des figures '8' comme illustrées à la Figure 1. Au milieu de la période de régression ( $t=\frac{T_{sat}}{2}$ ), le mouvement du satellite au cours d'une journée sera tel que la variation en longitude sera de  $\pm 1^\circ$  et en latitude de  $\pm 14^\circ$  40'. De ce point, l'excursion en longitude et en latitude diminuera continuellement jusqu'au retour au point de départ (temps t=0 sur la Figure 1) à la fin de la période de régression (t=T<sub>sat</sub>).

Si le satellite ne dispose pas d'un système d'antennes de poursuite, le faisceau de l'antenne va se déplacer sur la Terre. Ce déplacement des surfaces de couverture peut entraîner non seulement une perte de puissance considérable pour une station terrestre mais une augmentation de puissance d'un signal d'interférence si la station devient aussi couverte par un autre satellite opérant dans la même bande de fréquence. Il est bien évident qu'une coordination des services plus rigoureuse est requise pour garantir un niveau de qualité acceptable si plusieurs satellites ayant des couvertures adjacentes sont permis de dériver.

Le problème addressé ici se résume à la mise en forme d'équations permettant de déterminer le déplacement des surfaces de couvertures lorsque le satellite passe de sa position nominale à une autre position quelconque. L'approche consiste à premièrement déterminer les angles d'élévation et d'azimut\* du point de gain maximum du faisceau lorsque le satellite est à sa position orbitale nominale. Ensuite nous déterminons les équations nous permettant de trouver la latitute et la longitude terrestre du point correspondant à des angles d'élévation et d'azimut donnés pour un satellite situé en tout point dans l'espace. Utilisant les angles d'élévation et d'azimut du point de gain maximum trouvés précédemment, on applique ces équations pour une position de satellite différente de sa position initiale. On obtient alors les coordonnées terrestres du nouveau point de gain maximum du faisceau pour la nouvelle



Figure 1 : Tracé de la trajectoire du satellite au cours des ans vue par un observateur terrestre situé sous le satellite (d'après Frick [1]).

position du satellite. En appliquant cette technique, il est possible de déterminer la puissance de signal reçu d'un satellite avant et après la dérive et estimé le changement de puissance reçue.

## 2. Relations entre les Angles d'Élévation et d'Azimut et les Coordonnées Terrestres d'un Point Vu d'un Satellite

L'approche présentée ici provient en partie du document décrivant le logiciel SCORE [2] et l'article par Siocos [3].

Soit : a : rayon de la Terre (6,370,997 mètres);

- h : altitude du satellite (35,786,200 mètres pour un satellite géostationnaire);
- $(\rho,\lambda)$ : la latitude et la longitude du point terrestre<sup>1</sup>;
- $(\rho_0, \lambda_0)$ : la latitude et la longitude du point directement en dessous du satellite;
- α : l'angle d'élévation du point i.e. l'angle entre la droite reliant le satellite au centre de la Terre et la droite reliant le satellite au point terrestre d'intérêt;
- β : l'angle d'azimut du point i.e. l'angle d'azimut auquel le point terrestre d'intérêt est
   vu du point sous le satellite (mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre à partir du Pôle Nord).

Alors on a :

$$\cos(\alpha) = \frac{(a+h) - a \cos(E_r)}{\sqrt{a^2 + (a+h)^2 - 2a(a+h)\cos(E_r)}}$$
(1)

$$\tan(\beta) = \frac{\cos(\rho_0) \cos(\rho) \sin(\Delta \lambda)}{\sin(\rho) - \sin(\rho_0) \cos(\gamma)}$$
(2)

avec 
$$\Delta \lambda = \lambda - \lambda_0$$
 (3)

$$\cos(E_{\rm r}) = \cos(\rho_0)\cos(\rho)\cos(\Delta\lambda) + \sin(\rho_0)\sin(\rho) \tag{4}$$

$$\gamma = \sin^{-1}\left\{\frac{(a+h)\sin(\alpha)}{a}\right\} - \alpha$$
(5)

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Les latitudes nord sont exprimées positivement et les latitudes sud négativement. Dé même les longitudes ouest sont négatives et est positives.

Ces équations sont valides si  $\cos(E_r)$  n'excède pas  $\frac{a}{a+h}$  sinon le point est au-delà de l'horizon du satellite. Dans ce cas l'angle d'élévation n'est pas représentatif mais un point point être généré sur l'horizon avec le même angle d'azimut que le point d'intérêt en imposant la restriction que  $\cos(E_r) = \frac{a}{a+h}$ .

Utilisant les formules (1-5) il est également possible (après de nombreuses manipulations) d'arriver à exprimer la latitude et la longitude du point en fonction des angles d'azimut et d'élévation comme suit :

$$\cos (E_{\rm r}) = \frac{a+h}{a} \sin^2(\alpha) + \frac{\cos(\alpha)}{a} \sqrt{a^2 - (a+h)^2 \sin^2(\alpha)}$$
(6)

$$\gamma = \sin^{-1}\left\{\frac{(a+h)\sin(\alpha)}{a}\right\} - \alpha \tag{7}$$

$$\sin(\rho) = \sin(\rho_0) \cos^2(\beta) \left\{ \cos(E_r) + \tan^2(\beta) \cos(\gamma) \right\} +$$

$$\sqrt{\cos^2(E_r)\left[\cos^2(\beta)\sin^2(\rho_0)-1\right]+\cos^2(\rho_0)+\sin^2(\beta)\cos(\gamma)\sin^2(\rho_0)\left[2\cos(E_r)-\cos(\gamma)\right]}$$
(8)

$$\Delta \lambda = \sin^{-1} \left\{ \frac{\sin(\rho) - \sin(\rho_0) \cos(\gamma)}{\cos(\rho) \cos(\rho_0)} \tan(\beta) \right\} = \lambda - \lambda_0$$
(9)

Quoique ces dernières équations ne soient sans doute pas les plus directes (et les plus élégantes!), elles permettent de relier les points terrestres aux angles d'azimut et d'élévation du satellite.

#### 3. Génération du Contour d'un Faisceau

Soit : a et h définient comme à la section précédente;

 $(\rho_{\rm b},\lambda_{\rm b})$ : la latitude et la longitude du point de gain maximum du faisceau;

 $(\rho_0, \lambda_0)$ : la latitude et la longitude du point directement en dessous du satellite;

 $\alpha_{b}$ : l'angle d'élévation pour le point de gain maximum ;

 $\beta_b$ : l'angle d'azimut du point de gain maximum;

 $(\rho,\lambda)$ : la latitude et la longitude d'un point du contour du faisceau;

 $(\alpha,\beta)$ : les angles d'élévation et d'azimut du point du contour du faisceau;

R : axe semi-majeur du faisceau;

r : axe semi-mineur du faisceau;

۰.

 $\theta$ : orientation du faisceau elliptique i.e. angle entre le méridien du satellite et l'axe semimajeur mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre à partir du Pôle Nord.

Note : R=r pour un faisceau circulaire de rayon R.

On utilise les équations (1-5) pour déterminer  $(\alpha_b, \beta_b)$  pour le point de gain maximum du contour à partir des données terrestres  $(\rho_b, \lambda_b)$  et de la position du satellite  $(\rho_0, \lambda_0)$ . On fait alors varier un angle  $\varphi$  de 0 à 360 degrés et calcule les équations suivantes pour chaque valeur :

 $\alpha^* = \cos^{-1} \left\{ \cos(\alpha_b) \cos(\delta) + \sin(\alpha_b) \sin(\delta) \cos(\phi) \right\} : \text{angle d'élévation du point (10)}$ 

$$\xi = \sin^{-1} \left\{ \frac{\sin(\delta) \sin(\phi)}{\sin(\alpha^*)} \right\}$$
(11)

$$\gamma^* = \sin^{-1}\left\{\frac{(a+h)\sin(\alpha^*)}{a}\right\} - \alpha^*$$
(12)

$$\rho = \sin^{-1} \left\{ \sin(\rho_0) \cos(\gamma^*) + \cos(\rho_0) \sin(\gamma^*) \cos(\beta_b + \xi) \right\}$$
(13)

$$\Delta \lambda = \sin^{-1} \left\{ \frac{\sin(\gamma^*) \sin(\beta_b + \xi)}{\cos(\rho)} \right\} = \lambda - \lambda_0$$
(14)

où  $\delta$ =R pour un faisceau circulaire et pour un faisceau elliptique on a :

$$\delta = \tan^{-1} \left\{ \frac{1}{\sqrt{\cot^2(R) \cos^2(\theta + \phi) + \cot^2(r) \sin^2(\theta + \phi)}} \right\}$$
(15)

Si on est intéressé au contour à une puissance autre que -3 dB, on peut remplacer R et r dans les équations ci-dessus par :

$$R' = R \sqrt{-G/3}$$

$$\mathbf{r}' = \mathbf{r} \sqrt{-G/3}$$

où G est la valeur en dB du gain d'intérêt relatif au point de gain maximum ( et donc toujours négatif). Comme exemple, un faisceau circulaire à -6 dB a un rayon  $\sqrt{2}$  fois plus grand que celui à -3 dB.

### 4. Applications

Comme exemple, considérons un faisceau elliptique d'axe semi-majeur de 1.5°, d'axe semi-mineur de 0.75° et une orientation de 30° centré sur Ottawa (45.35°N, 75.9°O) en provenance d'un satellite situé initialement à l'équateur à la longitude 110°O.

a) Quel sera le déplacement du point du gain maximum si le satellite passe à la position (5°N,-110°O) ?

On calcule en premier lieu  $(\alpha_b, \beta_b)$  avec les équations (1-5) :

$$\Delta\lambda = -75.9 - (-110) = 34.1^{\circ}$$

$$\cos(E_r) = \cos(0) \cos(45.35) \cos(31.4) + \sin(0) \sin(45.35)$$
$$= 0.58194$$

$$\alpha_{\rm b} = \cos^{-1} \left\{ \frac{(a+h) - a(0.58194)}{\sqrt{a^2 + (a+h)^2 - 2a(a+h)(0.58194)}} \right\}$$
$$= \cos^{-1}(0.991043) = 7.6744^{\circ}$$

$$\gamma = \sin^{-1} \left\{ \frac{(a+h)\sin(7.6744)}{a} \right\} - 7.6744$$
  
= 54.41305

$$\beta_{b} = \tan^{-1} \left\{ \frac{\cos(0) \cos(45.35) \sin(34.1)}{\sin(45.35) - \sin(0) \cos(54.41305)} \right\}$$
$$= \tan^{-1}(0.55383) = 28.9790^{\circ}$$

Utilisant les équations (6-9), on trouve le nouveau point de gain maximum lorsque le satellite est à  $(5^{\circ}N,-110^{\circ}O)$ :

$$\cos(E_r) = \frac{a+h}{a} \sin^2(7.6744) + \frac{\cos(7.6744)}{a} \sqrt{a^2 - (a+h)^2 \sin^2(7.6744)}$$
$$= 0.58194$$
$$\gamma = \sin^{-1} \left\{ \frac{(a+h)\sin(7.6744)}{a} \right\} - 7.6744 = 54.41305$$

 $\sin(\rho) = \sin(5)\cos^2(28.9790) \left[ 0.58194 + \tan^2(28.9790)\cos(54.41305) \right] +$ 

$$\sqrt{(0.58194)^2 \left[\cos^2(28.979)\sin^2(5)-1\right] + \cos^2(5) + \sin^2(28.979)\cos(54.41305)\sin^2(5)\left[2(0.58194) - \cos(54.41305)\right]}$$

 $\rho = 59.41^{\circ}$ 

$$\Delta \lambda = \lambda - \lambda_0 = \sin^{-1} \left\{ \frac{\sin(59.41) - \sin(5)\cos(54.41305)}{\cos(59.41)\cos(5)} \tan(28.9790) \right\}$$
$$= 62.25^{\circ}$$

$$\lambda = 62.25 - 110 = -47.75^{\circ}$$

Le point de gain maximum passe donc de (45.35°N, 75.9°O) à (59.41°N, 47.75°O) lorsque le satellite est déplacé de 5° en latitude sur son orbite initiale. Ce déplacement de 14° en latitude et 28° en longitude est très grand et démontre bien le besoin de coordination des services lorsque les satellites dérives.

b) Déterminer les points du contour du faisceau avant et après le déplacement.

Avant le déplacement du satellite :

On a R=1.5°, r=0.75° et  $\theta$ =30°. Utilisant les équations (10-15), on obtient pour chaque angle  $\varphi$ :

$$\delta = \tan^{-1} \left\{ \frac{1}{\sqrt{\cot^2(1.5) \cos^2(30+\phi) + \cot^2(0.75) \sin^2(30+\phi)}} \right\}$$
$$= \tan^{-1} \left\{ \frac{1}{\sqrt{1458.36 \cos^2(\phi+30) + 5835.43 \sin^2(\phi+30)}} \right\}$$

$$\begin{split} &\alpha^{*} = \cos^{-1} \left\{ \cos(7.6744) \cos(\delta) + \sin(7.6744) \sin(\delta) \cos(\phi) \right\} \\ &= \cos^{-1} \left\{ 0.99104 \cos(\delta) + 0.13354 \sin(\delta) \cos(\phi) \right\} \\ &\xi = \sin^{-1} \left\{ \frac{\sin(\delta) \sin(\phi)}{\sin(\alpha^{*})} \right\} \\ &\gamma^{*} = \sin^{-1} \left\{ \frac{\sin(\delta) \sin(\alpha^{*})}{a} \right\} - \alpha^{*} = \sin^{-1} \left\{ 6.61705 \sin(\alpha^{*}) \right\} - \alpha^{*} \\ &\rho = \sin^{-1} \left\{ \sin(\gamma^{*}) \cos(28.979 + \xi) \right\} \end{split}$$

$$\lambda = \sin^{-1}\left\{\frac{\sin(\gamma^*)\,\sin(28.979 + \xi)}{\cos(\rho)}\right\} - 110$$

Note : si  $\alpha^*$  est plus grand que sin  $\left\{\frac{a}{a+h}\right\}$ , alors le point est au-delà de l'horizon du satellite. On peut générer un point sur l'horizon en imposant  $\alpha^* = \sin^{-1}\left\{\frac{a}{a+h}\right\}$  dans les équations qui suivent le calcul de  $\alpha^*$ .

Le Tableau 1 donne les résultats pour différents angles  $\varphi$ .

#### Après le déplacement du satellite :

Le nouveau point de gain maximum sera maintenant situé à (59.41°N,47.75°O). Avec les équations (1-5), on peut trouver les nouveaux angles d'élévation et d'azimut comme suit :

 $\cos(E_r) = \cos(5)\cos(59.41)\cos(62.25) + \sin(5)\sin(59.41) = 0.311072$ 

| φ<br>(degr <b>ee</b> s)                                                                                                                                                   | ρ<br>(degrees)                                                                                                                                                                                                                      | λ<br>(degrees)                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\begin{array}{c} 0\\ 15\\ 30\\ 45\\ 60\\ 75\\ 90\\ 105\\ 120\\ 135\\ 150\\ 165\\ 180\\ 195\\ 210\\ 225\\ 240\\ 255\\ 270\\ 285\\ 300\\ 315\\ 330\\ 345\\ 360\end{array}$ | $\begin{array}{c} 36.14\\ 36.85\\ 37.70\\ 38.60\\ 39.56\\ 40.66\\ 42.04\\ 43.98\\ 47.06\\ 53.69\\ 55.09\\ 57.61\\ 59.85\\ 58.10\\ 55.70\\ 53.89\\ 52.32\\ 50.76\\ 49.06\\ 47.03\\ 44.39\\ 41.01\\ 37.66\\ 36.05\\ 36.14\end{array}$ | $\begin{array}{r} -86.14 \\ -83.16 \\ -80.61 \\ -78.30 \\ -76.03 \\ -73.55 \\ -70.53 \\ -66.30 \\ -59.20 \\ -34.78^* \\ -35.31^* \\ -36.39^* \\ -37.51^* \\ -53.85^* \\ -64.06 \\ -69.87 \\ -74.12 \\ -77.71 \\ -81.05 \\ -84.40 \\ -87.81 \\ -90.77 \\ -91.59 \\ -89.42 \\ -86.14 \end{array}$ |
|                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |

Tableau 1 : Points du contour du faisceau avant le déplacement du satellite

.....

\* Ces points sont au-delà de l'horizon du satellite mais un point sur l'horizon a été généré pour une meilleure visualisation.

$$\cos(\alpha_{\rm b}) = \frac{({\rm a+h}) - {\rm a} \cos({\rm E_r})}{\sqrt{{\rm a}^2 + ({\rm a+h})^2 - 2{\rm a}({\rm a+h})\cos({\rm E_r})}} = 0.988833$$

 $\alpha_b = 8.57066$ 

......

$$\gamma = \sin^{-1}\left\{\frac{(a+h)\sin(\alpha_b)}{a}\right\} - \alpha_b = 71.876^{\circ}$$

$$\tan(\beta_b) = \frac{\cos(5)\cos(59.41)\sin(62.25)}{\sin(59.41) - \sin(5)\cos(71.876)}$$

 $\beta_b = 28.286^\circ$ 

Utilisant ces nouveaux angles d'élévation et d'azimut pour le point de gain maximum, on obtient en utilisant les équations (10-15) :

$$\begin{split} \delta &= \tan^{-1} \left\{ \frac{1}{\sqrt{1458.36 \cos^2(\varphi + 30) + 5835.43 \sin^2(\varphi + 30)}} \right\} \\ \alpha^* &= \cos^{-1} \left\{ \cos(8.57066)\cos(\delta) + \sin(8.57066)\sin(\delta)\cos(\varphi) \right\} \\ &= \cos^{-1} \left\{ 0.988833\cos(\delta) + 0.149029\sin(\delta)\cos(\varphi) \right\} \\ \xi &= \sin^{-1} \left\{ \frac{\sin(\delta)\sin(\varphi)}{\sin(\alpha^*)} \right\} \\ \gamma^* &= \sin^{-1} \left\{ \frac{\sin(\delta)\sin(\alpha^*)}{a} \right\} - \alpha^* = \sin^{-1} \left\{ 6.61705\sin(\alpha^*) \right\} - \alpha^* \\ \rho &= \sin^{-1} \left\{ \sin(5)\cos(\gamma^*) + \cos(5)\sin(\gamma^*)\cos(-28.286 + \xi) \right\} \\ \lambda &= \sin^{-1} \left\{ \frac{\sin(\gamma^*)\sin(-28.286 + \xi)}{\cos(\rho)} \right\} - 110 \end{split}$$

Le Tableau 2 donne la liste des points du contour. La Figure 2 illustre le tracé des points donné par les Tableau 1 et 2 sur une projection perspective où le point de vue est pris à la

| $\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$                                                                | φ<br>(degrees) | ρ<br>(degrees) | λ<br>(degrees) |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|----------------|----------------|
| $\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$                                                                | 0              | 47.79          | -76.51         |
| $\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$                                                                | 15             | 48.57          | -72.02         |
| $\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$                                                                | 30             | 49.54          | -67.80         |
| $\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$                                                                | 45             | 50.58          | -63.56         |
| $\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$                                                                 | 60             | 51.71          | -58.84         |
| $\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$                                                                | 75             | 53.05          | -52.68         |
| $\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$                                                                | 90             | 54.90          | -41.68         |
| $\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$                                                                | 105            | 55.70          | -28.10*        |
| $\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$                                                                 | 120            | 55.27          | -28.05*        |
| $\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$                                                                 | 135            | 55.36          | -28.06*        |
| $\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$                                                                 | 150            | 56.79          | -28.24*        |
| $\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$                                                                 | 165            | 59.38          | -28.63*        |
| $\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$                                                                 | 180            | 61.68          | -29.06*        |
| $\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$                                                                | 195            | 63.28          | -29.42*        |
| $\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$                                                                 | 210            | 64.39          | -29.70*        |
| $\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$                                                                | 225            | 65.22          | -29.93*        |
| $\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$                                                                | 240            | 66.74          | -30.41*        |
| $\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$                                                                | 255            | 66.52          | -30.33*        |
| $\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$                                                                 | 270            | 64.96          | -48.92         |
| $\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$                                                                | 285            | 61.66          | -63.84         |
| 315     53.69     -80.56       330     49.64     -83.22       345     47.73     -80.92       360     77.51     76.51 | 300            | 58.01          | -73.60         |
| 330     49.64     -83.22       345     47.73     -80.92       360     47.70     76.51                                | 315            | 53.69          | -80.56         |
| 345         47.73         -80.92           360         47.70         76.51                                           | 330            | 49.64          | -83.22         |
|                                                                                                                      | 345            | 47.73          | -80.92         |
| 47.79 -70.51                                                                                                         | 360            | 47.79          | -76.51         |

Tableau 2 : Points du contour du faisceau après le déplacement du satellite

\* Ces points sont au-delà de l'horizon du satellite mais un point sur l'horizon a été généré pour une meilleure visualisation.





position (0°N, 110°O) sur l'orbite géostationnaire. L'étoile représente Ottawa. Comme on le remarque le déplacement est majeur et Ottawa est complètement en dehors de la zone de couverture à -3 dB.

#### 5. Références

- [1] Frick R. H., Orbital Regression of Synchronous Satellites Due to the Combined Gravitational Effects of the Sun, the Moon and the Oblate Earth, Nasa Report R-454-NASA, August 1967.
- [2] Russel L.C., Satellite Constellation Orbit Evaluation (SCORE) Program, Technical Report 1345, April 1990, DTIC AD-A223 531.
- [3] Siocos C.A., *Broadcasting-Satellite Coverage- Geometrical Considerations*, IEEE Trans. on Broadcasting, vol. BC-19, No. 4, Dec. 1973, pp. 84-87.

Mario Caron Janvier 1991





· .....