

RECOMMANDATION UIT-R S.1759

Analyse des brouillages causés par les émissions des exploitations spatiales des systèmes HEO dans les bandes du SFS sur les réseaux OSG, et directives correspondantes à utiliser pour la conception et l'exploitation d'équipements de TP&T destinés aux systèmes du SFS du type HEO

(2006)

Domaine de compétence

La présente Recommandation porte sur une analyse des brouillages causés par les émissions des exploitations spatiales de systèmes SFS du type HEO sur les réseaux OSG dans les bandes du SFS auxquelles s'appliquent les limites de puissance surfacique équivalentes (epfd) visées à l'Article 22 du Règlement des radiocommunications (RR). Elle propose en outre des techniques qu'on pourra envisager d'utiliser dans la conception et l'exploitation des liaisons de télémétrie, poursuite et télécommande (TP&T) des systèmes SFS du type HEO afin d'assurer une protection adéquate des liaisons OSG utilisant la même fréquence conformément aux dispositions de l'Article 22 du RR.

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que tous les satellites du SFS doivent être pourvus de fonctions de télémétrie, de poursuite et de télécommande (TP&T);
- b) que les fonctions de TP&T sont assurées sur les satellites du SFS pendant les orbites de transfert, mais aussi pendant leur fonctionnement normal (au-dessus des stations) sur diverses orbites des satellites non géostationnaires (non OSG);
- c) que les émissions des signaux de télécommande commencent et finissent quand le décide l'opérateur du satellite;
- d) qu'aux porteuses de TP&T doivent correspondre des objectifs de fiabilité de fonctionnement supérieurs à ceux associés aux porteuses assurant un trafic normal, selon la Recommandation UIT-R S.1716;
- e) que la perte des porteuses de télécommande ascendantes à destination d'un satellite et des porteuses de télémétrie descendantes et pendant des manœuvres sur orbite, ou lorsqu'une panne sérieuse se produit à bord d'un engin spatial, pourrait se traduire par la perte du satellite;
- f) que les fonctions TP&T seront normalement assurées à l'intérieur de la bande de service dans laquelle est exploitée la station spatiale, au lieu que ce soit à l'intérieur des bandes du *service d'exploitation spatiale* (SES), et que certaines stations spatiales pourvues de bandes de service au-dessus de 17 GHz peuvent utiliser leurs équipements de TP&T dans des bandes inférieures à 17 GHz;
- g) que les opérateurs des systèmes SFS du type HEO devraient bénéficier d'une certaine flexibilité pour pouvoir utiliser les équipements de TP&T dans la bande de fréquences la plus appropriée;
- h) que les satellites SFS du type HEO émettent et reçoivent pour la plupart les porteuses de service seulement lorsqu'ils se trouvent à l'intérieur de leurs arcs «actifs», caractérisés par une

grande séparation angulaire par rapport aux liaisons OSG, mais qu'il ne serait pas pour autant judicieux de limiter les fonctions TP&T à ces arcs actifs;

j) qu'il y a éventuellement plusieurs possibilités pour résoudre le problème de l'exploitation de liaisons TP&T destinées à des systèmes du type HEO dans les bandes du SFS compte tenu des limites de puissance surfacique équivalente (epfd) visées à l'Article 22 du Règlement des radiocommunications (RR), tout en assurant une protection appropriée des systèmes OSG exploités dans ces bandes,

reconnaissant

a) que dans les bandes de fréquences visées au numéro 22.2 du RR, il faut faire en sorte que les émissions TP&T montantes et descendantes du type HEO ne causent pas de brouillage inacceptable aux réseaux SFS et SRS OSG;

b) que dans certaines bandes de fréquences visées à l'Article 22 du RR, les satellites du type HEO doivent respecter des limites de epfd;

c) que dans les bandes de fréquences du SFS autres que celles visées à l'alinéa a) du *reconnaissant* ci-dessus, l'utilisation en partage entre les systèmes SFS du type HEO et les réseaux SFS OSG est soumise à l'application des dispositions pertinentes de la Section II de l'Article 9 du RR,

recommande

1 que l'analyse technique et opérationnelle et les techniques exposées à l'Annexe 1 soient prises en considération par les opérateurs des systèmes SFS du type HEO dans la conception et l'exploitation de leurs systèmes TP&T.

Annexe 1

Analyse des brouillages causés par les émissions des exploitations spatiales des systèmes HEO dans les bandes du SFS sur les réseaux OSG, et certaines techniques d'atténuation des brouillages

Rappel

Même si un satellite HEO type (toute référence à un système HEO dans la présente Annexe s'entendra d'un système SFS du type HEO) émet et reçoit les porteuses de service seulement lorsqu'il se trouve à l'intérieur de son arc ou de ses arcs «actif(s)», ses porteuses de télémétrie, de poursuite et de télécommande (TP&T) doivent rester actives même à l'extérieur de ces arcs, de sorte qu'il est peu probable qu'elles puissent satisfaire aux dispositions du numéro 22.2 du RR et, en particulier, respecter les limites de epfd fixées à l'Article 22 du RR, lorsque ces dernières sont applicables. Des simulations sur ordinateur des liaisons TP&T dans un système HEO type permettent de déterminer les possibilités de résoudre ce problème.

1 Introduction

Ces dernières années, les Commissions d'études de l'UIT-R ont été saisies des résultats de nombreuses études de brouillages entre systèmes HEO et réseaux OSG, résultats montrant en général que les limites de epfd_↓ et de epfd_↑ fixées dans les Tableaux 22-1A, B, D et E et 22-2 de

l'Article 22 du RR seraient respectées par les systèmes HEO concernés. Dans ces études, les brouillages ont été calculés pour les liaisons de service des systèmes HEO, chacun étant conçu de telle sorte que tous ses satellites suivent de façon séquentielle une trajectoire répétitive au sol, avec une apogée se situant au point de latitude le plus haut ou à proximité, et que chaque satellite émette et reçoive seulement lorsqu'il se trouve à l'intérieur d'un arc «actif» renfermant l'apogée. Une conséquence de ces configurations est qu'aucun satellite, en ce qui concerne les liaisons de service, n'émet ou ne reçoit lorsqu'il coupe la ligne ou passe à proximité de la ligne se trouvant entre un quelconque satellite géostationnaire et n'importe quel point de la surface de la Terre. Dans une étude récente portant sur 12 configurations orbitales HEO différentes, on a constaté que l'angle hors axe minimum par rapport à n'importe quelle liaison OSG à laquelle s'est produite une émission de liaison de service HEO était supérieur à 25°. Grâce à cette caractéristique, des systèmes HEO types peuvent en général respecter les limites de efpd sans l'application de techniques d'atténuation des brouillages additionnelles.

Normalement, l'arc «actif» d'un système HEO ne comprend qu'un quart ou qu'un tiers de chaque période orbitale; pendant la partie restante, la continuité des liaisons de service est assurée par les autres satellites suivant la trajectoire répétitive au sol. Toutefois, chaque satellite d'un système exige ces propres porteuses de télémétrie et de télécommande, sur des fréquences qui lui sont exclusives (à l'intérieur du système), et ces porteuses doivent être capables d'émettre à n'importe quel moment pendant toute la durée de vie du satellite sur orbite. Cela vaut pour tous les types de satellites géostationnaires ou non géostationnaires, et pas uniquement pour les satellites HEO. Il ne serait assurément pas pratique d'exploiter un satellite dont les porteuses de télémétrie et de télécommande ne pourraient être transmises que pendant un quart, ou un tiers, de chaque période de 12, 18 ou 24 h, et il est probable, contrairement à ce qui se passe avec des liaisons de service de système HEO, qu'il faille éventuellement que les liaisons TP&T puissent émettre pendant les transitions «en ligne» des liaisons OSG. C'est pourquoi on considère comme nécessaire de procéder à une évaluation distincte des liaisons TP&T HEO dans le cadre du numéro 22.2 du RR ainsi que des limites de efpd visées à l'Article 22 du RR, lorsqu'elles sont applicables. Par ailleurs, il conviendrait de prendre note des points suivants:

- La présente Annexe s'attache pour l'essentiel à la réalisation des fonctions TP&T à l'intérieur de la bande de service du système HEO, et non à l'intérieur des bandes du *service d'exploitation spatiale* (SES), puisqu'il est commun d'adopter cette méthode pour la conception des systèmes à satellites modernes. Dans le numéro 1.23 du RR est ainsi défini le service d'exploitation spatiale: «**1.23 service d'exploitation spatiale: service de radiocommunication** destiné exclusivement à l'exploitation des *engins spatiaux*, en particulier la *poursuite spatiale*, la *télémétrie spatiale* et la *télécommande spatiale*. Ces fonctions seront normalement assurées au sein du service dans lequel fonctionne la *station spatiale*». La présente Annexe examine brièvement la possibilité d'assumer les fonctions TP&T à l'intérieur des bandes du SES.
- Bien que le système HEO de notre exemple retienne pour les fonctions TP&T la bande Ku de 12-18 GHz, les résultats de la présente Annexe seront valables également pour les fonctions TP&T dans d'autres bandes de fréquences auxquelles sont applicables les limites de efpd de l'Article 22 du RR.
- En ce qui concerne les fonctions TP&T dans les bandes de fréquences du SFS auxquelles ne s'appliquent pas les limites de efpd, la présente Annexe ne sera toutefois pas sans utilité pour l'analyse des brouillages ainsi que pour la détermination et l'évaluation des techniques permettant d'atténuer les brouillages causés à des réseaux OSG.

2 Liaisons TP&T d'un système HEO choisi à titre d'exemple

Afin d'évaluer la nature du problème évoqué dans l'introduction, on a conçu un modèle logiciel qui permet de calculer les statistiques de brouillage pouvant être causé par les liaisons TP&T d'un système HEO pris pour exemple à diverses liaisons montantes ou descendantes OSG. Ce système HEO, dénommé dans le jargon de l'UIT-R le N-SAT-HEO2, possède les caractéristiques essentielles suivantes:

- 3 satellites suivent la même trajectoire au sol, selon des plans inclinés à 45° par rapport à l'Equateur, et leurs nœuds ascendants sont espacés à des intervalles de 120° sur le plan équatorial;
- l'altitude de l'apogée est de 39 970 km, sa latitude est de 45° N et sa longitude, commune aux trois plans, est de 135° E;
- l'altitude du périégée est de 31 602 km, et l'excentricité de l'orbite est de 0,099, ce qui explique que chaque satellite est au-dessus de l'altitude géostationnaire pendant toute la durée de l'arc «actif» et seulement à 412 km environ sous l'altitude géostationnaire lorsqu'il coupe l'Equateur;
- suivant la direction nord-sud, la trajectoire au sol des satellites HEO coupe l'Equateur à $123,7^\circ$ E alors que dans la direction sud-nord, elle le coupe à $146,3^\circ$ E;
- pour les liaisons de service l'arc «actif» s'étend de 4 h avant l'apogée à 4 h après l'apogée (c'est-à-dire pour les latitudes du satellite supérieures à $26,5^\circ$ N);
- les porteuses de télémétrie, circulairement polarisées, sont au nombre 4, c'est-à-dire une par satellite plus une quatrième de secours, sur des fréquences séparées dans la bande SFS des 12 GHz, et chacune dans une largeur de bande de 605 kHz, bien que pour la majeure partie du temps, la plus grande partie de la puissance se situe à ± 20 kHz de la fréquence centrale de la porteuse; la largeur de bande totale des liaisons descendantes est donc d'environ 2,5 MHz; la p.i.r.e. du satellite par porteuse de télémétrie est de 7 dBW; le système est conçu de telle manière que chaque satellite peut transmettre en continu sa porteuse de télémétrie;
- il y a une seule porteuse de télécommande, circulairement polarisée, sur une fréquence distincte dans la bande SFS des 14 GHz pour chacun des trois satellites, dans une largeur de bande de 600 kHz, bien que là encore la plus grande partie de la puissance se situe normalement à ± 20 kHz de la fréquence centrale de la porteuse; la largeur de bande totale des liaisons montantes est donc d'environ 2 MHz; la p.i.r.e. par porteuse de télécommande en mode normal est de 50 dBW (80 dBW en mode d'urgence); le système est conçu de telle manière que chacune des trois porteuses de télécommande peut être émise à n'importe quel moment; pour la plus grande partie de chaque orbite la porteuse de télécommande à destination de chaque satellite est transmise (lorsque nécessaire) depuis une station terrienne TP&T située au Japon ($36,53^\circ$ N/ $140,39^\circ$ E) mais, comme le périégée n'est pas visible depuis cette station terrienne, une station terrienne TP&T en Australie ($33,9^\circ$ S/ $151,17^\circ$ E) est responsable de la transmission de télécommande à destination (et de la réception de télémétrie en provenance) de chaque satellite quand il se situe à ± 4 h du périégée;
- les stations terriennes TP&T disposent d'antennes de 10 m de diamètre, conçues pour satisfaire au diagramme d'antenne préconisé dans la Recommandation UIT-R S.580, et pour suivre le satellite auquel elles transmettent les signaux de télécommande; toutefois, comme la Recommandation UIT-R S.580 ne fournit le diagramme qu'à partir de 1° ou $100*(\lambda/D)$, quelle que soit la plus petite valeur (dans le cas qui nous occupe c'est $100*(\lambda/D)$), il faut utiliser le diagramme de lobe principal d'une Recommandation différente. Pour l'analyse

réalisée dans le cadre de notre exemple, nous avons utilisé le diagramme de la Recommandation UIT-R S.1428, modifié;

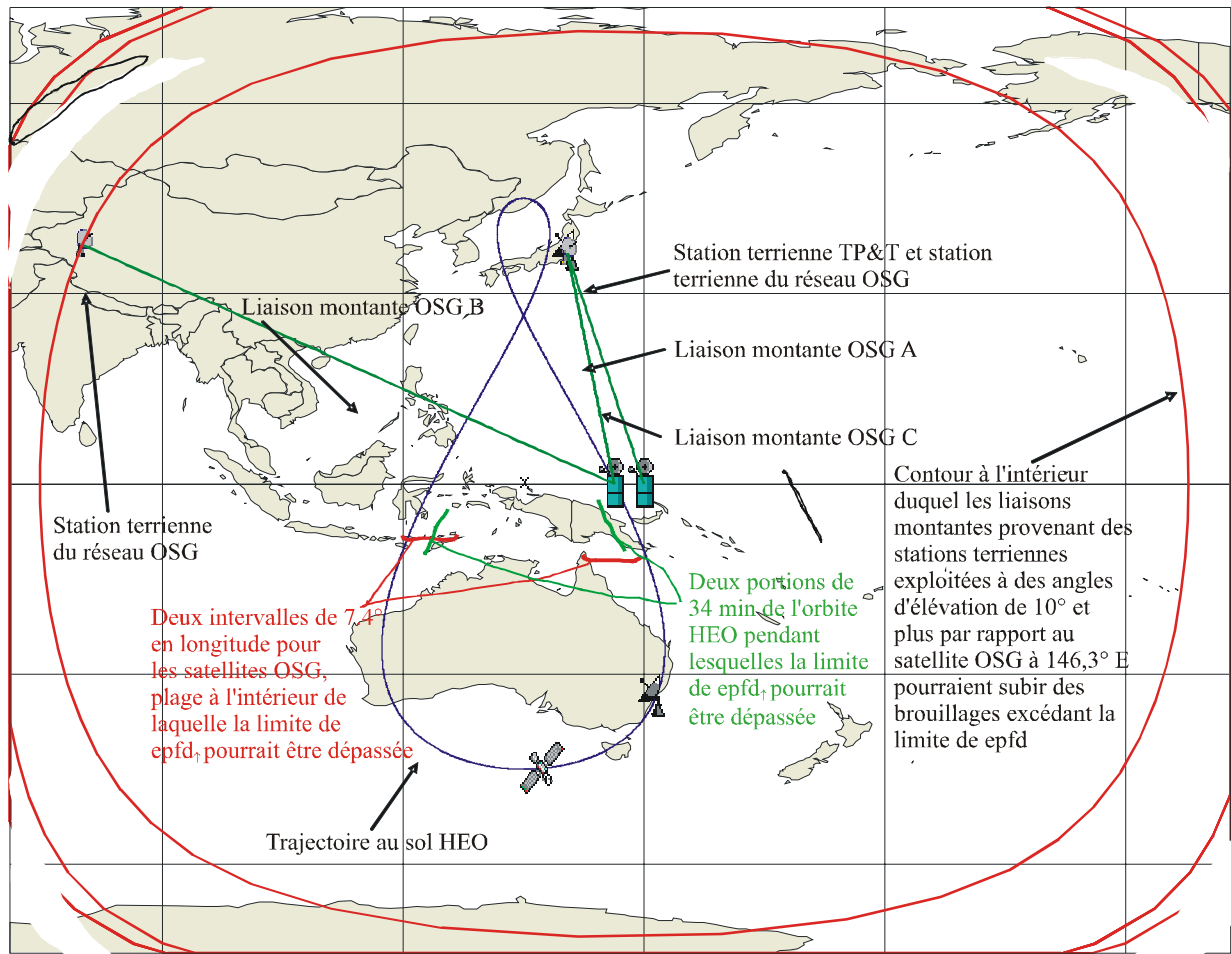
- sur chaque satellite le faisceau servant à la transmission de la porteuse de télémesure et à la réception de la porteuse de télécommande a un gain de crête de 16 dBi, qui correspond à une largeur de bande de demi-puissance d'environ 30°, et qui est modélisé suivant les dispositions de la Recommandation UIT-R S.672; l'antenne TP&T de chaque satellite est montée sur l'engin spatial et est dirigée vers la verticale du satellite sauf pendant l'arc actif lorsque l'orientation du satellite est maintenue de telle sorte que l'engin reste dirigé sur le Japon.

Le système est illustré dans les Fig. 1 et 3, où on constate que les trois satellites HEO suivent une seule et même trajectoire répétitive au sol et on voit les stations terriennes de TP&T situées au Japon et en Australie. La Fig. 1 illustre une porteuse de télécommande causant des brouillages à trois liaisons montantes OSG, la liaison A représentant le cas le moins favorable, les brouillages intervenant entre les réseaux principaux (brouillages causés par la station terrienne TP&T HEO au satellite OSG) au moment où le système HEO coupe l'Equateur; la liaison montante B représente une liaison émise par une station terrienne OSG, à un angle d'élévation de 10°, à destination d'un satellite constituant le cas le moins favorable en longitude; quant à la liaison montante C, elle représente une liaison émise à destination d'un satellite OSG juste assez éloignée par rapport à l'un des deux cas les moins favorables en longitude pour permettre de respecter la limite de $epfd_{\uparrow}$. On notera que pour les liaisons montantes A et C, la station terrienne OSG a la même position que la station terrienne de TP&T du système HEO. Pour les liaisons montantes A et B la longitude du système OSG est de 146,3° E, alors que pour la liaison montante C la station terrienne du système OSG se situe 3,7° plus à l'est, soit à 150,0° E.

La Fig. 3 illustre quant à elle une porteuse de télémesure causant des brouillages à trois liaisons descendantes OSG, à savoir les liaisons D, E et F, de nature similaire aux trois liaisons montantes. A la liaison descendante F correspondent un satellite OSG et une station terrienne sur l'Equateur, l'un et l'autre situés à la longitude de 121,4° E, calculée pour être juste assez éloignée (de 2,3°) par rapport à 123,7° E (soit l'une des deux longitudes les moins favorables) pour permettre de respecter la limite de $epfd_{\downarrow}$. Pour les liaisons descendantes D et E, la longitude du satellite OSG est de 123,7° E, tandis que la station terrienne OSG, pour la liaison descendante D, est située sur l'Equateur également, à la longitude de 123,7° E. La station terrienne OSG pour la liaison descendante E est située en un point où son angle d'élévation en direction de son satellite OSG est de 10°. On notera que les liaisons D et F ont chacune un angle d'élévation de 90 degrés.

FIGURE 1

Positions sur l'orbite OSG et emplacements des stations terriennes pour l'analyse de l'epfd des liaisons montantes

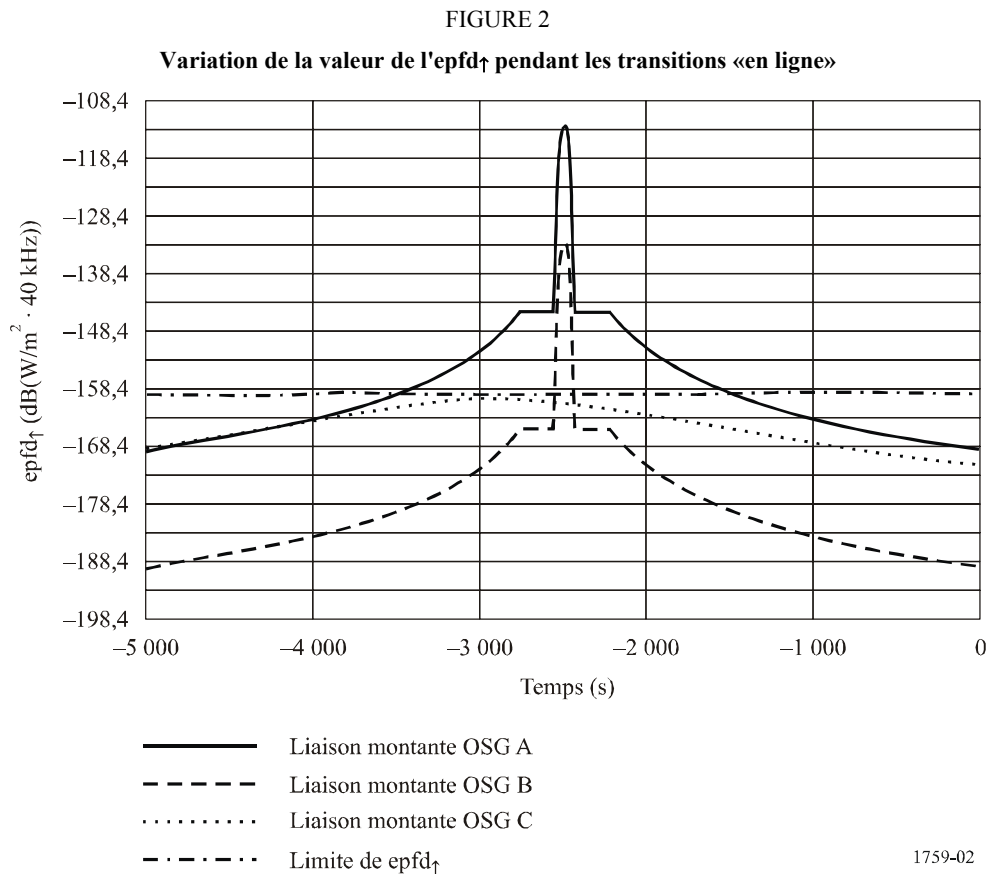


1759-01

Il n'est pas inutile d'observer que l'idée derrière le choix des trois liaisons OSG comme exemples pour chaque cas est de couvrir toutes les possibilités dans lesquelles les limites de epfd seraient excédées par les porteuses de TP&T du système HEO concerné, en l'absence de mesures pour éviter cette éventualité. Ainsi:

- la liaison A constitue le cas le moins favorable pour la liaison montante étant donné que le satellite OSG est situé sur une longitude à laquelle le système HEO coupera l'Equateur, ce qui fait que le satellite OSG se retrouvera à intervalles réguliers dans le faisceau principal de la station terrienne de TP&T du système HEO à gain élevé;
- de même, la liaison D constitue le cas le moins favorable pour la liaison descendante étant donné que le satellite HEO entrera à intervalles réguliers dans le lobe du faisceau principal de l'antenne de réception de la station terrienne OSG;
- les liaisons B et E mettent en jeu des satellites OSG dans des configurations de longitude les moins favorables en ce qui concerne les brouillages causés par le système HEO, mais la longueur de trajet des brouillages est maximale pour la liaison E et dans les deux liaisons les stations terriennes OSG sont exploitées à une élévation minimale; et
- les liaisons C et F mettent en jeu des satellites OSG qui sont juste assez éloignés en longitude des points d'intersection de l'Equateur par le système HEO pour permettre de respecter la limite de epfd correspondante sur le trajet de brouillage le plus court.

La Fig. 2 présente un diagramme des limites de $epfd_{\uparrow}$ dans le cas des liaisons montantes A, B et C au moment où un des satellites HEO traverse le plan équatorial, ce qui montre que la limite est fortement dépassée dans les deux premiers cas pour des durées limitées, et est tout juste respectée dans le cas de la liaison C. La Fig. 4 est une CDF des statistiques de $epfd_{\downarrow}$ pour les trois liaisons descendantes OSG sur une période d'orbite complète, et là encore on peut voir que la valeur limite est dépassée dans le cas des liaisons D et E, et juste respectée dans celui de la liaison F.



3 Conséquences des brouillages causés par les fonctions TP&T d'un système HEO pris comme exemple

Les conséquences en ce qui concerne la porteuse de télécommande sont illustrées à la Fig. 1 et quantifiées à la Fig. 2, et peuvent être résumées comme suit:

La limite de $epfd_{\uparrow}$ serait dépassée dans certaines sous-bandes de 40 kHz dans une largeur de bande totale d'environ 2 MHz. Seules les liaisons montantes à destination des satellites OSG à des longitudes se situant à l'intérieur de deux intervalles de $8,0^{\circ}$ seraient affectées, soit environ 14% des portions d'orbite disponibles dans la région. Dans ces cas, les limites seraient dépassées pendant deux périodes pouvant atteindre 37,7 min par période d'orbite, soit un maximum de 5,25% du temps. Dans les cas les moins favorables, la limite serait dépassée de plusieurs dizaines de dB pour des durées de plusieurs dizaines de minutes, et bien que la proportion des stations terriennes dont seraient affectées les liaisons montantes serait limitée, ces stations terriennes pourraient se situer en n'importe quel lieu géographique de la région.

Les conséquences pour la porteuse de télémesure sont illustrées à la Fig. 3 et quantifiées à la Fig. 4 ainsi qu'à l'Appendice 1 à l'Annexe 1 (voir la Fig. 5 et le Tableau 1), et peuvent être résumées comme suit:

Les gabarits des limites de $epfd_{\downarrow}$ seraient excédés dans certaines sous-bandes de 40 kHz à l'intérieur d'une largeur de bande totale d'environ 2,6 MHz. Seules les liaisons descendantes provenant des satellites OSG à des longitudes à l'intérieur de deux intervalles de $4,6^{\circ}$ seraient affectées, soit environ 9% des portions d'orbite disponibles. Dans ces cas, le gabarit des limites de $epfd_{\downarrow}$ pour des antennes de 1,2 m serait seulement dépassé pendant deux durées pouvant atteindre 16,5 min par période d'orbite, soit un maximum de 2,3% du temps. Dans les cas les moins favorables le niveau maximum de $epfd_{\downarrow}$ dans le gabarit des limites (c'est-à-dire le côté court terme) serait dépassé de plusieurs dB, et la partie moyen terme du gabarit serait dépassée de 10-20 dB. Bien que la proportion des stations terriennes dont seraient affectées les liaisons descendantes serait limitée, ces stations terriennes pourraient se situer en n'importe quel lieu géographique de la région.

FIGURE 3
Positions sur l'orbite OSG et emplacements des stations terriennes
pour l'analyse de l' $epfd$ des liaisons descendantes

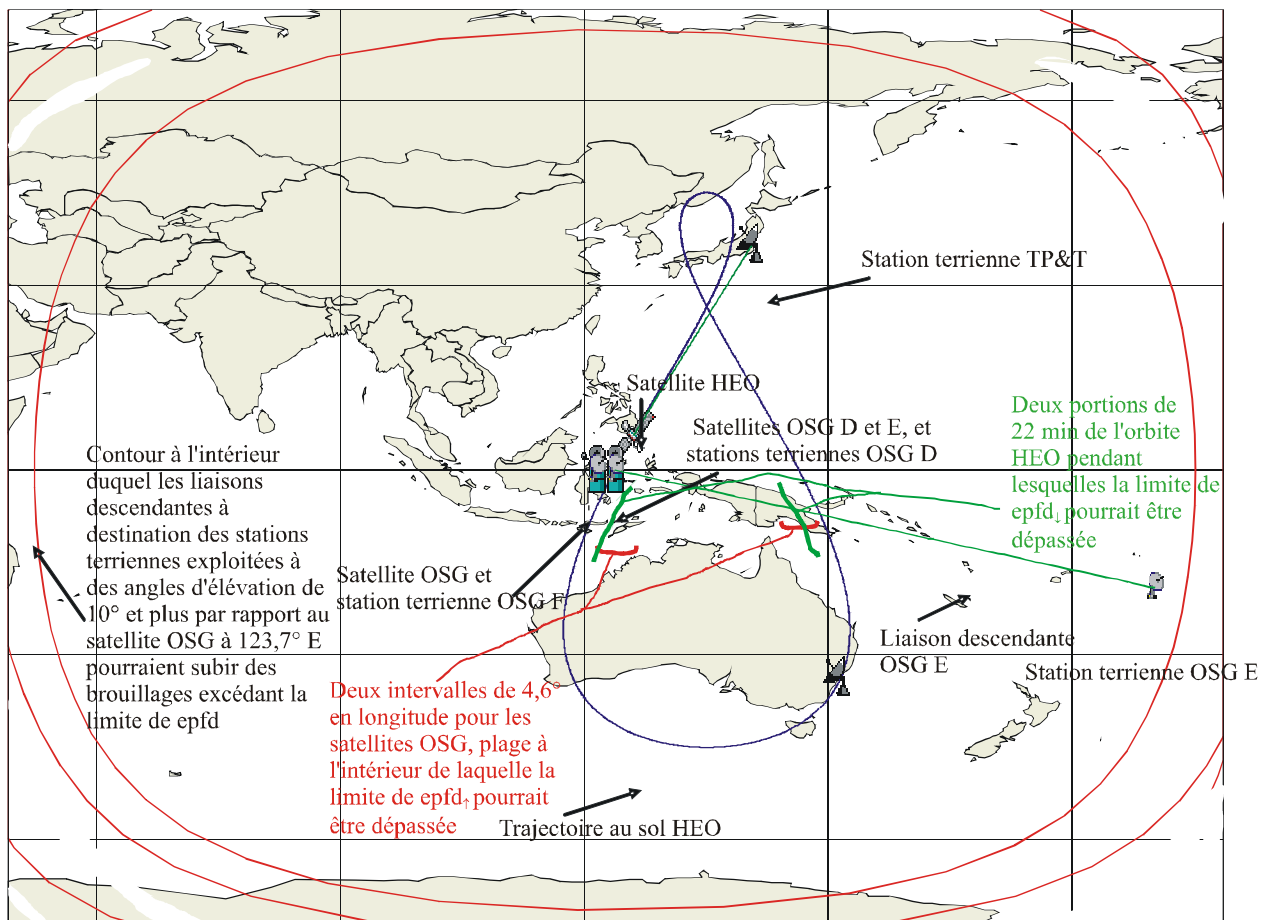
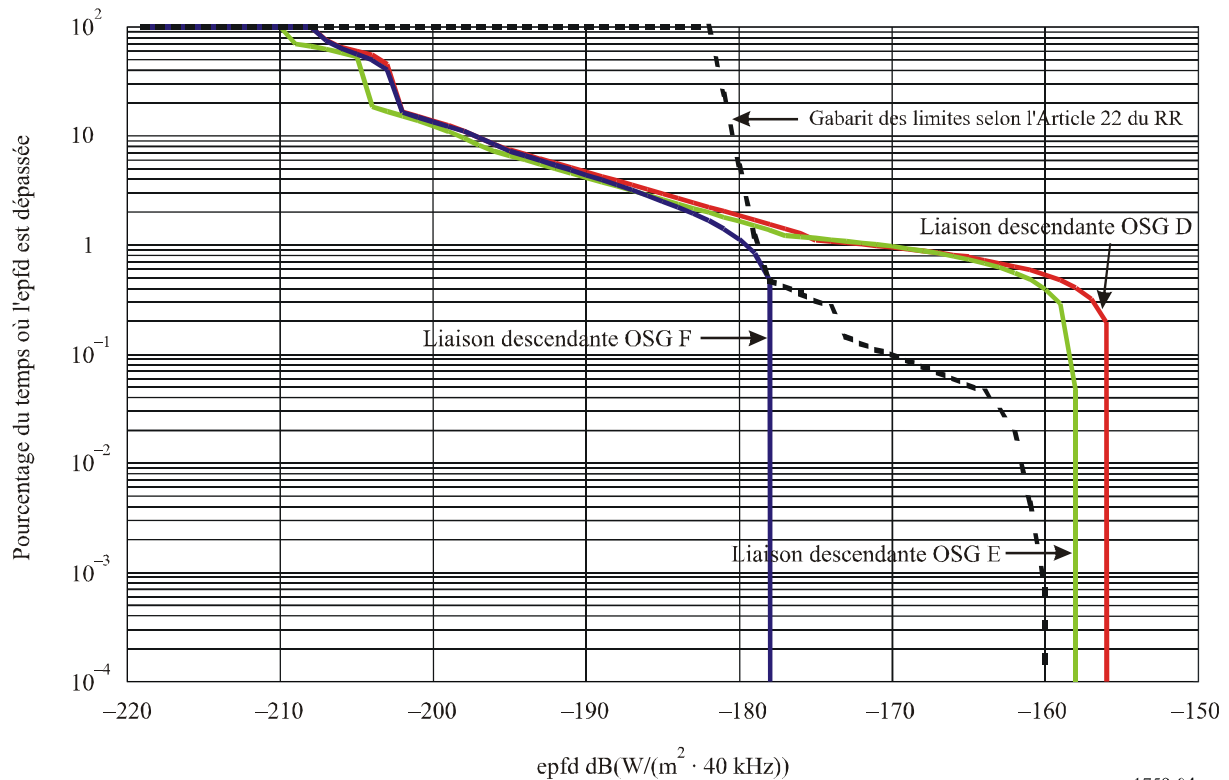


FIGURE 4
 Statistiques de la valeur de l'epfd_↓ cumulée pour des liaisons OSG choisies
 avec des antennes de 1,2 m



1759-04

4 Techniques d'atténuation des brouillages potentiels

Les deux sections ci-dessous exposent les techniques qui ont été déterminées comme permettant d'atténuer partiellement ou totalement les brouillages pouvant être causés aux réseaux OSG par la transmission des liaisons montantes et descendantes TP&T du système HEO. Pour chaque technique étudiée, les caractéristiques suivantes ont été retenues:

- comment chaque technique pourrait être potentiellement appliquée;
- les avantages potentiels de chaque technique pour les opérateurs de systèmes HEO; et
- les problèmes et inconvénients potentiels liés à l'application de chaque technique pour les opérateurs de systèmes HEO.

Pendant la conception d'un système TP&T HEO, les opérateurs pourraient choisir d'appliquer une ou plusieurs des techniques d'atténuation des brouillages identifiées, en tenant compte des avantages et des inconvénients de chacune, et en particulier de la volonté des concepteurs de conserver la fiabilité et de réduire l'incidence sur les coûts.

4.1 Possibilités concernant les liaisons montantes

4.1.1 Jouer sur les signaux de télécommande: on éviterait les brouillages s'il était possible de transmettre aux satellites HEO les signaux de télécommande ne présentant aucune urgence aux moments de la journée situés en dehors des périodes critiques (voir la Fig. 1). Si pendant une période critique une fonction devait être assurée à bord d'un satellite, on pourrait envisager de pouvoir envoyer la commande avant même la période critique et donc d'associer le délai nécessaire à son exécution.

4.1.1.1 Mise en œuvre

- Les systèmes de TP&T actuels comportent en principe une fonction logicielle pour piloter le temps d'exécution des télécommandes des liaisons montantes afin de laisser une certaine souplesse aux opérations des satellites. La technique d'atténuation du brouillage ci-dessus pourrait donc facilement être mise en œuvre moyennant l'utilisation appropriée de cette fonction.
- On pourrait transmettre aux satellites certaines commandes, qui seraient à activer pendant une période critique, avant même cette période critique, et les stocker dans le satellite pour les activer le moment venu.

4.1.1.2 Avantages

- Etant donné que la technique d'atténuation des brouillages ci-dessus met en œuvre une fonction qui fait partie des possibilités dont sont pourvus les équipements de TP&T modernes, il n'est pas besoin de prévoir d'équipement ou de fonction logicielle supplémentaire au niveau des satellites HEO et de leurs stations terriennes de TP&T.
- En soi, cette technique constitue un moyen simple de faire en sorte que les liaisons de télécommande HEO soient pleinement conformes aux limites de $epfd_{\uparrow}$ visées à l'Article 22 del RR.

4.1.1.3 Inconvénients

- La période critique comprend le nœud ascendant et le nœud descendant de l'orbite HEO, nœuds qui constituent les positions orbitales optimales pour les manœuvres de positionnement. Pour ces manœuvres, il faut en général une séquence interactive, en temps réel, de télécommandes montantes et de données descendantes en provenance du satellite en matière de télémétrie et de renseignements de situation. Avant d'activer les propulseurs du satellite, il faut en général vérifier en temps réel les données de télémétrie à la station terrienne de TP&T. En conséquence, les manœuvres devraient être exécutées lorsque le satellite se situe à plusieurs degrés d'orbite à l'extérieur de la position optimale. Cette contrainte opérationnelle suppose une consommation de carburant supplémentaire, qui viendrait ajouter à la masse des satellites HEO.

4.1.2 Étalement de spectre pour les télécommandes: dans le principe, il serait possible de réduire le niveau de $epfd_{\uparrow}$ montante en ajoutant une modulation par étalement de spectre aux porteuses de télécommande des systèmes HEO. Pour réduire l' $epfd_{\uparrow}$ maximale indiquée dans la Fig. 2 jusqu'au niveau de la limite réglementaire, il faudrait disposer d'environ 45 dB de marge.

4.1.2.1 Mise en œuvre

Cette technique d'atténuation des brouillages pourrait être mise en œuvre par l'adjonction d'un modulateur à étalement du spectre au niveau des stations terriennes de TP&T et d'un démodulateur SS au niveau de chaque satellite HEO.

- Pour être efficace, il faut que la technique par modulation SS soit utilisée uniquement à l'extérieur de l'arc actif pour ne pas interférer avec les liaisons de service du système HEO. Il serait même judicieux d'en limiter l'utilisation uniquement pendant les périodes critiques. Lorsque le satellite HEO quitterait l'arc actif (ou s'approcherait d'une période critique) sur son orbite, une station terrienne de TP&T lui enverrait des commandes pour activer la fonction de démodulation à étalement du spectre; inversement, lorsque le satellite s'approcherait de l'arc actif (ou sortirait d'une période critique), la station lui enverrait des commandes pour repasser à la modulation classique. Par ce mode de basculement, de transfert, la largeur de bande de la modulation SS ne devrait être étendue à l'intérieur de la bande utilisée pour les liaisons de service que lorsque le satellite se trouverait à l'extérieur

de l'arc actif. Cette extension de la bande de modulation à étalement de spectre permettrait de réduire l'epfd \uparrow . Dans le cas de notre exemple de système HEO, on pourrait obtenir une réduction de l'epfd \uparrow de 32 dB en utilisant une largeur de bande de 60 MHz par porteuse de télécommande. Si la mise en œuvre de cette technique ne suffit pas pour respecter les limites de epfd \uparrow visées à l'Article 22 du RR, il faudrait recourir à d'autres techniques d'atténuation des brouillages.

4.1.2.2 Avantages

- Grâce à la technique d'extension de la bande de modulation à étalement de spectre ci-dessus, la largeur de bande destinée aux liaisons montantes de service, qui normalement n'est pas utilisée à l'extérieur de l'arc actif, serait mise à profit pour réduire l'epfd \uparrow .

4.1.2.3 Inconvénients

- L'emploi de la modulation à étalement de spectre pour les fonctions de TP&T n'est certes pas une technique nouvelle, mais ce n'est aujourd'hui pas courant. Sa mise en œuvre exigerait donc la mise au point de nouveaux équipements de modulation à étalement de spectre pour les satellites HEO ainsi que pour les stations terriennes de TP&T.

4.1.3 Diversité par les stations terriennes: en principe, on pourrait réduire les niveaux de crête de epfd \uparrow en jouant sur la diversité des stations terriennes de TP&T. Toutefois, on a constaté avec notre exemple de système HEO que, s'il serait possible moyennant une bonne synchronisation du basculement entre les deux stations terriennes de TP&T distantes l'une de l'autre de plus de 8 000 km, de réduire le niveau maximum de epfd \uparrow d'environ 15 dB, la limite réglementaire serait toujours dépassée d'un nombre de dB important.

4.1.3.1 Mise en œuvre

- Pour utiliser cette technique d'atténuation du brouillage, il faudrait positionner les stations terriennes de TP&T en des endroits suffisamment distants les uns des autres. Pour conserver un angle de séparation suffisant par rapport aux réseaux OSG, le basculement entre stations serait effectué en fonction de la position des satellites.

4.1.3.2 Avantages

- Cette méthode permettrait de réduire le niveau maximum de epfd \uparrow et, si elle était associée avec d'autres techniques d'atténuation, elle pourrait permettre à un système HEO de se conformer aux limites réglementaires de epfd \uparrow .

4.1.3.3 Inconvénients

- Bien qu'elle soit efficace pour les systèmes à satellite LEO, qui grâce à leur géométrie peuvent facilement maintenir un angle de séparation suffisant par rapport aux réseaux OSG, la géométrie des systèmes HEO ne permet pas en général d'obtenir une séparation angulaire suffisante par rapport aux OSG pendant les périodes auxquelles les porteuses de télécommande excéderaient la limite de epfd \uparrow . Cette méthode présente donc une efficacité limitée pour les systèmes HEO.
- Il faudrait au moins une station terrienne de TP&T supplémentaire pourvue d'une large séparation géographique (permettant d'établir une liaison de télécommunication de Terre fiable), mais tous les systèmes HEO ne disposent pas de cette possibilité.

4.1.4 Antenne de réception de télécommande à gain élevé: Dans notre exemple de système HEO, les porteuses de télécommande seraient reçues via un large faisceau de satellite (gain de crête de 16 dBi). Si les liaisons de service montantes d'un pareil système étaient reçues via un faisceau à gain plus élevé (par exemple avec un gain de crête de 30 dBi), il serait possible

d'envisager de transférer la réception des signaux de télécommande à ce faisceau, ce qui permettrait de réduire la p.i.r.e. de la station terrienne de TP&T (par exemple de 14 dBi), d'où une réduction du même ordre du niveau maximum de $epfd_{\uparrow}$. Toutefois, cette technique exige de bien maîtriser le faisceau à gain élevé même à l'extérieur de l'arc actif, ce qui risque de compliquer la conception du satellite.

4.1.4.1 Mise en œuvre

- Cette technique pourrait être appliquée si on dotait les satellites HEO d'une ou de plusieurs antennes de réception de TP&T à faisceau orientable et à gain élevé. Ces antennes embarquées permettraient de rester calé en permanence sur les stations terriennes de TP&T. Les satellites HEO auraient une capacité de transfert des stations de TP&T utilisant une fonction adéquate.

4.1.4.2 Avantages

- Les stations terriennes de TP&T ne devraient pas être pourvues d'équipements supplémentaires. Parallèlement, il serait possible d'en réduire le gain nécessaire.

4.1.4.3 Inconvénients

- L'antenne de réception de TP&T du satellite devrait être une antenne à large ouverture, dotée d'une fonction de poursuite de haute précision capable de couvrir un grand angle d'orientation.

4.1.5 Utilisation de bandes SES pour la télécommande: Si pour la transmission des signaux de TP&T du système HEO mentionné ci-dessus on utilisait les bandes de fréquences attribuées au SES au lieu des bandes de fréquences précédemment évoquées, le problème de non-conformité avec l'Article 22 du RR disparaîtrait. Cette solution permettrait de résoudre le problème concernant les limites de $epfd$ visées à l'Article 22 du RR, étant donné qu'elles ne s'appliquent pas dans les bandes SES, mais il n'en demeurerait pas moins un problème de brouillage physique dans la bande SES.

4.1.5.1 Mise en œuvre

- On pourrait mettre en œuvre cette technique d'atténuation des brouillages en installant un équipement RF indépendant (antenne, HPA/SSPA, LNA, convertisseur, etc.) pour le système TP&T (sur les satellites et les stations terriennes) utilisant une bande de fréquences différente de celle des liaisons de service.

4.1.5.2 Avantages

- Les fonctions de TP&T du système HEO ne seraient pas assujetties aux limites de $epfd$ visées à l'Article 22 du RR.
- Etant donné que les bandes SES relèvent de la bande S ou des bandes de fréquences inférieures, il serait aisé de maintenir une marge suffisante pour les liaisons de TP&T.

4.1.5.3 Inconvénients

- Etant donné que chaque largeur de bande attribuée pour le SES est plus étroite que les bandes assujetties aux limites de $epfd$, l'utilisation en partage de ces bandes de fréquences avec d'autres systèmes pourrait être difficile.
- Les fonctions TP&T au niveau des satellites et des stations terriennes ne pourraient pas utiliser en partage l'équipement RF employé pour les liaisons de service.

4.1.6 Choix de la fréquence de télécommande: Etant donné que les liaisons montantes de TP&T pour chaque système à satellite n'occupe que quelques MHz de largeur de bande, le problème serait réduit en ampleur si les porteuses de télécommande de tous les systèmes non OSG pouvaient être limitées à la même gamme de fréquences de quelques MHz.

4.1.6.1 Mise œuvre

- Dans la mesure du possible, les fréquences de télécommande choisies devraient se trouver à l'extérieur des largeurs de bande des répéteurs et des largeurs de bande TP&T des satellites OSG à proximité des longitudes auxquelles le système HEO coupe l'Equateur.

4.1.6.2 Avantages

- Pour ce qui est des systèmes OSG existants, lorsque le système HEO est notifié, cette option est toute simple.

4.1.6.3 Inconvénients

- Comme les systèmes HEO sont des systèmes non OSG, les dispositions actuelles du RR ne permettent pas par cette méthode de résoudre le problème dans les bandes où les limites de f_{up} visées à l'Article 22 du RR s'appliquent. Dans ces bandes, la méthode en question ne pourrait donc que limiter l'ampleur du problème.
- Les informations contenues dans la Circulaire IFIC risquent de ne pas être complètes à propos des fréquences de télécommande utilisées par les réseaux OSG pouvant être affectés.

4.1.7 Liaisons intersatellites: Si des liaisons intersatellites étaient mises en œuvre entre les satellites d'un système HEO, ou entre ces satellites et un système à satellites de relais de données, les télécommandes pourraient alors être transmises à un satellite HEO se trouvant à l'intérieur de l'arc actif ou à proximité, ou à un satellite de relais de données, puis relayées à destination d'autres satellites via les liaisons intersatellites.

4.1.7.1 Mise en œuvre

- Cette technique pourrait être mise en œuvre moyennant l'installation sur chaque satellite HEO d'équipements pour les liaisons TP&T intersatellites.

4.1.7.2 Avantages

- A partir des stations terriennes de TP&T primaires, il serait possible à tout moment de commander tous les satellites sans aucun risque de brouillage sur les liaisons montantes à destination des réseaux OSG.
- L'incidence pour les stations terriennes de TP&T serait minime et il ne serait pas nécessaire de disposer de stations terriennes de TP&T distantes.

4.1.7.3 Inconvénients

- Les satellites seraient surchargés d'équipements supplémentaires pour la liaison intersatellites, ainsi que d'une antenne de liaison intersatellites pour les commandes d'acquisition et de poursuite.
- Les satellites devraient être pourvus d'un équipement de TP&T de secours en cas d'interruption d'une liaison intersatellites.
- Cette technique risque de poser de nouveaux problèmes de conception étant donné que le système HEO devrait éviter que des brouillages puissent être causés aux réseaux OSG étant donné la géométrie des liaisons intersatellites du système HEO.

4.2 Possibilités concernant les liaisons descendantes

4.2.1 Jouer sur les signaux de télémétrie: le problème serait résolu s'il était possible d'arrêter l'émission des porteuses de télémétrie provenant de chaque satellite HEO pendant les périodes critiques (par exemple, durant deux périodes de 22 min par jour, comme indiqué dans la Fig. 3). Si cette technique était utilisée, alors en cas de panne dans le satellite pendant une des périodes

critiques, le personnel de la station terrienne de TP&T ne serait pas conscient du problème jusqu'au moment où l'émission de la porteuse de télémétrie reprendrait.

Dans l'Appendice 1 à l'Annexe 1 on propose une méthode itérative susceptible d'être utilisée pour déterminer la durée minimale d'arrêt de la télémétrie HEO, c'est-à-dire les moments et positions orbitales précis où la porteuse de télémétrie d'un satellite HEO donné est arrêtée (puis réenclenchée) aux fins de conformité avec la limite de $epfd_{\downarrow}$ correspondante.

4.2.1.1 Mise en œuvre

- Les systèmes de TP&T actuels sont normalement pourvus d'une fonction logicielle permettant de réguler les émissions de télémétrie descendante pour assurer une certaine flexibilité aux opérations du satellite. La technique d'atténuation des brouillages ci-dessus pourrait donc être facilement mise en œuvre moyennant l'utilisation appropriée de cette fonction logicielle pour ordonner aux satellites d'arrêter les émissions de télémétrie pendant la période critique et de les reprendre immédiatement après.
- Pendant les périodes critiques, la position et l'attitude du satellite seront estimées aux stations terriennes de TP&T au moyen d'algorithmes de prévision orbitale.

4.2.1.2 Avantages

- Avec cette technique, il n'est pas nécessaire de doter d'équipements supplémentaires les satellites HEO ou les stations terriennes de TP&T.
- En soi, cette technique constitue un moyen simple permettant aux liaisons de télémétrie HEO d'être pleinement conformes aux limites de $epfd_{\downarrow}$ visées à l'Article 22 du RR.

4.2.1.3 Inconvénients

- Les données de télémétrie ne seraient pas à la disposition des stations terriennes de TP&T pendant les périodes auxquelles le gabarit de $epfd_{\downarrow}$ serait autrement dépassé. Or, ces périodes comprennent le nœud ascendant et le nœud descendant de l'orbite HEO, nœuds qui constituent les positions orbitales optimales pour les manœuvres de positionnement. Ces manœuvres exigent en général une séquence interactive en temps réel de télécommandes montantes ainsi que de données de télémétrie du satellite descendantes et de renseignements de situation. Avant d'activer les propulseurs du satellite, il faut en général vérifier en temps réel les données de télémétrie à la station terrienne de TP&T. Les manœuvres de positionnement devraient donc être exécutées lorsque le satellite se situe à plusieurs degrés d'orbite à l'extérieur de la position optimale. Cette contrainte opérationnelle supposerait une consommation de carburant supplémentaire, qui viendrait ajouter à la masse des satellites HEO.
- Si pendant une période d'arrêt une panne devait affecter le système de commande d'attitude du satellite HEO ou si tout autre problème devait avoir une incidence sur l'orbite du satellite, l'opérateur du satellite ne recevrait pas de données fiables concernant le problème pendant un certain temps en raison de l'arrêt des émissions de télémétrie, ce qui pourrait l'empêcher de prendre des mesures de correction.
- Régler les émissions de télémétrie conduit à une importante diminution de la disponibilité opérationnelle. Selon les dispositions de la Recommandation UIT-R S.1716, la disponibilité type pour des liaisons descendantes de télémétrie dans la bande 14/12 GHz est de l'ordre de 99,99%, soit une indisponibilité de 0,01%. Dans le cas du système HEO pris comme exemple, l'indisponibilité provoquée par le réglage des émissions de télémétrie est de 3,1% ($(22 \text{ min} \times 2) / 24 \text{ h} \times 100$), en plus de l'indisponibilité résultant de l'affaiblissement dû à la pluie, etc., ce qui est plus de 300 fois supérieur à la valeur type recommandée dans la Recommandation UIT-R S.1716.

4.2.2 Étalement de spectre pour la télémesure: en principe, il serait possible de réduire les statistiques de epfd_{\downarrow} en dotant les porteuses de télémesure des systèmes HEO d'une modulation par étalement de spectre. Comme l'indiquent les résultats de notre exemple de la Fig. 4, il faudrait un étalement d'environ 20 dB pour se conformer complètement au gabarit des limites correspondant au cas le plus défavorable, d'où une largeur de bande d'environ 4 MHz par porteuse de télémesure. Une autre possibilité consisterait à ajouter un étalement juste à l'intérieur de la largeur de bande de la porteuse assignée, soit dans notre exemple, 605 kHz, ce qui donnerait un étalement d'environ 12 dB.

4.2.2.1 Mise en œuvre

- Cette technique d'atténuation des brouillages pourrait être mise en œuvre en dotant les stations terriennes de TP&T d'un démodulateur par étalement de spectre et chaque satellite HEO d'un modulateur par étalement de spectre.
- Pour être efficace, il faudrait que la modulation par étalement de spectre ne soit utilisée que pendant les périodes auxquelles les niveaux de epfd_{\downarrow} seraient autrement critiques. Lorsque le satellite HEO s'approcherait d'une période critique sur son orbite, une station terrienne TP&T lui commanderait de basculer en modulation par étalement de spectre, et lorsqu'il sortirait de la période critique, elle lui commanderait alors de revenir à la modulation classique. Grâce à ce basculement, la largeur de bande de la modulation par étalement de spectre devrait uniquement être étendue à l'intérieur de la bande utilisée pour les liaisons de service pendant les périodes où le satellite est à l'extérieur de l'arc actif. Cette extension de la bande par étalement de spectre permet de réduire la valeur de epfd_{\downarrow} . Dans le cas de notre système HEO, on pourrait réduire de 20 dB l' epfd_{\downarrow} à l'aide d'une largeur de bande de 4 MHz.

4.2.2.2 Avantages

- Avec la technique d'extension de la bande par étalement de spectre, la largeur de bande destinée aux liaisons de service descendantes, qui normalement n'est pas utilisée à l'extérieur de l'arc actif, serait effectivement employée, et la technique offre la possibilité de se conformer aux limites de epfd_{\downarrow} sans aucune autre atténuation.

4.2.2.3 Inconvénients

- Utiliser la technique de modulation par étalement de spectre pour les fonctions de TP&T n'est certes pas nouveau, mais actuellement ce n'est pas très courant. Il faudrait donc pour la mettre en œuvre développer de nouveaux équipements par étalement de spectre pour les satellites HEO et pour les stations terriennes de TP&T.

4.2.3 Antennes d'émission de télémesure à gain élevé: Dans notre exemple de système HEO, chaque porteuse de télémesure émettrait via un faisceau de satellite large (30° de largeur de bande). Si les liaisons de service descendantes de pareils systèmes étaient transmises via un faisceau à gain plus élevé (par exemple 6° de largeur de bande), il faudrait envisager la possibilité de transférer les signaux de télémesure sur ce faisceau, confinant ainsi les excès de la limite de epfd_{\downarrow} à une zone géographique moindre. Dans le cas de notre système, la seule possibilité serait que les deux stations terriennes de TP&T soient couvertes par le ou les faisceaux à gain plus élevé, mais il faudrait alors pouvoir piloter les faisceaux même à l'extérieur de l'arc actif, ce qui risque de compliquer la conception technique des satellites.

4.2.3.1 Mise en œuvre

- Cette technique pourrait être mise en œuvre par l'installation sur chaque satellite HEO d'une antenne d'émission à faisceau orientable et à gain élevé. Ce type d'antenne embarquée serait utilisé pour les émissions des liaisons de service descendantes pendant la portion de l'arc actif de l'orbite HEO; il serait employé pour les émissions des liaisons de télémesure

descendantes pendant les périodes critiques durant lesquelles ces antennes resteraient constamment pointées sur les stations terriennes de TP&T.

4.2.3.2 Avantages

- Tout excès par rapport à la limite de $epfd_{\downarrow}$ de TP&T serait confiné à une zone géographique moindre, ce qui réduirait le nombre de stations terriennes OSG pouvant être affectées.
- Les stations terriennes de TP&T n'auraient besoin d'être pourvues d'aucun équipement supplémentaire.
- La puissance d'émission du satellite serait réduite du fait du gain plus élevé de l'antenne d'émission, ce qui permettrait de réduire la consommation électrique du satellite.

4.2.3.3 Inconvénients

- L'antenne d'émission à gain élevé du satellite devrait être une antenne à large ouverture avec une fonction de poursuite de grande précision capable de couvrir un angle d'orientation assez large.
- Même si la conception des satellites HEO comporte déjà un faisceau à gain élevé pour les liaisons de service descendantes, cette technique demande de piloter le faisceau à gain élevé même à l'extérieur de l'arc actif, ce qui risque de compliquer la conception technique des satellites.

4.2.4 Utilisation de bandes SES pour la télémesure: Si les fonctions de TP&T du système HEO mentionné ci-dessus venaient à utiliser les bandes de fréquences allouées aux SES au lieu des bandes de fréquences visées précédemment, le problème de la non-conformité avec les dispositions de l'Article 22 du RR disparaîtrait, puisqu'elles ne s'appliquent pas dans les bandes SES, mais il n'en demeurerait pas moins un problème de brouillage physique dans la bande SES.

4.2.4.1 Mise en œuvre

- Cette technique pourrait être mise en œuvre en installant un équipement RF indépendant (antenne, HPA/SSPA, LNA, convertisseur, etc..) pour le système de télémesure (sur les satellites et sur les stations terriennes) en utilisant une bande de fréquences différente de celle des liaisons de service.

4.2.4.2 Avantages

- La transmission des liaisons descendantes de TP&T du système HEO ne serait pas assujettie aux limites de $epfd$ visées à l'Article 22 du RR.
- Etant donné que les bandes SES sont attribuées dans la bande S ou dans des bandes de fréquences inférieures, il serait plus facile de maintenir une marge suffisante pour les liaisons de TP&T.

4.2.4.3 Inconvénients

- Comme chaque largeur de bande attribuée pour le SES est moins importante que les bandes assujetties aux limites de $epfd$, l'utilisation en partage de ces bandes de fréquences avec d'autres systèmes risque d'être difficile.
- Les fonctions de TP&T du satellite et de la station terrienne ne pourraient pas utiliser en partage l'équipement RF employé pour les liaisons de service.

4.2.5 Choix de fréquences pour la télémesure: Etant donné que les liaisons descendantes de TP&T pour chaque système à satellite n'occupent que quelques MHz de largeur de bande, le problème serait réduit en ampleur si les porteuses de télémesure de tous les systèmes non OSG pouvaient être confinées à la même gamme de fréquences de quelques MHz.

4.2.5.1 Mise en œuvre

- Dans la mesure du possible, les fréquences de télémétrie choisies devraient se situer à l'extérieur des largeurs de bande des répéteurs et des largeurs de bande de fréquences de TP&T des satellites OSG à proximité des longitudes à laquelle le système HEO coupe l'Équateur.

4.2.5.2 Avantages

- En ce qui concerne les systèmes OSG existants au moment où le système HEO est notifié, cette option est fort simple.

4.2.5.3 Inconvénients

- Étant donné que les systèmes HEO sont des systèmes non OSG, des dispositions actuelles du RR ne permettent pas par cette méthode de résoudre le problème dans les bandes où s'appliquent les limites de $e_{fd\downarrow}$ visées à l'Article 22 du RR. Dans ces bandes la méthode pourrait donc uniquement limiter l'ampleur du problème. Les dispositions actuelles du RR ne permettent pas aux liaisons descendantes de TPC d'un système HEO d'excéder les limites de $e_{fd\downarrow}$ visées à l'Article 22 du RR, avec la possible exception visée au numéro 22.5CA: «**22.5CA 2**). *Les limites indiquées au Tableau 22-1A à 22-1E peuvent être déplacées sur les territoires de tout pays dont l'administration a donné son accord (voir aussi la Résolution 140 (CMR-03))*». Toutefois, comme la liaison descendante de TP&T de notre système HEO utilise un faisceau mondial, le nombre total de pays dont l'accord est exigé pourrait être très élevé.
- Les informations contenues dans la Circulaire IFIC risquent de ne pas être complètes en ce qui concerne les fréquences de télémétrie utilisées par les réseaux OSG pouvant être affectés.

4.2.6 Liaisons intersatellites: Si des liaisons intersatellites étaient mises en œuvre entre les satellites d'un système HEO, ou entre ces satellites et un système à satellite de relais de données, les signaux de télémétrie pourraient alors être émis via une liaison intersatellites à destination d'un satellite HEO se trouvant à l'intérieur ou à proximité de l'arc actif, ou à destination d'un satellite de relais de données, puis ensuite être acheminés sur terre.

4.2.6.1 Mise en œuvre

- Cette technique pourrait être mise en œuvre en installant sur chaque satellite un équipement supplémentaire pour les liaisons de TP&T intersatellites.

4.2.6.2 Avantages

- Les données de télémétrie pourraient être transmises en permanence depuis tous les satellites à destination des stations terriennes de TPC primaires sans aucun risque de brouillage sur les liaisons descendantes desservant les réseaux OSG.
- L'incidence pour les stations terriennes de TPC serait minime et il ne serait pas nécessaire de disposer de stations terriennes de TPC distantes.

4.2.6.3 Inconvénients

- Les satellites seraient surchargés par les équipements supplémentaires nécessaires aux liaisons intersatellites ainsi qu'aux fonctions d'acquisition et de poursuite d'une antenne de liaisons intersatellites.
- Au cas où il y aurait une panne de la liaison intersatellites, il faudrait que les satellites disposent d'une fonction de TPC de secours.

- Cette technique risque de poser de nouveaux problèmes de conception étant donné que le système HEO devrait éviter de pouvoir créer des brouillages aux réseaux OSG dus à la géométrie de sa liaison intersatellites.

Le numéro 22.5CA du RR, adopté par la CMR-2000 et modifié par la CMR-03, stipule que: «Les limites (epfd_↓) indiquées aux Tableaux 22-1A à 22-1E peuvent être dépassées sur le territoire de tout pays dont l'administration a donné son accord». Ainsi, un préalable à toute solution au problème des liaisons descendantes est la conclusion d'un accord entre une administration désireuse d'exploiter des porteuses de télémesure depuis des satellites HEO dans une bande du SFS soumise aux limites de epfd_↓ et l'administration de chacun des pays illuminés par le faisceau via lequel les porteuses de télémesure peuvent être transmises. Toutefois, cette procédure pourrait être longue (pour permettre aux administrations intéressées de trouver un accord), de sorte qu'il serait préférable d'envisager d'abord les possibilités évoquées précédemment.

Dans le cadre de toutes réunions bilatérales répondant aux dispositions du numéro 22.5CA du RR, les possibilités ci-dessus pourraient être prises en compte à la discrétion des parties intéressées.

5 Conclusion

Les sections ci-dessus montrent qu'il existe sans doute plusieurs possibilités pour résoudre les problèmes liés à l'exploitation de liaisons de TPC pour des systèmes HEO opérant dans des bandes dans lesquelles s'appliquent les limites de epfd visées à l'Article 22 du RR, tout en garantissant une protection appropriée aux systèmes OSG exploités dans ces bandes. Il convient d'observer que les techniques en question revêtraient également une certaine utilité pour d'autres bandes du SFS utilisées en partage entre des réseaux non OSG et des réseaux OSG. Un complément d'étude sera nécessaire pour déterminer laquelle de ces techniques d'atténuation des brouillages potentiels sera la mieux adaptée à tel ou tel système HEO donné.

Appendice 1 à l'Annexe 1

Méthode pour déterminer les périodes d'arrêt minimum des porteuses de télémesure d'un satellite HEO aux fins de conformité avec les limites de epfd_↓ visées à l'Article 22 du RR

Dans les paragraphes ci-dessous sera décrite une méthode itérative pouvant servir à déterminer les moments/latitudes sur l'orbite précis où la porteuse de télémesure d'un satellite HEO donné est arrêtée (puis réactivée) aux fins de conformité avec les limites de epfd_↓ applicables.

Comme il a été expliqué au § 4.2.1) de l'Annexe, un dépassement du gabarit des limites de epfd_↓ visées à l'Article 22 du RR pour une taille donnée d'antenne de station terrienne OSG dans une bande de fréquences donnée peut être évité en arrêtant la porteuse de télémesure pendant une période autour de chaque instant où son satellite coupe le plan équatorial. La durée minimale de la période, et ses temps précis d'arrêt et de réactivation, pour juste se conformer au gabarit des limites de epfd_↓ concerné dépendront des caractéristiques orbitales du système HEO et des caractéristiques de transmission de ses porteuses de télémesure.

En supposant, pour notre exemple de système décrit au § 2 de l'Annexe (N-SAT-HEO2), que chaque satellite HEO dans le système dispose de sa propre fréquence de porteuse de télémesure et que par ailleurs toutes les porteuses de télémesure ont des paramètres de transmission identiques, il faut uniquement déterminer la durée minimale de l'arrêt pour un seul satellite. Cette durée sera en

effet identique pour chacun des autres satellites du système, et les temps de coupure et de réactivation précis différeront simplement par des intervalles qui seront fonction des caractéristiques d'orbite et du nombre de satellites suivant la même trajectoire au sol.

En prenant le satellite N-SAT-HEO2 comme exemple, il est possible d'organiser une simulation sur ordinateur pour modéliser un scénario de brouillage constituant le cas le plus défavorable (voir l'illustration de la Fig. 3 de l'Annexe) et calculer le niveau de $epfd_{\downarrow}$ sur une antenne de station terrienne OSG de référence (par exemple de 1,2 m) située en un endroit constituant le cas le plus défavorable et émettant à destination d'un satellite OSG à une longitude constituant elle aussi le cas le moins favorable. (Comme il a été expliqué dans l'Annexe, pour le satellite N-SAT-HEO2 les deux situations les moins favorables seront quand le satellite OSG et sa station terrienne de référence se trouveront à une latitude de 0° et à une longitude correspondant à un point où le système HEO coupe l'Equateur, c'est-à-dire $123,7^{\circ}$ E ou $146,3^{\circ}$ E.) Cette simulation est faite pendant une période d'orbite complète ($86\,163$ s = 1 jour sidéral), l' $epfd_{\downarrow}$ étant calculée pour chaque intervalle de temps (des intervalles de 10 s sont suffisamment précis pour notre exemple). Les résultats sont ensuite illustrés sous forme d'une fonction de distribution cumulative (CDF) du pourcentage de temps par rapport à l' $epfd_{\downarrow}$. Il s'agit en l'espèce de la courbe correspondant à la liaison D de la Fig. 4 de l'Annexe.

On observera que le satellite coupe l'Equateur à $123,7^{\circ}$ E, lorsque (au début de son périégée) il se trouve aux trois quarts environ de son orbite de 23 h et 56 min; aussi la simulation peut-elle être refaite en utilisant un grand intervalle de temps jusqu'à environ 17 h sur l'orbite. A partir de là, la simulation peut utiliser un petit intervalle de temps jusqu'à ce que le niveau de l' $epfd_{\downarrow}$ atteigne la valeur à laquelle la courbe de la liaison D coupe le gabarit des limites visées à l'Article 22 du RR (c'est-à-dire environ -179 dB(W m² × 40 kHz) dans notre exemple). Le temps auquel cette «intersection du gabarit des limites» intervient peut être noté. La simulation peut ensuite se poursuivre à l'aide d'un petit intervalle de temps jusqu'à ce que le niveau de l' $epfd_{\downarrow}$ atteigne une crête, c'est-à-dire quand le satellite est directement au-dessus de l'Equateur, et puis revient une fois de plus à la «valeur d'intersection» du gabarit de la liaison D; ce temps peut être noté. La simulation peut alors s'arrêter et le modèle peut être modifié pour couper effectivement la porteuse de télémessure entre les deux temps qui ont été notés (dans la simulation, l'arrêt de la porteuse de la télémessure peut être modélisé en donnant à la p.i.r.e. une valeur négligeable pour l'intervalle entre les deux temps). La simulation peut alors être reprise dans la forme ainsi modifiée, les résultats étant convertis en une nouvelle CDF. On constatera que cette CDF est en tous les points nettement en dessous du gabarit correspondant aux limites de l'Article 22 du RR. (Voir la courbe (c) de la Fig. 5.)

Le modèle peut ensuite être modifié à nouveau pour réduire la durée de coupure de la porteuse et la ramener à environ un tiers de la durée indiquée au paragraphe précédent, mais approximativement avec le même centre temporel, et la simulation refaite pour produire la CDF correspondante. Il est probable que cette CDF dépassera le gabarit de l'Article 22 du RR pour des plages de $epfd$ importantes. (Voir la courbe (d) de la Fig. 5.)

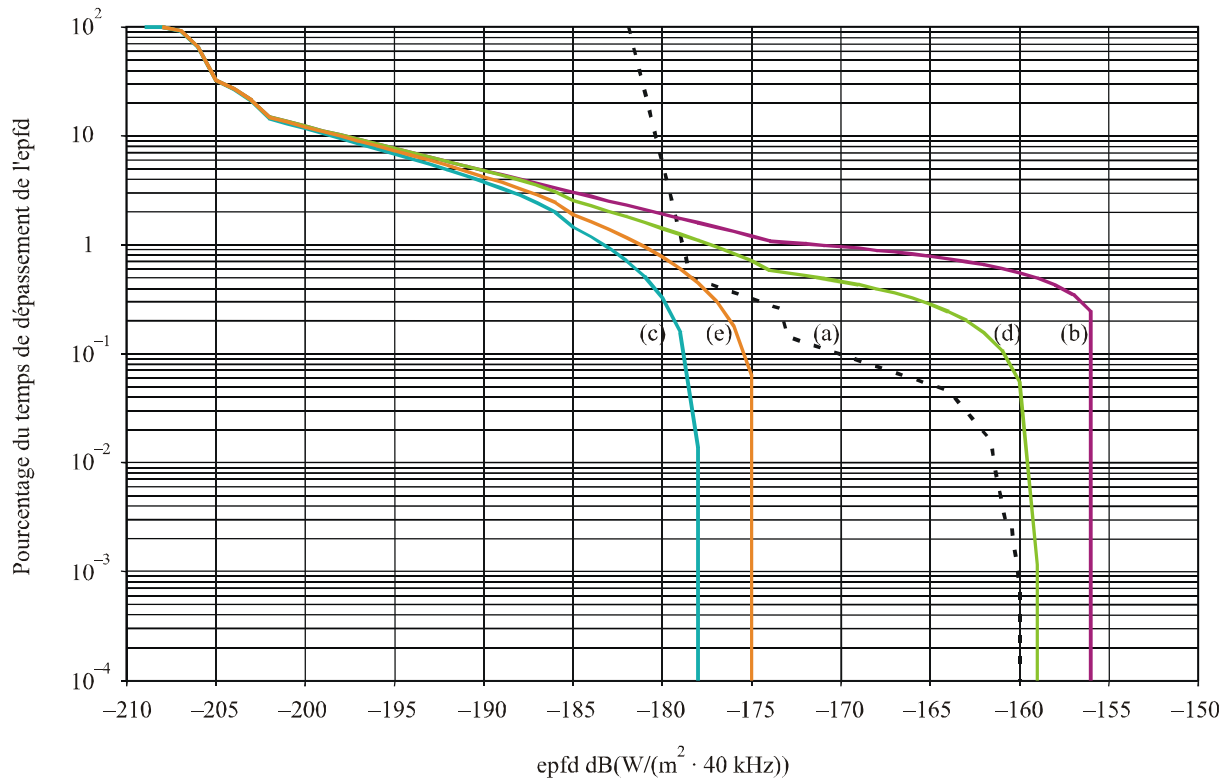
Grâce aux résultats découlant des deux paragraphes précédents, il sera possible d'estimer les temps de coupure et de réactivation approximatifs nécessaires pour reproduire une CDF juste conforme au gabarit de l'Article 22 du RR en choisissant des moments qui soient dans les intervalles découlant des courbes (c) (d). On peut, alors avec ces nouvelles données, refaire une simulation. Si la CDF obtenue n'est toujours pas optimale, une autre itération du processus devrait fournir un résultat suffisamment exact.

La procédure ci-dessus a été réalisée pour le satellite N-SAT-HEO2, avec une antenne de station terrienne OSG de 1,2 m, et une porteuse de télémessure à 12,25 GHz. Les CDF obtenues sont indiquées dans la Fig. 5. On notera que la courbe (b) est identique à la courbe correspondante à la liaison D de la Fig. 4 (c'est-à-dire géométrie la moins favorable sans coupure de la porteuse de

télémessure); on observera en outre que la courbe (e) est la courbe optimale puisqu'elle reste tout juste à l'intérieur du gabarit de limites de $epfd_{\downarrow}$. Trois itérations ont suffi pour produire cette courbe optimale dans notre exemple, mais il est peu probable qu'il en faille plus de quatre, ou au plus cinq, pour n'importe quel autre cas pratique. Ainsi, compte tenu des deux endroits où est coupé l'Equateur, les durées de coupure de la porteuse correspondant à notre exemple seraient celles qui sont indiquées au Tableau 1.

FIGURE 5

Statistiques de l' $epfd_{\downarrow}$ avec antenne de 1,2 m pour diverses durées de coupure de la porteuse de télémessure



- - - (a) Limite de $epfd$ selon l'Article 22 du RR pour une antenne OSG 1,2 m
- (b) Pas de coupure
- (c) Coupure entre 18 090-19 380 et 66 650-67 940 s
- (d) Coupure entre 18 570-19 000 et 67 130-67 560 s
- (e) Coupure entre 18 290-19 280 et 66 850-67 840 s

TABLEAU 1

Durées de coupure nécessaires pour que les porteuses de télémessure du système HEO considéré soient tout juste conformes aux limites de $epfd_{\downarrow}$, pour une antenne de station terrienne OSG de 1,2 m en bande Ku de 12-18 GHz

Satellite	Temps du périhélie (s)	Premier temps de coupure (s)	Premier temps de réactivation (s)	Deuxième temps de coupure (s)	Deuxième temps de réactivation (s)
1	0	18 290	19 280	66 850	67 840
2	28 680	9 370	10 360	47 000	47 990
3	57 490	38 180	39 170	75 810	76 800

On constatera à la lecture du Tableau 1 que chacun des trois satellites de notre système HEO devrait arrêter sa porteuse pendant la même durée à proximité des deux endroits où par orbite il coupe le plan équatorial pour se conformer au gabarit des limites de $epfd$. Chaque arrêt dure $990 \text{ s} = 16,5 \text{ min}$, ce qui correspond à $1,15\%$ de la période orbitale (un jour sidéral); compte tenu des deux temps de coupure par orbite le temps total d'«arrêt de la télémessure» correspond à $2,30\%$ de l'orbite de chaque satellite. Chaque période d'arrêt aurait lieu quand le satellite en question se trouverait à l'intérieur de la plage en latitude d'approximativement $\pm 1,487^\circ$.

A chaque orbite successive, pour obtenir les temps d'arrêt et de réactivation, il suffit d'ajouter $86\,163 \text{ s}$ (un jour sidéral).