

RECOMMANDATION UIT-R S.670-1*

**Souplesse de positionnement des satellites
en tant qu'objectif de conception**

(1990-1992)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que la souplesse dans le positionnement des satellites peut améliorer l'efficacité de l'orbite des satellites géostationnaires;
- b) qu'un positionnement souple des satellites peut, dans certains cas, augmenter la possibilité d'une coordination fructueuse des fréquences;
- c) que le repositionnement peut avoir des conséquences sur la conception des satellites et notamment sur leur durée de vie et le compromis entre zone de couverture et qualité de fonctionnement;
- d) que le repositionnement des satellites aura des effets sur l'exploitation du secteur terrien et peut obliger à modifier le pointage d'un grand nombre de stations terriennes dépourvues de systèmes de poursuite;
- e) que la fréquence du repositionnement ne doit pas être trop élevée afin de minimaliser les interruptions causées aux services assurés;
- f) que la modification de l'ordre des satellites sur un arc donné de l'orbite des satellites géostationnaires risque d'être plus onéreuse qu'une légère modification de leurs espacements;
- g) que la possibilité d'adopter le repositionnement plutôt que d'autres moyens dépendra du caractère des stations terriennes et spatiales concernées;
- h) les analyses contenues dans les Annexes 1 et 2,

recommande

1 que les satellites du service fixe par satellite destinés à des réseaux nouveaux soient conçus de manière à pouvoir fonctionner à $\pm 2^\circ$ de leur position orbitale nominale ou, si la valeur en est plus faible, dans les limites de leur arc de service;

2 que les Notes suivantes soient considérées comme faisant partie de la Recommandation.

NOTE 1 – Les administrations sont encouragées à mettre au point de nouvelles techniques afin que les satellites puissent fonctionner à $\pm 5^\circ$ de leur position orbitale ou, si la valeur en est plus faible, dans les limites de leur arc de service.

NOTE 2 – On entend par réseaux nouveaux les réseaux pour lesquels la date de publication anticipée est postérieure à 1990.

* 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).

ANNEXE 1

Souplesse de positionnement des satellites**1 Introduction**

Les repositionnements sont possibles, tant du point de vue technique que de celui de l'exploitation, comme cela a été démontré dans diverses catégories de satellites. Cependant, la souplesse du choix de l'emplacement sur l'orbite présente des difficultés techniques et d'exploitation. Les avantages et inconvénients éventuels du repositionnement sont examinés dans la présente Annexe.

Deux méthodes de repositionnement ont été envisagées, à savoir:

- a) la réduction de l'espacement existant entre satellites sur l'orbite, et
- b) la révision complète de l'ordre des satellites sur un arc orbital.

L'un des avantages de la méthode a) est que les satellites peuvent, si nécessaire, continuer à émettre vers des stations terriennes de poursuite pendant le processus de repositionnement, car les trajets des satellites ne se croiseront pas. Le principal inconvénient de cette méthode est qu'elle nécessite le déplacement de plusieurs satellites. Bien que la méthode b) exige le déplacement d'un moins grand nombre de satellites, il est probable que ceux qui auront été déplacés le seront encore et seront donc pénalisés de plusieurs manières: interruptions de service, consommation accrue de combustible et changement des zones de couverture, toutes choses qui ne seront vraisemblablement pas acceptables sur le plan de l'exploitation.

2 Efficacité d'utilisation de l'orbite et remarques au sujet des systèmes

On observera qu'il est impossible de dire avec certitude quelles sont les zones géographiques dont il faudra assurer la desserte à un certain moment dans l'avenir à partir d'une portion donnée de l'orbite. Aussi ne pourra-t-on tirer pleinement parti de ce moyen d'optimiser l'utilisation de l'orbite que si les réseaux sont conçus de telle manière que leurs satellites puissent être, si nécessaire, repositionnés dans les limites d'un certain arc de service après leur première mise en service. Cette capacité de repositionnement des satellites après leur mise en service serait très utile vu qu'elle permettrait également de trouver de la place sur l'orbite pour des nouveaux satellites appartenant à de nouveaux réseaux qui n'avaient pas été prévus. Un tel repositionnement pourrait être moins onéreux que d'autres solutions techniques possibles telles que des antennes améliorées pour les stations terriennes ou de nouvelles techniques de modulation très raffinées.

Toutefois, au stade actuel, on peut difficilement déterminer dans quelle mesure il est réalisable techniquement, et rentable, de construire des réseaux de systèmes à satellites assurant une grande souplesse de positionnement sur l'orbite. Le repositionnement d'un satellite sur son arc de service devrait être acceptable pendant la phase de conception théorique tandis que pendant la phase d'élaboration et de construction, les changements de position sur l'orbite ne devraient pas dépasser certaines limites fixées au préalable, à l'intérieur desquelles les inconvénients techniques et financiers restent raisonnables (et acceptables). Cela ne peut être décidé que cas par cas. Actuellement, il semble possible de déplacer les satellites de $\pm 2^\circ$ par rapport à leur position orbitale initiale. Les systèmes en exploitation ne devraient pas être déplacés sur l'orbite à moins que cela ne soit fait délibérément, et tout supplément de brouillage dû à la nécessité de tenir compte de nouveaux systèmes devrait être traité selon les Recommandations UIT-R.

3 Problèmes éventuels liés au repositionnement

3.1 Limitations de l'arc de service

Il peut être nécessaire de déplacer un satellite d'une position orbitale à une autre, à l'intérieur de son arc de service, après l'entrée en service, pour permettre l'accès d'un nouveau réseau. L'amélioration de l'accès à l'orbite ainsi obtenue sera plus grande si l'arc de service est long. Toutefois, prévoir un long arc de service peut avoir un effet significatif sur la conception optimale d'un réseau, notamment en ce qui concerne les antennes de satellite à faisceau étroit et certaines conséquences sur la qualité.

L'arc de service des satellites desservant des zones très étendues en longitude serait court vu que leur arc visible est petit. Un moyen éventuel d'agrandir l'arc de service consiste à subdiviser la zone de service et de la répartir entre deux satellites, nettement séparés sur l'orbite et reliés par des liaisons intersatellites. Cependant, une telle méthode serait onéreuse.

On a constaté que les satellites à usages multiples peuvent fournir des services en plus de ceux du service fixe par satellite, et ces fonctions supplémentaires peuvent être déterminantes dans le choix de la position orbitale. Dans le cas des services météorologiques, par exemple, le concept de l'arc visible ne présente pas nécessairement d'intérêt.

3.2 Antennes des stations terriennes

Un changement de l'emplacement du satellite nécessiterait des ajustements de la direction de pointage des antennes des stations terriennes et, (pour la polarisation rectiligne) des ajustements du plan de polarisation. Cependant, si l'antenne de la station terrienne est petite et si le satellite est maintenu en place à $\pm 0,1^\circ$ près, dans le sens est-ouest et dans le sens nord-sud, les antennes des stations terriennes ne doivent pas nécessairement, en utilisation normale, être orientées pour suivre le satellite. De nombreuses petites stations terriennes n'auront pas de personnel technique permanent. Dans un nombre croissant de réseaux, le pointage des antennes sera limité au pointage manuel et seules des possibilités limitées d'ajustement de la direction de pointage du faisceau seront offertes. Dès lors, même une modification peu importante de la position du satellite peut représenter des problèmes mécaniques et d'exploitation, les équipes techniques devant se rendre à toutes les stations terriennes du réseau et des interruptions du service seraient à envisager. Les fondations des antennes devraient être conçues de manière à permettre des modifications pour la cas le plus défavorable dans la direction de pointage, aux conditions appropriées à chaque emplacement de station terrienne et à chaque arc de service.

Des modifications de l'angle de site des antennes de stations terriennes pourraient influencer négativement le G/T par temps clair et l'importance des dégradations de la propagation. De tels effets pourraient être marqués dans les climats à fortes pluies et où l'angle de site de la station terrienne est faible. Les marges de p.i.r.e. de la liaison montante et de la liaison descendante devraient être augmentées, le cas échéant, pour tenir compte de la nécessité éventuelle de déplacer le satellite. La répercussion qu'aurait une diminution des angles de site sur les marges du système peut être importante: elle dépend de la fréquence d'exploitation.

Les changements de l'angle de site de l'antenne de la station terrienne, de l'azimut et de la p.i.r.e. pourraient infirmer la coordination avec les stations radioélectriques de Terre fonctionnant dans les mêmes bandes de fréquences. Dès lors, il serait souhaitable de tenir compte des éventuels mouvements des satellites lors du processus initial de coordination des fréquences.

Les changements de site sont accompagnés d'un changement d'azimut. Le changement peut varier d'une valeur très petite pour les stations terriennes aux latitudes élevées jusqu'à 180° pour les stations terriennes sur l'équateur et proches du point de projection du satellite sur la surface

terrestre. Si l'on considère le système, ce sont pourtant les changements de l'angle de site qui seront les plus importants car ce sont ces derniers qui influenceront sur les variations de l'affaiblissement le long du trajet et sur les marges d'évanouissement requises dans des conditions d'évanouissement.

3.3 Repointage de l'antenne de la station terrienne

3.3.1 Généralités

De toute évidence, la répercussion sur le réseau des stations terriennes serait la nécessité de modifier le pointage des antennes et les réglages des angles de polarisation. Cela n'est considéré comme important que pour les antennes qui n'ont pas de possibilités de poursuite. Un déplacement de l'ordre de 10° dans les bandes exploitées en partage avec le réseau de Terre risque de poser des problèmes de coordination.

3.3.2 Repointage des très petites antennes

Les p.i.r.e. des satellites du service fixe par satellite vont en augmentant et, il sera peut-être bientôt possible d'employer des récepteurs au sol avec des antennes de moins d'un mètre de diamètre. La facilité avec laquelle les personnes ayant peu ou pas d'expérience peuvent repointer des antennes dépend beaucoup de la taille et du type de l'antenne utilisée. Toutefois, les réglages de polarisation nécessaires présenteraient des difficultés sauf dans le cas de la polarisation circulaire.

3.3.3 Repointage d'antennes de 1 à 2 m

Pour les satellites de puissance moyenne, on utilise généralement des récepteurs au sol avec des antennes de diamètre compris entre 1 et 2 m et ne comportant pas de possibilités de poursuite.

Avec ces types d'antenne, il serait également nécessaire de changer le pointage de l'antenne et l'orientation de la polarisation pour les émissions en polarisation rectiligne. Des antennes à monture polaire réduisent grandement les difficultés de déplacement entre des positions différentes de satellite; aussi sont-elles de plus en plus utilisées conjointement avec repointage et dispositif de réglage de polarisation automatiques.

3.3.4 Repointage d'antennes de 2 à 5 m

Dans la bande des 14/11 GHz, une antenne de cette dimension a une ouverture angulaire étroite; aussi a-t-elle plus de chances d'admettre un dispositif de poursuite, ce qui n'est pas le cas lorsqu'il s'agit de la bande des 6/4 GHz.

Des antennes de cette taille sont fréquemment employées soit dans le cas de satellites de faible puissance, soit pour la réception en dehors de la zone de couverture principale de satellites de puissance élevée. Dans ce cas, ce qui est le plus important, c'est que des antennes ayant une commande d'orientation dans un angle insuffisant auront des difficultés en ce qui concerne le repointage.

Tout mouvement du ou des satellites au-delà de ses (leurs) contraintes nominales de maintien en position conduirait à de réelles difficultés d'exploitation pour certains services, même si la position du satellite n'avait été changée que lentement.

Il serait irréalisable de confier le réglage d'antennes de cette catégorie à du personnel non expérimenté; en conséquence, suffisamment de temps et de fonds devraient être alloués pour que des techniciens qualifiés s'occupent de tous les terminaux concernés, dont le nombre peut aller de quelques centaines à quelques milliers. Ce serait là une entreprise de grande envergure, qui ne devrait pas être traitée à la légère.

3.3.5 Station terrienne à faisceaux multiples

Pour un certain nombre de systèmes à satellites multiples, on cherche à utiliser des stations terriennes à faisceaux multiples pour accéder simultanément à plus d'un satellite. Si des stations terriennes de ce type se multipliaient, le déplacement admissible d'un satellite par rapport aux autres dans le système devrait, dans ce cas, être soumis à des contraintes sévères.

3.3.6 Interruptions de service

Si le satellite doit traverser la position orbitale d'un autre satellite fonctionnant dans les mêmes bandes de fréquences lors de son déplacement vers sa nouvelle position, des brouillages peuvent survenir si les deux réseaux sont maintenus opérationnels. Par ailleurs, les aspects mécaniques du déplacement peuvent imposer que certains des sous-systèmes principaux du satellite en repositionnement soient temporairement mis hors circuit, c'est-à-dire que les panneaux solaires ou les antennes soient bloqués au cours du déplacement; le réglage précis et continu de l'orientation du satellite serait difficile. En conséquence, des circonstances pourraient se présenter où une partie ou l'ensemble du trafic normalement assuré par le satellite devrait être détourné pendant la période de repositionnement, qui peut durer plusieurs jours.

Certains de ces problèmes ne se présenteraient pas s'il y avait un satellite de réserve en orbite. Dès lors, il serait possible de placer ce satellite de réserve sur la nouvelle position choisie, et de transférer le service d'un satellite à l'autre en orientant les antennes des stations terriennes sur le satellite de réserve.

Un facteur important, à la fois du point de vue de l'exploitation et du point de vue commercial, est la durée pendant laquelle le fonctionnement du satellite serait interrompu lors du repositionnement. Cela dépendra de la quantité de combustible qu'on peut utiliser à cette fin, de l'existence ou non d'un satellite de réserve sur l'orbite et du changement de position longitudinal nécessaire. Dans certains cas, c'est la durée nécessaire pour repointer toutes les stations terriennes qui pourrait se révéler être le facteur critique.

3.4 Zones de couverture et antennes des satellites

Une conséquence de déplacement du satellite d'une position à une autre serait de provoquer une déformation des zones de couverture au sol. La mesure dans laquelle ce fait influe sur l'ensemble des caractéristiques dépendra de nombreux facteurs, y compris l'emploi de satellites à faisceau unique ou à faisceaux multiples, la dimension des faisceaux, l'ampleur du déplacement du satellite et le degré de précision avec lequel il est possible de repointer les antennes du satellite.

Lorsque le satellite est repointé vers le centre nominal du faisceau, on constate que les zones de couverture ne diffèrent que légèrement aux extrémités. Dans le cas le plus défavorable (près de l'équateur), l'ouverture angulaire de l'antenne du satellite devrait être à peu près doublée par rapport aux latitudes plus élevées. Ce phénomène serait plus significatif pour les faisceaux modelés que pour les faisceaux ponctuels.

Une antenne de satellite est généralement conçue pour fournir une couverture optimale d'une zone géographique donnée à partir d'un emplacement précis sur l'orbite des satellites géostationnaires. S'il était nécessaire que les satellites aient un arc de service important, il faudrait généralement avoir la possibilité de modifier l'angle de pointage des faisceaux alors que le satellite est en orbite. De plus, il faudrait que les sections transversales des faisceaux soient modelées de telle sorte que l'empreinte couvre les zones de service à partir de n'importe quel point d'un arc de service. Pour cette raison, le gain des faisceaux des antennes de satellites serait probablement inférieur à ce qu'il serait si leur forme était optimisée pour un emplacement orbital unique; en conséquence, le risque de brouillages causés dans d'autres réseaux à satellites serait accru, de même que le risque de subir des brouillages.

Dans le cas des grandes zones de service, dans toute la gamme des hyperfréquences et dans le cas des zones de service réduites, pour les fréquences les plus élevées de cette gamme, l'utilisation de systèmes d'antennes «compound» à configuration variable, ayant un grand nombre de faisceaux très directifs et à gain élevé, constitue une solution efficace au problème d'orientation des faisceaux et d'ajustement de leur section transversale de telle manière que les performances du système soient maintenues et que la situation au niveau du brouillage ne soit pas aggravée.

Dans le cas des petites zones de service, les faisceaux étroits classiques seront aussi couramment utilisés. Jusqu'à présent, les études indiquent que, pour les systèmes à satellites futurs, une possibilité de repositionnement de $\pm 10^\circ$ entraînerait une «pénalisation» ne dépassant pas 1 dB dans les performances du satellite et ne dépassant pas 2 dB au niveau des brouillages. En pratique, il devrait suffire de procéder à un repositionnement moins important pour obtenir des résultats satisfaisants. Le fait de rester dans ces limites de «pénalisation» entraînera sans doute ce qui suit:

- les faisceaux de satellite doivent être orientables sur l'axe de tangage du satellite. Lorsque le satellite n'a qu'un seul faisceau, on peut obtenir un réglage suffisant sur l'axe de tangage en agissant sur le système de commande d'orientation du satellite. Lorsqu'il y a plus d'un faisceau, un pointage indépendant du faisceau en tangage peut être nécessaire;
- dans certains cas, il faudra orienter les faisceaux sur l'axe de roulis du satellite; les facteurs qui rendent nécessaire le réglage en roulis sont:
 - les dimensions réduites de la zone de couverture du faisceau, par exemple avec un diamètre équivalent de 200 km ou moins;
 - la latitude élevée de la zone de service;
 - une grande différence entre la longitude du satellite et la longitude de la zone de service.

L'orientation des faisceaux multiples d'antenne de satellite produits par un réflecteur unique présente une difficulté supplémentaire qui s'accroît d'autant plus que les dimensions du faisceau sont réduites. Ce problème sera particulièrement important dans le cas des bandes de fréquences élevées, là où des antennes de satellite à très haut gain sont nécessaires pour surmonter les affaiblissements de propagation.

Même avec les moyens d'orientation en tangage et en roulis, la perte de performances du réseau peut excéder 1 dB si la différence de longitude entre le satellite et la zone de service est grande.

Ces conclusions sont fondées sur les études faites dans l'hypothèse où les zones de service sont approximativement carrées.

La situation est considérablement améliorée si l'antenne de satellite peut être optimisée par rapport à la nouvelle zone de service au cours des dernières étapes de la fabrication, voire après la mise en orbite. Si on dispose de ces techniques, il peut être effectivement avantageux d'occuper une position orbitale avec des angles de site modestes.

3.5 Eclipses solaires

Les satellites dont la capacité électrique est insuffisante pour assurer un service complet au cours d'éclipses solaires totales pourraient être situés uniquement dans les emplacements orbitaux où les éclipses ne surviennent qu'en dehors des périodes de trafic intense. Une telle contrainte devrait être évitée, dans la mesure du possible, dans le service fixe par satellite, en prévoyant une capacité électrique suffisante pour assurer tous les services pendant les éclipses.

3.6 Quantité de propergol nécessaire pour un changement d'emplacement orbital

Le facteur qui détermine l'aptitude et la vitesse avec lesquelles un satellite peut être déplacé sur l'orbite est défini par la quantité de combustible qui est nécessaire pour maintenir le satellite en position et qu'on peut utiliser pour le repositionnement. Dans le cas d'un satellite de taille moyenne, pour un déplacement de 10° en un jour environ, il faudrait utiliser la quantité de combustible nécessaire pour maintenir le satellite en position pendant un an.

Il est donc souhaitable de limiter, pour chaque satellite, le nombre et l'ampleur des repositionnements afin de ne pas imposer de pénalisations trop sévères en matière de couverture d'antenne et de quantité de combustible nécessaire pour maintenir le satellite en position.

Le carburant nécessaire pour repositionner un satellite en orbite est fonction de la vitesse orbitale, de la durée de la manœuvre, de la masse de l'engin spatial et de l'efficacité du propulseur. La manœuvre est effectuée en imposant au satellite des variations de vitesse, $+\Delta V$ et $-\Delta V$, séparées par la durée du repositionnement. L'Annexe 2 décrit le mode de calculs d'une série de manœuvres de repositionnement en orbite utilisant des équations classiques de déplacement sur orbite. Un repositionnement rapide, visant à minimiser les perturbations du trafic, entraînerait une forte pénalisation en matière de combustible nécessaire pour maintenir la station en position et aurait par conséquent des répercussions sur la durée de vie opérationnelle de l'engin spatial.

Bien entendu, les observations ci-dessus s'appliquent uniquement à des repositionnements qui ont lieu après le lancement. Dans le cas d'un repositionnement prévu avant le lancement, le carburant et le temps nécessaires seraient généralement nettement inférieurs à ceux d'un déplacement lorsque le satellite est déjà sur l'orbite géostationnaire, étant donné qu'il suffirait de modifier le profil de lancement.

3.7 Commande du satellite pendant le repositionnement

L'orbite de transfert pour le repositionnement du satellite est légèrement elliptique, avec un périhélie (pour le mouvement est-ouest) ou un apogée (pour le mouvement dans le sens opposé) tangentiel à l'orbite des satellites géostationnaires. Aussi, par rapport aux axes géostationnaires, le satellite semblera osciller. S'il est nécessaire de dépasser d'autres satellites au cours du transfert, il faudra tenir compte du moindre risque de collision. Il s'agit là d'un autre facteur entrant en ligne de compte pour déterminer la vitesse de repositionnement et toute modification temporaire de l'inclinaison.

Il faut également coordonner les signaux de poursuite, de télémétrie et de télécommande lorsque le satellite est radialement proche d'autres satellites.

Dans le cas de satellites pourvus d'équipements de grandes dimensions, tels que des panneaux solaires ou des antennes télescopiques, il faut éventuellement tenir compte des contraintes de l'accélération imposées à ces équipements lors de l'établissement de la vitesse de repositionnement et de l'orientation du satellite pendant la manœuvre.

3.8 Autres problèmes identifiés

Les autres problèmes énumérés ci-après ont été identifiés mais n'ont pas encore été étudiés et ne peuvent être développés pour l'instant:

- si un satellite doit fonctionner dans une bande de fréquences faisant partie d'un plan de fréquences, par exemple, la bande de radiodiffusion par satellite à 12 GHz, comme d'ailleurs le service fixe par satellite, on peut ne pas être libre du déplacement pour permettre l'accès en orbite d'un nouveau satellite du service fixe par satellite. Des situations analogues peuvent se présenter dans d'autres cas de satellites qui combinent différents services;

- des restrictions supplémentaires peuvent s'imposer si on utilise à bord du satellite des systèmes de poursuite RF ou d'autres types de systèmes;
- aucune évaluation n'a été faite concernant l'effet d'un repositionnement du satellite sur des satellites utilisant des liaisons intersatellites; ceci devrait faire l'objet d'une étude.

4 Remarques au sujet des satellites de la deuxième génération

On peut profiter de la période de transition d'une génération d'un système à satellite à la suivante pour effectuer des changements de positions orbitales. Il est manifestement souhaitable de maintenir les services à partir de la même position orbitale d'une génération à la suivante mais, étant donné qu'il y a en général une période de plusieurs mois au cours desquels il est possible de poursuivre l'exploitation simultanée d'un satellite nouveau et d'un satellite ancien, il est vraisemblable que le repositionnement pourrait se réaliser au cours de cette période de transition dans certains cas.

5 Conclusions

Il est admis que la conception d'un système en fonction de la souplesse de l'emplacement orbital peut avoir des influences négatives sur les performances et accroître le coût des satellites, surtout parce qu'il faut souvent prévoir des moyens de réorienter les faisceaux afin de conserver la couverture nécessaire. D'autres coûts supplémentaires peuvent apparaître lors de l'exploitation du système lorsque la position d'un satellite opérationnel doit être modifiée. Cependant, il est également évident que, si tous les réseaux à satellites avaient un arc de service plus grand, il y aurait davantage de probabilités pour que des nouveaux réseaux non prévus puissent être facilement intégrés. Pour cette raison, il est souhaitable d'aboutir à un équilibre sage entre la souplesse d'un grand arc de service et l'abaissement des coûts du système.

Il est également admis que des changements fréquents des emplacements de satellite ne seront probablement pas envisageables vu la consommation de propergol du satellite et la diminution de la durée de vie utile qui en résulte. Certains réseaux peuvent également être pénalisés par une dépense substantielle dans le segment terrestre consécutif à la nécessité de réajuster les directions de pointage des antennes.

Les problèmes de repositionnement du satellite peuvent être considérablement réduits, souvent pour une dépense relativement modeste, si dans la conception et la coordination des stations terriennes et des satellites, on prend en compte, dès le début, la nécessité éventuelle de changer d'emplacement à une date quelconque après la mise en service, y compris les besoins d'interconnexion et d'arc de service du réseau opérationnel.

Il ressort de l'analyse des problèmes évoqués au § 3 que la méthode la plus prometteuse, tant par sa simplicité que par le peu d'inconvénients qu'elle présente pour les usagers, consisterait à exploiter un système à espacements réduits dans lequel chaque satellite pourrait être déplacé dans une proportion relativement faible. Il devrait être possible de prévoir un écart de $\pm 2^\circ$ pour les satellites qui emploient la technologie existante. On pourrait minimiser les inconvénients rencontrés par les usagers en repositionnant les satellites si cela est absolument nécessaire et, en tout état de cause, en ne les repositionnant pas plus d'une fois au cours de leur durée de vie utile.

Il est connu que les difficultés rencontrées pour modifier les caractéristiques des antennes de satellite après le lancement peuvent être insurmontables dans certains cas particuliers; si tel est le cas, il serait utile de concevoir l'engin spatial de telle manière que les diagrammes de couverture de l'antenne puissent être ajustés aussi longtemps que possible au cours de la construction de l'engin.

ANNEXE 2

Consommation de propergol exprimée en vitesse de déplacement angulaire pour le repositionnement d'un engin spatial

En faisant appel aux formules de l'espacement orbital normal et aux formules de propulsion pour l'expulsion de masse, en tenant compte des approximations standards selon une progression régulière, on peut établir les formules suivantes:

Etant donné un déplacement angulaire nécessaire de α° (positif pour le mouvement est-ouest, négatif pour le sens ouest-est) à obtenir en n périodes (jours):

$$\frac{\alpha}{n} = \frac{P_t - P_0}{P_0} \times 360$$

ou

$$P_t = P_0 \left(1 + \frac{\alpha}{360 n} \right) \quad \text{s} \quad (1)$$

où:

$$P_0: \text{ période normale} = 2\pi = \sqrt{\frac{r_1^3}{\mu}} \quad \text{s}$$

P_t : période de l'orbite de transfert.

L'axe semi-principal A de l'orbite de transfert est:

$$A = \frac{r_1 + r_2}{2}$$

ou

$$r_2 = 2A - r_1 \quad \text{km} \quad (2)$$

où:

r_1 : rayon de l'orbite des satellites géostationnaire = 42 164 km

r_2 : rayon de l'apogée de l'orbite de transfert (km).

La période de l'orbite de transfert est donnée par:

$$P_t = 2\pi \sqrt{\frac{A^3}{\mu}} \quad \text{s} \quad (3)$$

où:

μ : constante de la gravitation terrestre = $3,986 \times 10^{-5} \text{ km}^3/\text{s}^2$

Dès lors, on peut déterminer la quantité r_2 des formules (1), (2) et (3).

La vitesse orbitale pour une orbite circulaire est donnée par:

$$V_0 = \sqrt{\frac{\mu}{r_1}} \quad \text{km/s} \quad (4)$$

Lorsque l'énergie de l'orbite est modifiée selon une progression régulière et que l'orbite devient elliptique, on peut démontrer que la vitesse au périhélie est:

$$V_1 = \sqrt{2\mu \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_1 + r_2} \right)} \quad \text{km/s} \quad (5)$$

Dès lors, l'augmentation de vitesse ΔV est:

$$\Delta V = V_1 - V_0 \quad \text{km/s} \quad (6)$$

Enfin, à partir de la formule de la poussée, on peut déterminer approximativement la quantité de propergol nécessaire par:

$$M_p \approx 2M_0 \frac{\Delta V}{g I_{sp}} \quad \text{kg} \quad (7)$$

où:

g : accélération due à la gravité au niveau du sol, soit $9,809 \text{ m/s}^2$

I_{sp} : impulsion spécifique des moteurs de propulsion

M_0 : masse initiale de l'engin spatial.
