

RECOMMANDATION UIT-R S.743-1*

Coordination des réseaux utilisant des satellites sur orbite géostationnaire légèrement inclinée et coordination de ces réseaux avec les réseaux utilisant des satellites sur orbites géostationnaires non inclinées

(1992-1994)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que, dans la définition du satellite géostationnaire du numéro S1.189 du Règlement des radiocommunications (RR), on ne précise pas de valeur maximale de l'angle d'inclinaison de l'orbite d'un satellite géostationnaire;
- b) que la masse de carburant utilisée pour le maintien en position des stations spatiales géostationnaires est une partie importante de la masse totale en orbite et qu'elle tend à être le facteur limitant la durée de vie de ces stations;
- c) que le maintien en position nord-sud nécessite jusqu'à 90% du carburant total;
- d) qu'en l'absence de maintien en position nord-sud, l'inclinaison de l'orbite d'un satellite géostationnaire varie d'environ 0,9° par an au maximum, sans toutefois dépasser la limite naturelle de 15°;
- e) qu'en revanche l'absence de maintien en position nord/sud peut imposer la présence d'équipements additionnels dans les stations terriennes (dispositifs de poursuite angulaire et de poursuite de polarisation par exemple) et, dans le cas de transmissions numériques, de mémoires tampons, de capacité variable plus importantes ainsi que l'application de méthodes de synchronisation plus complexes;
- f) que la Conférence administrative mondiale des radiocommunications sur l'utilisation de l'orbite des satellites géostationnaires et la planification des services spatiaux utilisant cette orbite (Genève, 1988) (CAMR ORB-88) s'était penchée sur la question de la coordination des réseaux à satellites géostationnaires sur orbite légèrement inclinée et avait soumis la question au Bureau des radiocommunications et à l'UIT-R pour suite à donner;
- g) que le Bureau des radiocommunications a demandé à l'UIT-R d'étudier les problèmes associés, à savoir:
 - les aspects techniques de la coordination entre satellites géostationnaires et satellites sur orbite géostationnaire inclinée;
 - les aspects techniques de la coordination entre les satellites sur orbite géostationnaire inclinée;

* La Commission d'études 4 des radiocommunications a apporté des modifications rédactionnelles à cette Recommandation en 2001 conformément aux dispositions de la Résolution UIT-R 44 (AR-2000).

- h) qu'apparemment rien ne s'oppose intrinsèquement à la coordination des réseaux à satellites sur orbite géostationnaire légèrement inclinée;
- j) que les données à fournir au titre de l'Appendice S4 (CAMR ORB-88) du RR incluent les effets de l'utilisation des orbites de satellite géostationnaire légèrement inclinées,

notant que

- a) sous des conditions de couverture commune, le découplage des réseaux à satellites géostationnaires dont l'un utilise une orbite légèrement inclinée, sera au moins égal à celui spécifié pour deux réseaux à satellites géostationnaires (inclinaison voisine de 0°);
- b) sous des conditions de couverture commune, le découplage de deux réseaux à satellites géostationnaires utilisant des orbites légèrement inclinées sera soit inférieur soit supérieur à celui de deux réseaux à satellites géostationnaires d'inclinaison proche de 0°, selon la phase nodale relative;
- c) sous des conditions de couverture commune, le découplage de deux réseaux à satellites géostationnaires à espacement réduit avec réutilisation des fréquences en polarisation orthogonale linéaire double, lorsque l'un de ces réseaux (ou l'un et l'autre) utilise(nt) une orbite légèrement inclinée, peut être inférieur à celui de deux réseaux à satellites géostationnaires, selon la phase nodale relative;
- d) sous des conditions de couverture non commune entre deux réseaux à satellites géostationnaires dont l'un au moins utilise des orbites légèrement inclinées, le découplage peut être inférieur ou supérieur à celui de deux réseaux à satellites géostationnaires, dépendant d'un certain nombre de facteurs, outre la phase nodale relative,

recommande

- 1 d'effectuer la coordination des réseaux à satellites géostationnaires utilisant des orbites légèrement inclinées conformément aux dispositions du RR applicables aux réseaux à satellites géostationnaires sur la base de l'espacement minimal entre les satellites considérés;
- 2 de tenir compte du fait que, dans les bandes utilisées en partage avec les services de Terre, la limite d'inclinaison utilisée en application du § 1 du dispositif pourra devoir être déterminée en fonction de considérations de partage entre services (Note 1). Dans d'autres bandes, le § 1 pourra s'appliquer jusqu'à la limite naturelle d'inclinaison pour des satellites lancés initialement sur orbite géostationnaire ou quasi géostationnaire en l'absence de manœuvres de maintien en position nord/sud.
- 3 d'utiliser les renseignements donnés en Annexe 1 pour l'étude des brouillages concernant la coordination entre les réseaux à satellites géostationnaires utilisant des orbites légèrement inclinées;
- 4 d'ajuster, dans la mesure du possible, la phase nodale relative entre les orbites, et/ou d'utiliser d'autres mesures afin de minimiser tous les effets nuisibles (se reporter au § 5 de l'Annexe 1);
- 5 que la Note suivante soit considérée comme faisant partie de la Recommandation:

NOTE 1 – La Recommandation UIT-R SF.1008 traite de l'utilisation éventuelle, par les stations spatiales du service fixe par satellite, d'orbites légèrement inclinées par rapport à l'orbite des satellites géostationnaires (OSG) dans les bandes partagées avec le service fixe.

ANNEXE 1

1 Introduction

L'information figurant dans cette annexe devra être utilisée pour la coordination des réseaux à satellites sur orbites géostationnaires légèrement inclinées et entre ces réseaux et les autres réseaux à satellites sur orbites géostationnaires non inclinées.

Pendant l'exploitation sur orbite légèrement inclinée, trois éléments influent surtout sur le brouillage entre deux réseaux à satellites, à savoir:

- la séparation angulaire exocentrique entre zones de couverture des réseaux, telles qu'elles sont vues de l'un ou de l'autre satellite;
- l'angle d'ouverture exocentrique des zones de couverture, tel qu'il est vu de l'un ou de l'autre satellite;
- l'écart angulaire topocentrique entre les satellites, tel qu'il est vu d'une station terrienne de l'un ou de l'autre réseau.

Ces facteurs ont pour effet de faire varier périodiquement la discrimination nette d'antenne (de station terrienne et de satellite) entre les deux réseaux. Au cas où les réseaux à satellites ont une zone de service commune (réseaux assurant la même couverture), l'antenne de station terrienne est l'élément de base qui assure la discrimination entre les réseaux. Quand les réseaux à satellites ont des zones de service distinctes (réseaux n'assurant pas la même couverture), l'antenne de la station terrienne comme celle du satellite contribuent à la discrimination entre les réseaux.

2 Considérations géométriques

L'angle géocentrique φ_g entre deux satellites géostationnaires à orbite légèrement inclinée de latitude (γ_1 et γ_2) et de longitude (φ_1 et φ_2) peut être calculé ainsi:

$$\cos \varphi_g = \cos \gamma_1 \cos \gamma_2 \cos (\varphi_1 - \varphi_2) + \sin \gamma_1 \sin \gamma_2 \quad (1)$$

La latitude γ et l'excursion en longitude $\Delta\varphi$ d'un satellite en fonction de l'angle d'inclinaison de l'orbite i et de la position de l'angle de phase du satellite sur l'orbite $\Delta\gamma$ mesurées à partir du nœud ascendant sont:

$$\gamma = \sin^{-1} (\sin i \sin \Delta\gamma) \quad (2)$$

$$\Delta\varphi = \operatorname{tg}^{-1} (\cos i \operatorname{tg} \Delta\gamma) - \Delta\gamma \quad (3)$$

Moyennant un calcul approximatif de petit angle pour $\sin i$ et $\cos i$, les équations (2) et (3) deviennent:

$$\gamma = i \sin \Delta\gamma \quad \text{radians} \quad (4)$$

$$\Delta\varphi = -0,25 i^2 \sin 2 \Delta\gamma \quad \text{radians} \quad (5)$$

L'excursion longitudinale d'un satellite sur orbite circulaire géostationnaire peut être calculée à partir des équations qui précèdent. La Fig. 1 montre la courbe de l'excursion maximale en fonction de l'inclinaison.

Pour deux satellites d'inclinaison i_1 et i_2 , désignant $\Delta\gamma_0$ comme différence d'angle de phase entre les positions des satellites sur l'orbite ($0 \leq \Delta\gamma_0 \leq 2\pi$) et φ_s comme l'angle entre les nœuds ascendants, la valeur minimale de la séparation angulaire géocentrique φ_g peut être calculée à partir des équations précédentes et avec une bonne approximation par:

$$(\varphi_g)_{min} = 0,5 i_1 i_2 \sin \Delta\gamma_0 + \varphi_s \quad \text{radians} \quad (6)$$

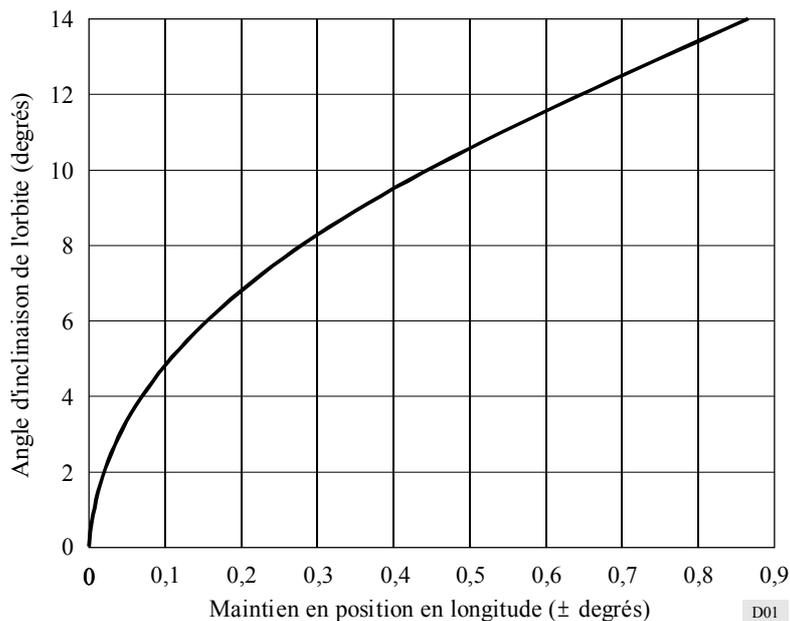
L'équation (6) peut exprimer le rapport entre l'angle géocentrique minimum et l'angle géocentrique des nœuds:

$$(\varphi_g)_{min}/\varphi_s = 1 + (i_1 i_2 \sin \Delta\gamma_0)/2 \varphi_s \quad (7)$$

où, i_1 , i_2 et φ_s sont petits par rapport à un radian.

FIGURE 1

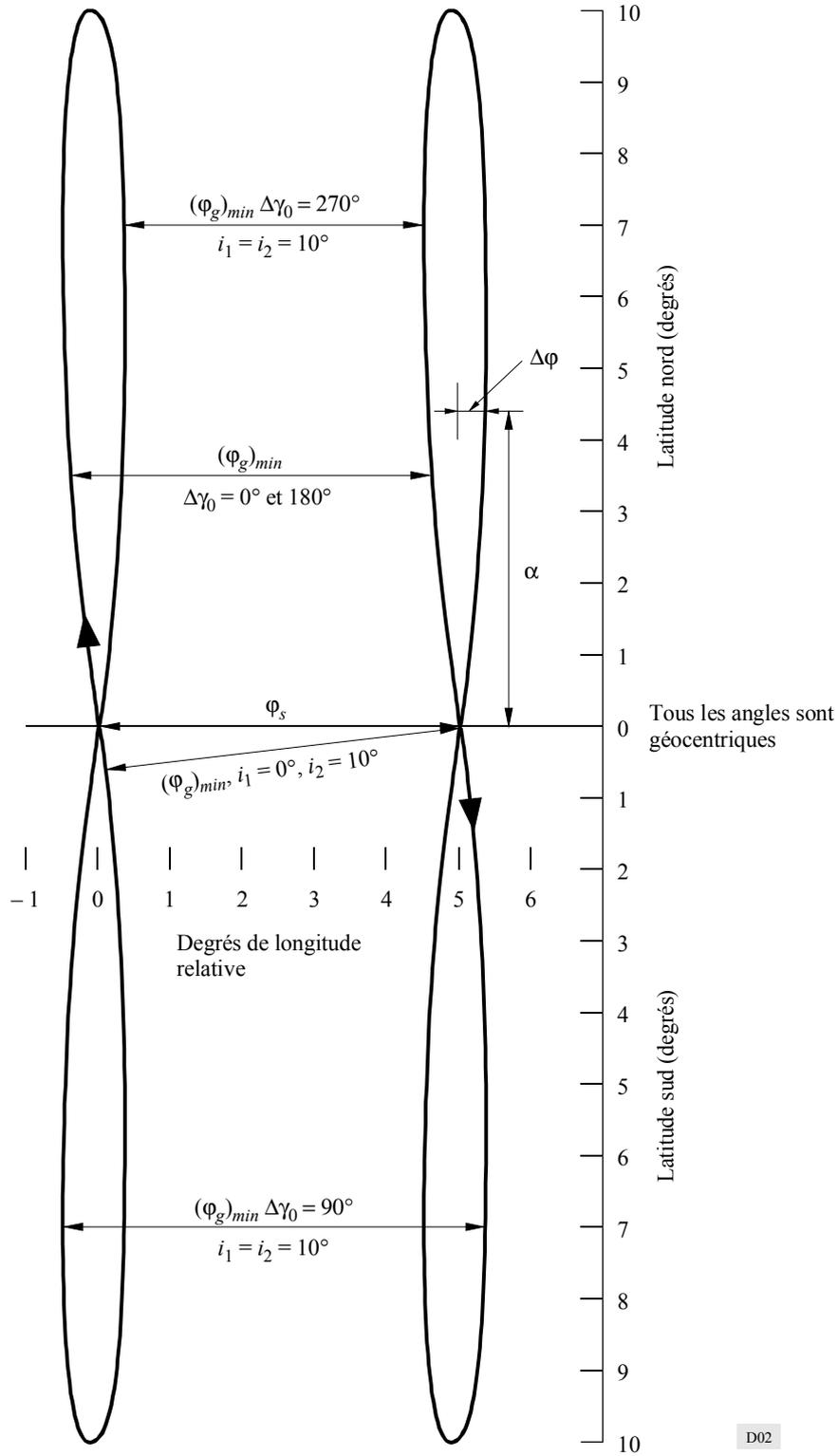
Inclinaison de l'orbite lorsque l'excursion en longitude est égale au maintien en position



Selon la différence d'angle de phase entre les positions sur l'orbite des satellites, $(\varphi_g)_{min}$ peut être inférieur ou supérieur à φ_s ; c'est-à-dire quand $\pi \leq \Delta\gamma_0 \leq 2\pi$ ou $0 \leq \Delta\gamma_0 \leq \pi$, respectivement (voir Fig. 2). Si i_1 ou i_2 est égal à zéro, $(\varphi_g)_{min} = \varphi_s$. La différence d'angle de phase la plus défavorable est $3\pi/2$ et l'équation (7) pour cette valeur est:

$$(\varphi_g)_{min}/\varphi_s = 1 - i_1 i_2 / 2 \varphi_s \quad (8)$$

FIGURE 2
Géométrie d'orbite géostationnaire circulaire inclinée

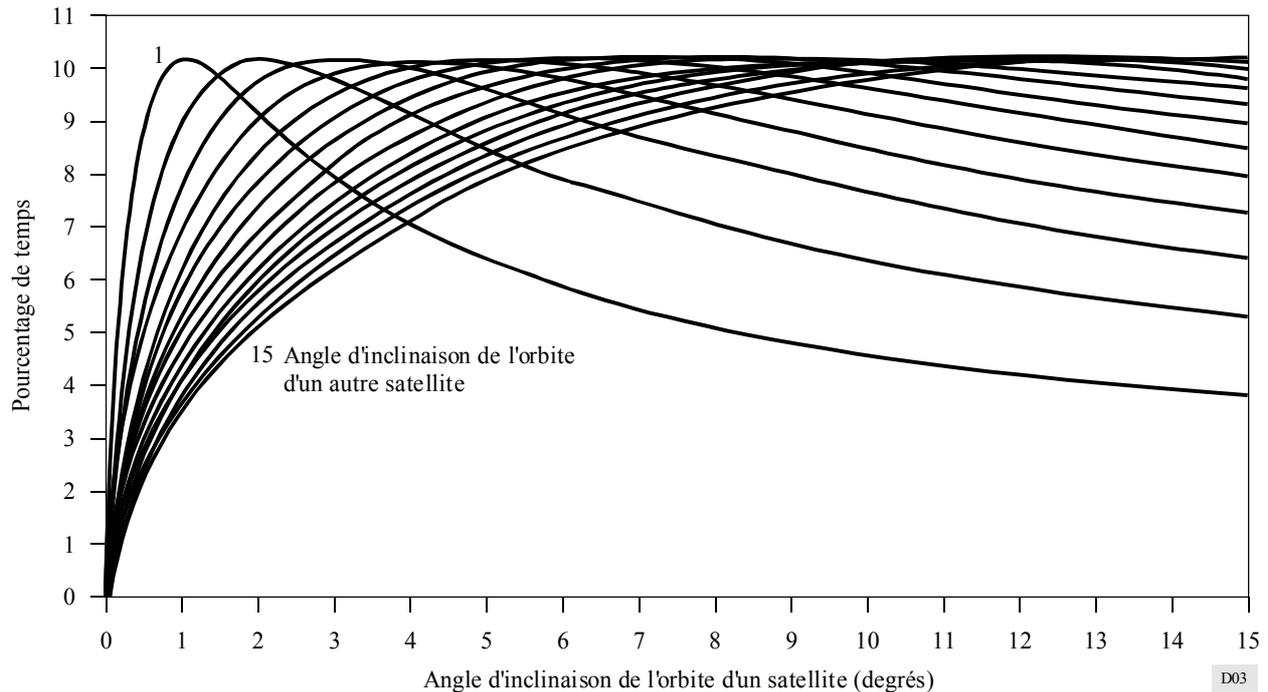


En cas d'inclinaison de l'orbite de l'un quelconque d'une paire de satellites, la valeur moyenne dans le temps de l'écart angulaire est toujours plus grande que l'espacement nodal φ_s . La portion de temps T_1 pendant laquelle φ_g est inférieur à φ_s dans les conditions les plus défavorables d'angle de phase est approximativement:

$$T_1 = 0,64 \left[(i_1 i_2 \varphi_s) / (i_1^2 + i_2^2) \right]^{0,5} \quad (9)$$

quand $i_1 = i_2$, T_1 varie de 1 h deux fois par jour pour un φ_s de 2° à environ 2,25 h, deux fois par jour pour un φ_s de 10° pour des inclinaisons égales et dans le cas le plus défavorable d'angle de phase. La Fig. 3 donne une représentation de l'équation (9) pour un φ_s de 3° .

FIGURE 3
Pourcentage de temps pendant lequel l'espacement des satellites est inférieur à l'espacement nodal



3 Réseaux assurant la même couverture

Quand des réseaux assurent la même couverture, il n'existe pas, ou peu de discrimination de l'antenne, de sorte que seules les antennes de station terrienne assurent la discrimination spatiale. Pour les stations terriennes de poursuite, la discrimination est fonction de l'écart angulaire entre les satellites. Si l'on suppose une pente d'enveloppe de $-25 \log(\varphi)$, l'équation (7) peut s'exprimer ainsi:

$$\Delta d \leq 25 \log_{10} \left[1 + \frac{i_1 i_2 \sin \Delta \gamma_0}{2 \varphi_s} \right] \quad \text{dB} \quad (10)$$

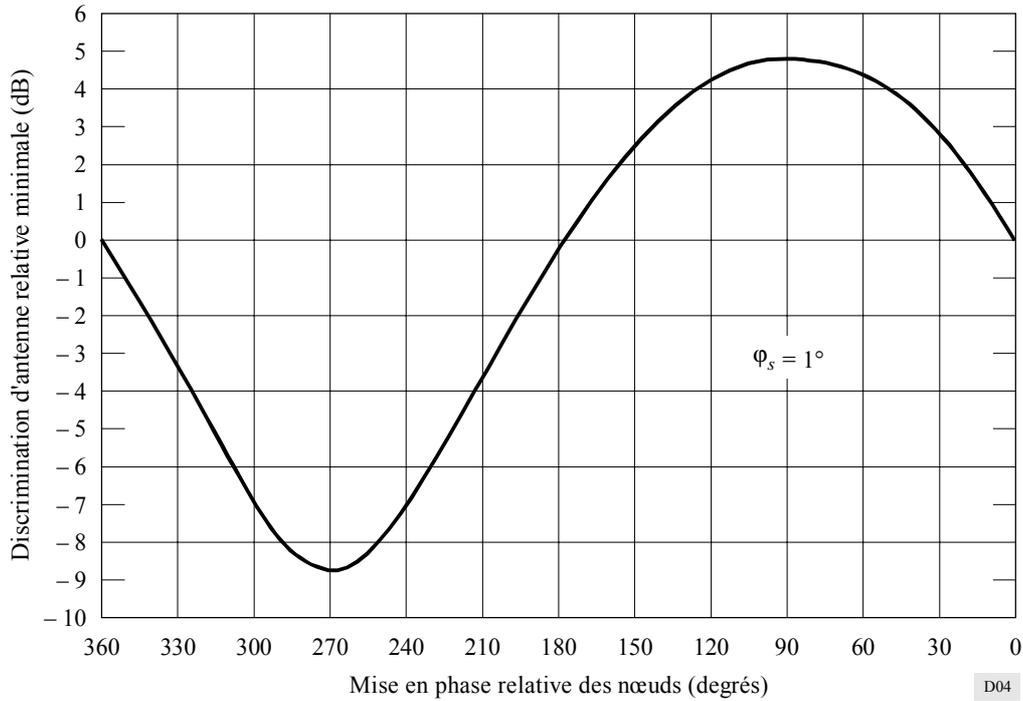
Dans cette formule, Δd est la variation de discrimination en dB par rapport à la discrimination de l'antenne de station terrienne pour un espacement nominal de φ_s .

La Fig. 4 montre la discrimination d'antenne pour $i_1 = 7^\circ$ et $i_2 = 9^\circ$ et un espacement nominal des satellites $\varphi_s = 1^\circ$.

Comme l'indique la Fig. 4, la différence de phase nodale se révèle être un facteur critique qui détermine la discrimination relative de l'antenne de station terrienne. Selon la différence de phase nodale, la discrimination relative de station terrienne peut être plus grande ou plus petite que la valeur nominale et atteint un minimum à 270° de différence de phase nodale. Il importe de noter que quand i_1 ou i_2 égale zéro, la discrimination relative minimale prend également la valeur zéro.

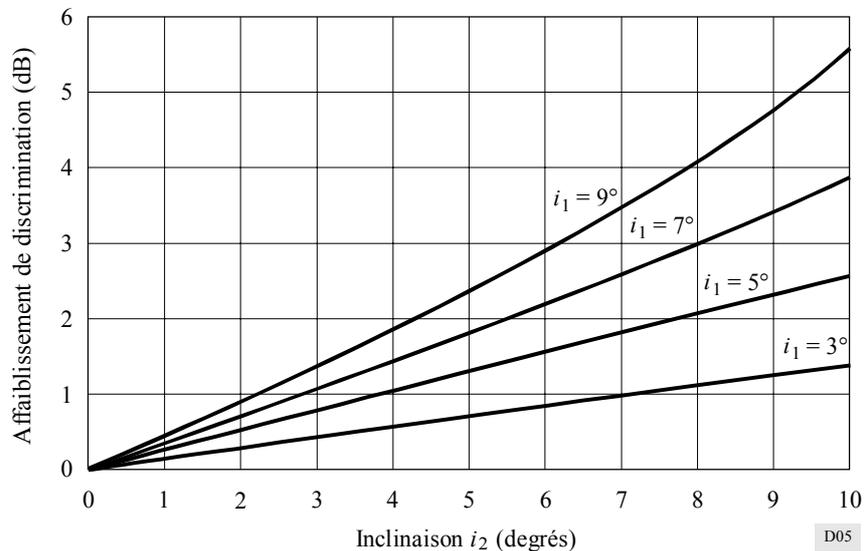
Dans la pratique, cela signifie que la discrimination entre un réseau à satellite géostationnaire et un réseau dont le satellite est sur orbite légèrement inclinée sera toujours plus grande ou égale à la discrimination nominale que l'on aurait obtenue si les deux réseaux se composaient de satellites géostationnaires.

FIGURE 4
Discrimination relative minimale d'antenne de station terrienne en fonction d'une différence de phase nodale pour deux satellites géostationnaires sur des orbites inclinées de 9° et de 7°



La perte de discrimination dans le cas le plus défavorable (qui correspond à la discrimination minimale avec une différence de phase nodale de 270°) en fonction de l'inclinaison de deux satellites espacés de 2° est représentée à la Fig. 5.

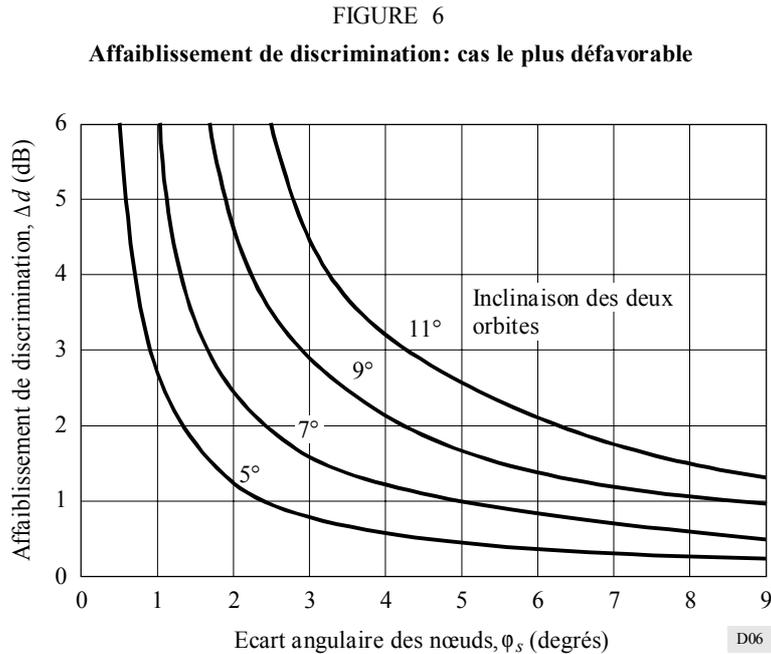
FIGURE 5
Affaiblissement de discrimination de la station terrienne (cas le plus défavorable) pour deux satellites géostationnaires sur orbites inclinées



Dans le cas qui est vraiment le plus défavorable, $i_1 = i_2 = i$ et $\Delta\gamma_0 = 270^\circ$, l'équation (10) devient:

$$\Delta d \leq 25 \log_{10} [(1 - i^2/2\phi_s)] \quad \text{dB} \quad (11)$$

La Fig. 6 représente cette fonction et montre les effets de l'espacement nodal des satellites ϕ_s .



La probabilité que les deux orbites aient une inclinaison identique et fassent l'objet du cas le plus défavorable d'angle de phase devrait être très faible. On notera aussi que la valeur de Δd dans l'équation (10) est une valeur de crête et qu'elle est presque atteinte pendant de brèves périodes. La fraction de temps pendant laquelle le changement de discrimination est compris entre 0 dB et Δd est déterminée par l'équation (9).

Pour qu'il se produise une perte de discrimination dans le cas le plus défavorable, il faudrait que:

- les deux satellites (adjacents) soient sur des orbites très inclinées et
- qu'il existe une différence de phase nodale d'environ 270° .

Une combinaison de ces deux événements semble improbable dans des circonstances normales quand les satellites maintenus en position ne bénéficient plus de ce maintien dans le sens nord-sud, ce qui a pour but de prolonger leur durée de vie.

Si deux satellites commencent à fonctionner sur orbite inclinée à peu près en même temps (disons, la même année) le décalage de phase entre les lignes de nœuds de leurs orbites sera négligeable parce que le mouvement conique des normales à l'orbite, produit par des champs de force identiques, sera identique. La différence de phase nodale ne sera appréciable que si l'un des satellites

commence à fonctionner sur une orbite inclinée plusieurs années après l'autre. Mais en pareil cas, le satellite qui a commencé de fonctionner plus tard sur orbite inclinée n'aura pas une inclinaison d'orbite importante avant que s'accumulent plusieurs années d'exploitation combinée. La différence d'angle de phase ne varie pas notablement avec le temps et le changement d'inclinaison de deux satellites adjacents sera presque le même. Ainsi, quand les conditions sont défavorables, elles le restent jusqu'à ce qu'une manœuvre du satellite permette de modifier les conditions. Cependant, quand deux satellites adjacents sont placés à l'origine sur orbite inclinée, les inclinaisons et la différence d'angle de phase peuvent avoir une valeur quelconque. Par conséquent, il y a intérêt à évaluer les probabilités tenant à Δd . On suppose que les inclinaisons et la différence d'angle de phase sont statistiquement indépendantes, que les inclinaisons ont une fonction de densité de probabilité comprise entre 0 et i_0 et que la fonction de densité de probabilité de différence d'angle de phase est constante entre 0 et 2π . Moyennant ces hypothèses, l'équation (10) peut s'exprimer ainsi:

$$\overline{\Delta d} \leq 25 \log_{10} \left[(1 + Ki_0^2)/2\phi_s \right] \quad \text{dB} \quad (12)$$

où $\overline{\Delta d}$ est la valeur de Δd qui ne sera pas dépassée avec une probabilité P , et K est la valeur normalisée obtenue à partir des fonctions de probabilité supposées ci-dessus, pour une valeur donnée de P . Pour $P = 90\%$, la valeur de K est d'environ $-0,3$. Pour des valeurs $P = 95\%$ et 99% , les valeurs de K sont approximativement $-0,44$ et $-0,78$. Pour $P = 50\%$, la valeur de K est zéro.

Supposons un espacement nodal de satellite de 2° et une inclinaison d'orbite de 5° pour les deux satellites; la perte de discrimination dans le cas le plus défavorable est de 1,25 dB, comme l'indique la Fig. 5. D'après l'équation (12), la valeur maximale de la perte de discrimination $\overline{\Delta d}$ est 0,36 dB avec une probabilité de 90%. Pour une inclinaison de 9° , la perte de discrimination correspondante est de 4,73 dB et la perte de discrimination qui ne sera pas dépassée avec une probabilité de 90% est de 1,25 dB.

D'après les équations précédentes, les valeurs de $\overline{\Delta d}$ peuvent être mises en parallèle avec les modifications de l'espacement des satellites, de sorte que le brouillage pourrait être égal ou inférieur à celui obtenu par des inclinaisons de 0° (1 dB équivaut à $0,1 \phi_s$ environ), c'est-à-dire que l'espacement pourrait être adapté. On note, de plus, que $\overline{\Delta d}$ peut aussi avoir une valeur positive, c'est-à-dire que la discrimination est augmentée. Si l'on suppose que l'angle de phase $\Delta\gamma$ est une valeur aléatoire parmi un ensemble de satellites (des valeurs positives et négatives de $\overline{\Delta d}$ sont également probables) et que l'on modifie l'espacement nodal pour correspondre à des espacements minimaux, cela aurait pour effet net que l'arc orbital occupé par un ensemble de satellites serait le même que si toutes les inclinaisons étaient nulles.

Ainsi, il n'est pas évident que le nombre de positions nodales sur un arc orbital donné sera défavorablement influencé par l'inclinaison des orbites.

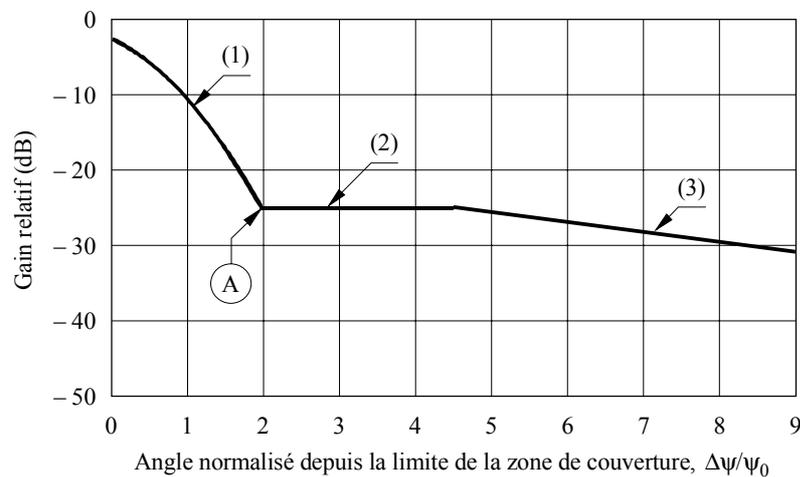
4 Réseaux à satellites n'assurant pas la même couverture

L'analyse est infiniment plus complexe en pareil cas que dans le cas de réseaux assurant la même couverture, de sorte qu'il est difficile d'appliquer la méthode paramétrique utilisée dans ce dernier cas. Par conséquent, on a analysé d'après le modèle suivant la discrimination totale entre les deux systèmes obtenue par l'intermédiaire des discriminations de station terrienne et d'antenne de satellite.

On a supposé qu'un satellite sur orbite inclinée émet un faisceau circulaire d'un certain diamètre. Ce faisceau a été orienté vers différents points de la Terre et le mouvement du satellite sur l'orbite inclinée a eu pour conséquence que le mouvement d'un point à la limite du faisceau a été tracé dans les coordonnées du satellite. L'impact du mouvement du faisceau du satellite a été calculé comme étant un changement du gain de l'antenne du satellite à un point proche de la zone de couverture. On a choisi ce point pour correspondre au point A du diagramme de référence d'antenne du satellite de la Fig. 7. Nominale, pour autant que l'antenne du satellite ne fasse aucun mouvement, en raison de l'inclinaison de l'orbite du satellite, la discrimination obtenue à ce point à travers l'antenne du satellite serait de 22 dB par rapport à la limite de couverture. On a choisi ce point pour étudier le cas le plus défavorable. La variation de gain a été exprimée par rapport à ce gain nominal. On a en outre calculé la discrimination obtenue entre ce système à satellites et un système à satellites voisin (supposé être géostationnaire) au moyen de l'antenne de la station terrienne fonctionnant dans le système à satellites sur orbite inclinée, et on l'a exprimée par rapport à la discrimination que l'on obtiendrait avec deux systèmes à satellites géostationnaires. La discrimination totale relative nette obtenue par les antennes du satellite et de la station terrienne a été calculée en fonction du temps, pour des ouvertures de faisceaux de satellite de 1,5° et 3° et pour des inclinaisons de 3° et 9°. Le faisceau du satellite a été orienté vers trois zones différentes de la Terre, comme le montre la Fig. 8.

FIGURE 7

Diagramme de rayonnement de référence d'antennes de satellite



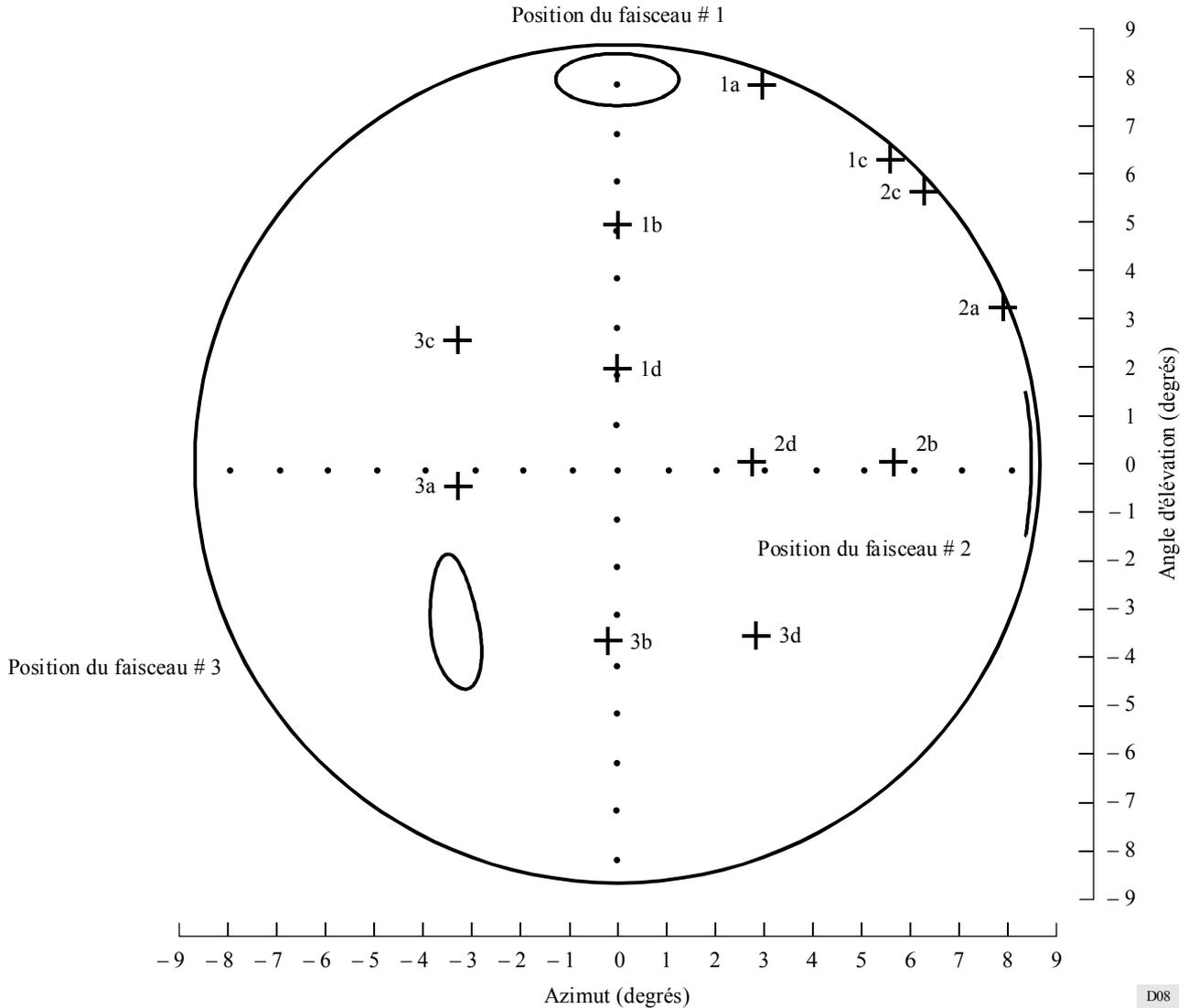
$$(1) \quad \left. \begin{aligned} G(\Delta\psi) &= G_{EOC} - 2,79 [(1 + \Delta\psi/\psi_0)^2 - 1]; \text{ ou} \\ G(\Delta\psi) &= G_{EOC} - 3,266 [(0,9(\Delta\psi/\psi_0) + 1)^2 - 1] \end{aligned} \right\} 0 \leq (\Delta\psi/\psi_0) \leq 1,98$$

$$(2) \quad G(\Delta\psi) = G_{EOC} - 22 \text{ dB}; 1,98 < (\Delta\psi/\psi_0) < 4,5$$

$$(3) \quad G(\Delta\psi) = G_{EOC} - 22 - K(\Delta\psi/\psi_0 - 4,5); K = 1,2$$

... jusqu'à $G(\Delta\psi) = 0$ dBi; équivalent à -6 dB/octave

FIGURE 8
 Mouvement des faisceaux de satellite à la surface de la Terre
 (inclinaison 9°) et aux points de contrôle

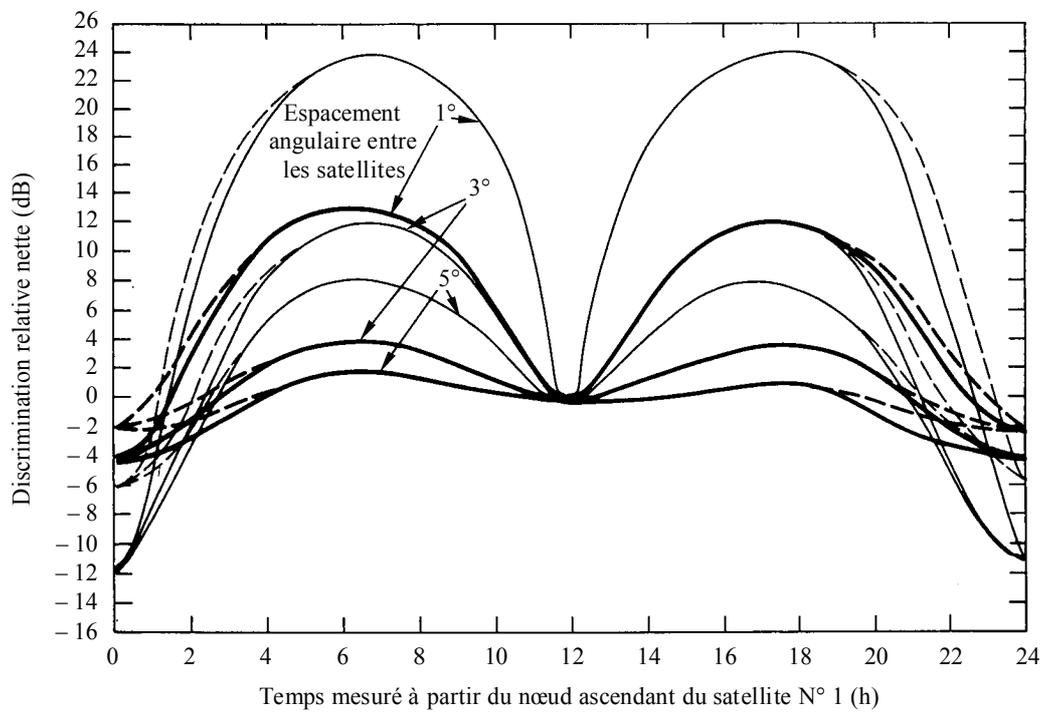


D08

Les résultats des Fig. 9 et 12 montrent que la discrimination nette entre un réseau à satellite sur orbite légèrement inclinée et un réseau à satellite géostationnaire dépend beaucoup de la position respective des zones de couverture des deux réseaux. Dans certains cas (voir la Fig. 12), la discrimination nette est quasiment toujours plus grande que la valeur nominale obtenue quand les deux réseaux sont géostationnaires. Ce sont les cas où l'impact de la discrimination de l'antenne du satellite est négligeable. Dans d'autres cas, où l'impact de l'antenne du satellite est important, il y a perte de discrimination nette (par rapport à la valeur nominale) au cours d'une certaine période pendant la journée. L'ampleur de la perte et sa durée sont fonctions de l'inclinaison, de l'espacement des satellites et de la largeur de la zone de couverture. Néanmoins, il faut souligner qu'en raison du choix du point A sur le diagramme d'antenne du satellite (voir la Fig. 7) les résultats susmentionnés représentent le «cas le plus défavorable». Dans bien des cas, les positions respectives des zones de couverture du réseau à satellite sont telles que le mouvement de la zone de couverture dû à l'exploitation sur orbite légèrement inclinée a un effet négligeable sur la discrimination nette entre les deux réseaux. En pareils cas, la variation de la discrimination globale sera déterminée par la discrimination de l'antenne de la station terrienne, laquelle pour ce cas (un réseau à satellite géostationnaire sur orbite légèrement inclinée, un autre à satellite géostationnaire) est toujours égale à, ou plus grande que, la valeur nominale.

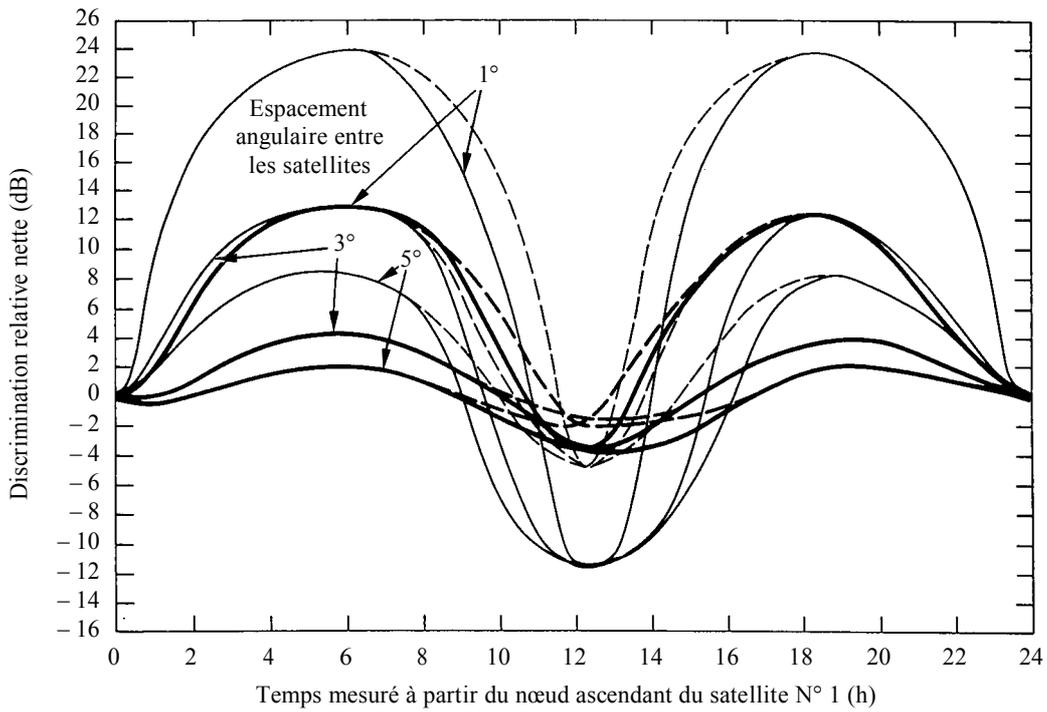
Des travaux complémentaires sont nécessaires pour les cas faisant intervenir deux réseaux à satellites sur orbite légèrement inclinée.

FIGURE 9
Discrimination relative nette en fonction du temps



Inclinaison: 3° (—); 9° (— — — —)
 Position du faisceau: 1
 Point de contrôle: 1a } (—); 1c } (— — — —)
 Ouverture du faisceau: 1,5° } (—); 3,0° } (— — — —)
 du satellite

FIGURE 10
Discrimination relative nette en fonction du temps



Inclinaison: 3° (———); 9° (———)

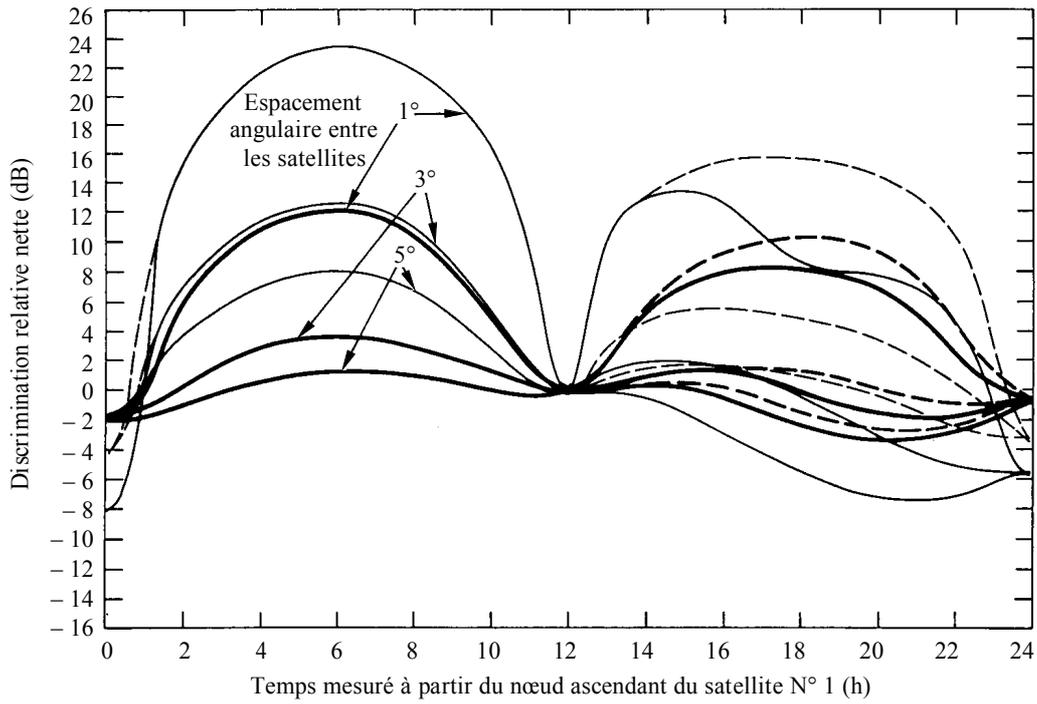
Position du faisceau: 2

Point de contrôle: 2a } (———); 2c } (———)

Ouverture du faisceau: 1,5° } (———); 3,0° } (———)

du satellite

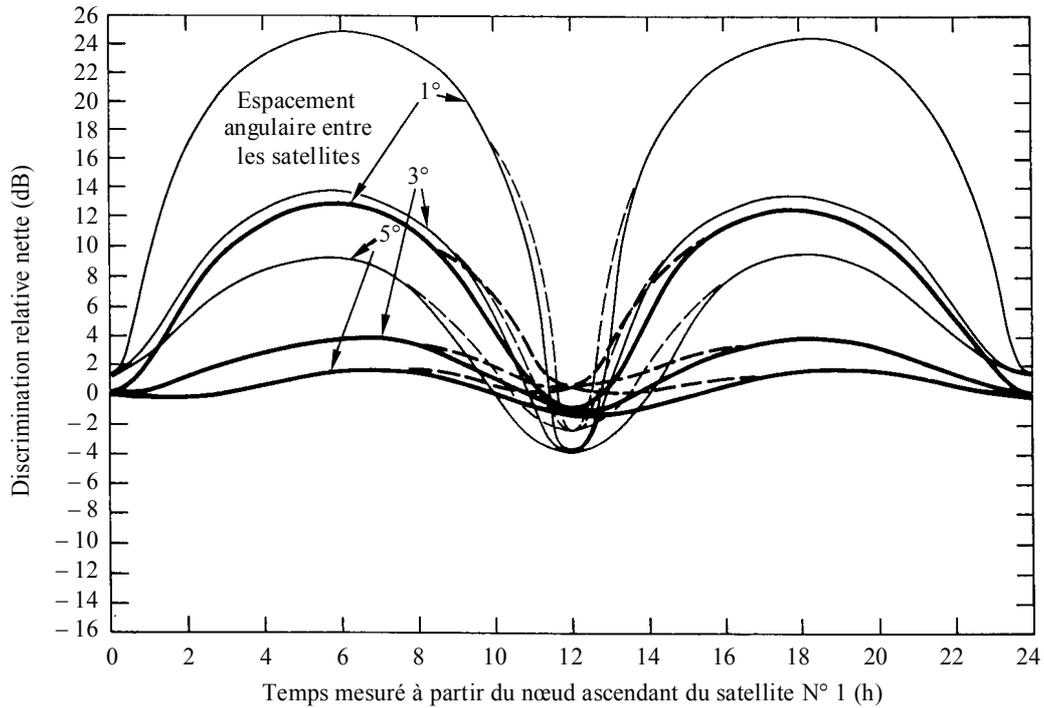
FIGURE 11
Discrimination relative nette en fonction du temps



Inclinaison: 3° (———); 9° (———)
 Position du faisceau: 3
 Point de contrôle: 3a } (———); 3c } (———)
 Ouverture du faisceau: $1,5^\circ$ } (———); $3,0^\circ$ } (———)
 du satellite

FIGURE 12

Discrimination relative nette en fonction du temps



Inclinaison: 3° (———); 9° (———)
 Position du faisceau: 3
 Point de contrôle: 3a } (———); 3c } (- - - -)
 Ouverture du faisceau: 1,5° } (———); 3,0° } (- - - -)
 du satellite

D12

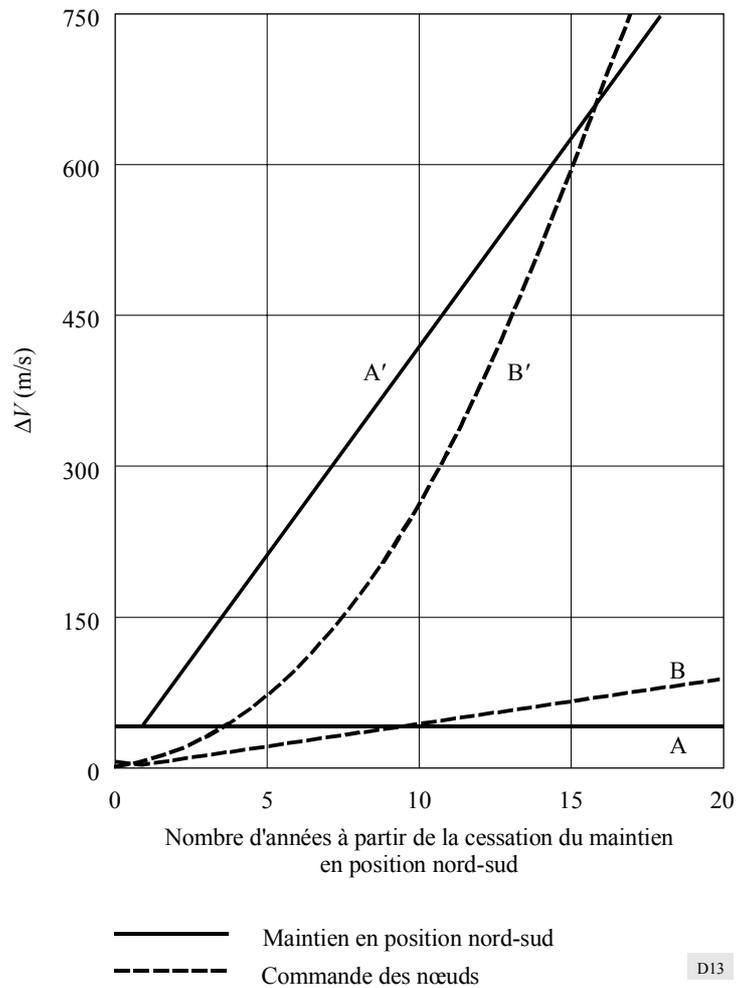
5 Régulation de la phase nodale

Les paragraphes précédents ont montré que la perte de discrimination de l'antenne de station terrienne devient importante quand la différence de phase nodale entre deux satellites voisins est proche de 270°. Or, il est possible, moyennant un coût modique en matière de propergol de maintien en position, de prévenir l'apparition du cas le plus défavorable de mise en phase orbitale de deux satellites voisins par une régulation des nœuds orbitaux, sorte de maintien en position de second ordre.

La Fig. 13 montre, sur les deux courbes du bas, les besoins annuels de changement de vitesse de révolution orbitale (ΔV) pour un satellite soumis à un strict maintien en position nord-sud (courbe A) et pour un satellite soumis au maintien de son nœud orbital d'ascension droite à 90° (courbe B). Les modifications de vitesse, qui sont proportionnelles au propergol de maintien en position qu'elles nécessitent, deviennent égales au bout de 9 ans environ. Quand on envisage les besoins cumulés globaux de propergol pour les deux modes de fonctionnement, la mise en phase des nœuds exige la même quantité de carburant que le maintien en position nord-sud seulement au bout de 16 ans (paire de courbes du haut). Pour une exploitation du satellite pendant 7 ans sans maintien en position dans l'axe nord-sud, le maintien d'un nœud à 90° d'ascension droite ne consomme que la moitié du carburant nécessaire pour le maintien en position nord-sud.

Dans la pratique, il est inutile de maintenir un nœud à 90° d'ascension droite; il suffit de procéder à une correction de nœud qui empêche l'apparition de la géométrie correspondant au cas le plus défavorable au point de vue brouillage. La quantité de propergol nécessaire dépend, entre autres, de la différence d'inclinaison des satellites; dans des situations favorables, aucune régulation de nœud n'est parfois nécessaire, même si les satellites de deux réseaux potentiellement brouilleurs peuvent se trouver sur orbite légèrement inclinée.

FIGURE 13
Modifications de la vitesse ΔV annuelle (courbes de la partie inférieure de la Figure) et cumulées



6 Considérations relatives à la coordination

Il semble, d'après les précédentes études, qu'il n'y ait pas de limitation intrinsèque à la coordination des réseaux utilisant des orbites géostationnaires légèrement inclinées.

Dans le cas d'un réseau géostationnaire et d'un réseau utilisant une orbite géostationnaire légèrement inclinée, l'isolation entre les réseaux sera égale ou supérieure à ce qu'elle serait dans le cas de deux réseaux à satellites géostationnaires assurant la même couverture. Par conséquent, le processus de coordination sera le même que si les deux réseaux étaient géostationnaires.

Si les deux réseaux à satellite utilisent des orbites géostationnaires légèrement inclinées, on pourra observer une isolation légèrement diminuée par comparaison à l'isolation entre des réseaux à satellite géostationnaire, dans le cas où les relations de phase nodale sont le plus défavorables entre les satellites et lorsque les réseaux assurent la même couverture. C'est cependant un aspect qui peut être déterminé et pris en considération par la coordination.

Dans des conditions où les réseaux n'assurent pas la même couverture, il faut prendre en considération la discrimination des antennes de satellite, ce qui rend les choses plus complexes pour ce qui est de l'estimation des effets de brouillage. Ceux-ci doivent pouvoir être également déterminés et pris en considération dans la coordination.

Cependant, il y a le cas où la coordination a été obtenue sur la base d'une inclinaison pratiquement de 0° , mais à une date ultérieure, l'inclinaison est autorisée à augmenter. Il semble que dans la plupart des cas dans la pratique, l'augmentation du brouillage ne serait pas importante, c'est-à-dire qu'on considère comme très faible la probabilité que toutes les conditions soient réunies simultanément pour réaliser le cas le plus défavorable de brouillage. Il s'ensuit que dans la plupart de ces cas, il est inutile de revenir sur la coordination d'un réseau précédemment coordonné comme géostationnaire et d'envisager de suspendre le maintien en position nord-sud avec d'autres réseaux à satellites géostationnaires.

Alors que d'une manière générale, l'exploitation sur orbite inclinée du satellite d'un réseau est réalisable sur la base d'accords de coordination entre réseaux qui supposent que le satellite du réseau est géostationnaire, il peut arriver dans certains cas que les accords de coordination entre réseaux à satellite géostationnaire assurent une protection insuffisante pour un fonctionnement sur orbite inclinée. Il est donc nécessaire de fixer les conditions dans lesquelles des accords de coordination entre réseaux à satellites géostationnaires sont insuffisants pour empêcher que se produisent des brouillages inacceptables entre réseaux quand un ou plusieurs réseaux commencent à fonctionner sur orbite inclinée.
