

RECOMMANDATION UIT-R S.1595

Techniques de limitation des brouillages pour faciliter la coordination entre systèmes à satellites non géostationnaires du service fixe par satellite en orbite fortement elliptique et systèmes à satellites non géostationnaires du service fixe par satellite en orbite terrestre basse ou moyenne

(Question UIT-R 23/4)

(2002)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que dans certaines bandes de fréquences, dans le cas de chevauchement de fréquences, il est nécessaire d'assurer la coordination entre certains systèmes à satellites en orbite non géostationnaires (non OSG) et d'autres systèmes à satellites non OSG;
- b) que les systèmes faisant intervenir des orbites fortement elliptiques (HEO, *highly elliptical orbits*) présentent des caractéristiques spécifiques; par exemple, dans un système de ce type, un satellite ne peut émettre et recevoir pendant un temps d'illumination relativement long qu'au voisinage de l'apogée, en principe, et dans des fourchettes de latitudes et de longitudes déterminées, les arcs de service sont stables et prévisibles et enfin il suffit d'un petit nombre de satellites pour couvrir un hémisphère entier;
- c) que, selon les études effectuées, il n'est pas envisageable, dans la pratique, de partager les mêmes fréquences entre plusieurs systèmes non OSG tout en respectant les critères de qualité de fonctionnement si l'on n'a pas recours à des techniques de limitation des brouillages;
- d) que les études effectuées montrent que l'on dispose de plusieurs techniques de limitation des brouillages différentes pour partager des fréquences entre plusieurs systèmes non OSG;
- e) que l'on peut juger de l'efficacité d'une technique de limitation des brouillages d'après l'amélioration constatée au niveau de certains paramètres de qualité de fonctionnement (par exemple, C/I , I/N , ou $C/(I + N)$);
- f) que, lorsque le rapport C/N par temps clair présente une valeur élevée, de l'ordre de 25 à 35 dB, les valeurs admissibles types du rapport I/N peuvent n'avoir qu'une incidence négligeable sur la qualité de fonctionnement d'une liaison par temps clair (en d'autres termes, $C/(N + I)$ ne variera pas beaucoup selon que l'on utilise ou non une technique de limitation des brouillages);
- g) que, dans le cas visé au point f) du *considérant* ci-dessus, le rapport C/I peut être plus utile que le rapport I/N lorsque l'on cherche à évaluer l'efficacité d'une technique de limitation des brouillages;
- h) que, dans les cas autres que le cas visé au point f) du *considérant* ci-dessus, il peut être plus approprié d'évaluer l'efficacité des techniques de limitation des brouillages par référence au rapport I/N ;

- j) que certains systèmes non OSG exploités dans le service fixe par satellite (SFS) présentent des valeurs de C/N par temps clair importantes, de l'ordre de 25 à 35 dB;
- k) que la Recommandation UIT-R S.1323 décrit des méthodes de détermination des niveaux maximum admissibles de brouillage entre systèmes non OSG du SFS;
- l) que les niveaux maximum admissibles de brouillage dont il est question dans la Recommandation UIT-R S.1323 sont déterminés par référence à l'accroissement du taux d'indisponibilité du système ou du réseau brouillé,

recommande

- 1 d'envisager d'utiliser les techniques de limitation décrites dans l'Annexe 1 de la présente Recommandation pour faciliter la coordination entre des systèmes non OSG du SFS de type HEO et d'autres systèmes non OSG du SFS de type orbite terrestre basse (LEO) ou orbite terrestre moyenne (MEO), lorsque cette coordination est requise aux termes du numéro 9.12 du Règlement des radiocommunications (RR) (voir les Notes 1 et 2);
- 2 de considérer que les systèmes non OSG du SFS présentant d'importantes valeurs de rapport C/N par ciel clair, de l'ordre de 25 à 35 dB, se prêtent à l'utilisation initiale, pour l'évaluation des brouillages, du rapport C/I comme critère de détermination de l'efficacité des techniques de limitation des brouillages (voir la Note 3);
- 3 de tenir également compte des méthodes décrites dans la Recommandation UIT-R S.1323 pour évaluer plus précisément l'efficacité des techniques de limitation.

NOTE 1 – L'Annexe 2 montre que les techniques de limitation décrites dans l'Annexe 1 peuvent avoir des conséquences opérationnelles négatives sur les systèmes les mettant en oeuvre (couverture, capacité, etc.), et que l'importance de ces conséquences négatives varie selon les caractéristiques du système considéré.

NOTE 2 – Les techniques de limitation décrites dans l'Annexe 1 peuvent également s'appliquer au partage entre systèmes HEO non homogènes. Un complément d'étude est à prévoir pour déterminer ces possibilités d'application.

NOTE 3 – D'autres critères de brouillage pourront être plus appropriés dans le cas de systèmes non OSG du SFS présentant certaines valeurs types de critère C/N par ciel clair.

ANNEXE 1

Techniques de limitation

La présente Annexe résume un certain nombre de techniques de limitation que l'on peut appliquer à des systèmes non OSG pour faciliter le partage entre des systèmes non OSG en HEO et d'autres systèmes non OSG en LEO ou en MEO. Quatre techniques de limitation des brouillages ont été étudiées, mais la présente Annexe n'est pas exhaustive et d'autres techniques de limitation pourront être définies ultérieurement. Ces techniques de limitation, séparément ou combinées, pourront s'avérer plus ou moins utiles et faciliter le partage entre systèmes non OSG placés sur HEO et systèmes non OSG en LEO ou en MEO. Dans certains cas, c'est à la faveur des activités de coordination entre systèmes que l'on trouvera la combinaison optimale de techniques à appliquer à un couple quelconque de système non OSG du SFS dont l'un est sur HEO. On trouvera à l'Annexe 2 des exemples de résultats de simulations faisant intervenir ces techniques de limitation.

1 Diversité de satellite

Il y a brouillage direct lorsqu'un satellite non OSG brouilleur se trouve entre la station terrienne non OSG utile et le satellite non OSG utile. Avec un système à diversité de satellite, on peut éviter ces phénomènes de brouillage direct par le système non OSG brouilleur en choisissant un autre satellite visible (sous réserve que des faisceaux soient disponibles sur ce satellite) lorsque le satellite considéré est sur le point d'être illuminé par un satellite appartenant à un autre système non OSG du SFS. On procède en déterminant un angle d'évitement de X° par rapport à la station terrienne qui est sur le point d'être brouillée (station victime). On détermine un cône de X° autour de la liaison établie entre la station terrienne brouillée et le satellite brouillé qui assure la liaison descendante vers cette station terrienne. Tout satellite du système brouilleur qui pénètre dans ce cône est désactivé, c'est-à-dire qu'il ne peut pas émettre à l'intérieur d'une zone déterminée par le rayon de la cellule correspondant à la station terrienne victime.

Dans un système à diversité de satellite, des opérations de transfert (commutation) permettent donc de choisir le satellite qui assurera l'évitement du brouillage. Un système à diversité de satellite peut être extrêmement complexe et nécessiter la coopération des différents systèmes qui interviennent. Ce type de technique de limitation suppose une connaissance très détaillée des lieux géographiques des deux satellites non OSG (satellite brouilleur et satellite brouillé), et il en découle que la capacité de service d'un tel système est limitée.

Pour utiliser la diversité de satellite à des fins de limitation des brouillages, il faut que le système SFS non OSG brouilleur comporte par conception un nombre suffisant de satellites, et que chacun de ces satellites comporte lui-même un nombre de faisceaux suffisant pour desservir la station terrienne considérée. Or, tous les systèmes non OSG ne répondent pas à ces critères.

2 Stratégies de sélection de satellite

Le choix de l'algorithme de sélection des satellites dans un système non OSG du SFS peut se répercuter positivement sur les possibilités de partage entre ce système et d'autres systèmes non OSG du SFS. En général, les stations terriennes communiquent avec le satellite qui présente l'angle d'élévation le plus élevé au moment considéré. Lorsque le système décide d'utiliser une technique de poursuite différente, en choisissant par exemple le satellite qui présente la plus importante valeur de discrimination angulaire par rapport aux satellites des autres systèmes non OSG du SFS, on peut obtenir une amélioration des possibilités de partage, mais au prix d'une complexité accrue et/ou d'une réduction de la capacité en exploitation et, par ailleurs, ce type de technique de limitation suppose également une connaissance très détaillée des lieux géographiques des deux systèmes à satellites considérés.

3 Diversité d'emplacement de station terrienne

Dans certains cas, on pourra atténuer les brouillages en recourant à la technique de diversité d'emplacement de station terrienne. Il s'agit de séparer les stations terriennes, de telle sorte qu'en cas de brouillage le satellite brouilleur ne soit pas dirigé vers la station terrienne considérée mais vers une autre station terrienne située plus loin. Ainsi, il n'y a pas de brouillage direct de faisceau principal à faisceau principal, le brouillage se produisant entre un lobe latéral et un faisceau principal, ce qui réduit son intensité. La technique est d'autant plus facile à mettre en oeuvre que le nombre de stations terriennes est peu important. Cette technique de limitation réduit le nombre de stations terriennes qu'un système non OSG peut utiliser et limite les emplacements possibles de ces stations terriennes. Il en découle donc une diminution de la capacité au sol et de la possibilité de desservir certaines zones, mais non pas nécessairement de la capacité satellitaire.

4 Evitement de l'apogée HEO

La technique de l'évitement de l'apogée HEO est analogue à la technique d'évitement de l'arc OSG que l'on propose d'utiliser dans le cas de plusieurs systèmes non OSG devant être exploités dans les bandes 17,8-18,6 GHz et 19,7-20,2 GHz lorsque la protection des réseaux OSG doit être assurée par les systèmes non OSG en vertu de l'Article 22 du RR. On peut définir par référence à l'apogée du satellite sur HEO un arc de service déterminé sur la base du fait que de nombreux systèmes HEO présentent une inclinaison d'environ 63° , et que l'argument de leur périégée est de 270° ou 90° . Un grand nombre de systèmes HEO utilisent cette valeur d'inclinaison commune car, dans le cas d'une HEO, l'argument du périégée varie en conséquence directe de la non-uniformité du champ gravitationnel de la Terre (l'attraction lunaire et l'attraction solaire sont des causes secondaires de la variation de l'argument du périégée). Dans une HEO, il est nécessaire d'assurer la stabilité de l'argument du périégée afin que la partie opérationnelle de l'orbite (correspondant à la plus longue période d'illumination du satellite) soit fixe par rapport à la surface de la Terre. L'équation de calcul de la variation de l'argument du périégée s'écrit:

$$\dot{\omega} = \frac{4,982}{(1 - e^2)^2} \left(\frac{R_e}{a} \right)^{3,5} (5 \cos^2 i - 1) \quad \text{degrés/jour}$$

avec

$\dot{\omega}$: taux de variation de l'argument du périégée

e : excentricité de l'orbite

R_e : rayon de la Terre

a : demi-grand axe de la Terre

i : inclinaison de l'orbite

Lorsque l'inclinaison de l'orbite est égale à $63,4^\circ$ ou $116,6^\circ$ l'argument du périégée ne varie pas puisque, pour ces valeurs d'angle, $\cos^2 i = 1/5$ et $\dot{\omega} = \text{zéro}$. En conséquence, quel que soit le demi-grand axe et l'excentricité de l'orbite avec une inclinaison de $63,4^\circ$, l'argument du périégée (et donc l'arc de service de l'apogée) est constant et bien défini. Pour l'hémisphère nord, on définit l'arc de service de l'apogée pour une valeur d'argument du périégée de 270° . Pour l'hémisphère sud, on définit l'arc de service correspondant à la valeur d'argument de 90° .

Lorsque les lieux géographiques des stations terriennes du système HEO sont connus, il est possible de détourner les faisceaux du satellite LEO ou MEO de ces stations terriennes lorsque le satellite en question se trouve dans l'arc de service de l'apogée. Lorsque le système HEO comporte un nombre de stations terriennes donnant une couverture totale, il faut que les faisceaux du satellite LEO ou MEO soient détournés de toutes les stations terriennes pouvant subir un brouillage direct lorsque

le satellite en question se trouve dans l'arc de service de l'apogée du satellite HEO. Cette réorientation des faisceaux permet d'éviter les couplages directs, et donc de ramener les brouillages entre les deux satellites non OSG à des valeurs acceptables sans qu'il soit nécessaire de disposer d'une connaissance parfaite des emplacements des satellites HEO. Ce type de technique de limitation réduit nécessairement la capacité de service du système auquel elle est appliquée. La réorientation des faisceaux a moins d'incidence sur la capacité de couverture des satellites brouilleurs lorsque l'on cherche à éviter un certain nombre de stations terriennes dont l'emplacement géographique est connu que lorsqu'il s'agit d'éviter la totalité des emplacements possibles (dans le cas d'une couverture totale).

ANNEXE 2

Résultats de simulations avec application de techniques de limitation

1 Caractéristiques des systèmes

Dans cette étude, les simulations dynamiques ont été effectuées sur la base de diverses données: informations de coordination au titre de l'Appendice 4 du RR, Recommandation UIT-R S.1328, contributions de l'UIT-R. Cinq systèmes sont définis selon les informations rassemblées dans le Tableau 1, à savoir: deux systèmes LEO, deux systèmes MEO et un système HEO. Pour tous les systèmes, la stratégie de sélection des satellites (fonctionnement nominal) se fait par hypothèse en fonction de l'angle d'élévation le plus élevé, sauf préconisation contraire selon la technique de limitation considérée. Dans le modèle du système USCSID-P, les satellites ne transmettent vers aucune station terrienne lorsque la latitude subsatellite du satellite HEO est inférieure à 35° (ce qui permet de protéger l'arc OSG). Cette technique d'évitement de l'arc OSG est une caractéristique opérationnelle typique des systèmes à satellites HEO (il ne s'agit donc pas de rendre compte des caractéristiques effectives du système USCSID-P).

Dans chaque système, les lieux géographiques des stations terriennes ont été modélisés sous forme de cercles concentriques par référence à une station terrienne située au même point que le système non OSG victime. La distance entre stations terriennes est fondée sur l'ouverture du faisceau de la liaison descendante du satellite, de telle sorte que le système non OSG ne se brouille pas lui-même. Pour le système HEO, une seule station terrienne est modélisée, puisque les stations terriennes de ce système sont très espacées et que la présence de stations terriennes multiples n'aurait aucun effet cumulatif sur les résultats des simulations.

TABLEAU 1
Caractéristiques des systèmes

| Caractéristiques | USCSID-P | LEOSAT-1 | LEOSAT-2 | USAMEO-2 | USAMEO-3 |
|----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Nombre de satellites | 8 | 288 | 63 | 15 | 20 |
| Nombre de plans | 8 | 12 | 7 | 3 | 4 |
| Nombre de satellites par plan | 1 | 24 | 9 | 5 | 5 |
| Espacement des plans (degrés) | 45 | 15,36 | 51,43 | 120 | 90 |
| Inclinaison (degrés) | 63 | 84,7 | 48 | 50 | 55 |
| Altitude de l'orbite (km) | Apogée = 39 400 Perigée = 1 000 | 1 375 | 1 400 | 10 355 | 10 352 |
| Espacement entre plans (degrés) | $45*(j-1)$ $j = 1, 3, 5, 7$ $45*(j+1)$ $j = 2, 4, 6, 8$ | Aléatoire | 28,57 | 24 | 0 |
| Angle d'élévation minimal des stations terriennes (degrés) | 3 | 40 | 16 | 25 | 30 |
| <i>Paramètres de transmission sur la liaison descendante</i> | | | | | |
| Largeur de bande de la porteuse (MHz) | 3 200 | 500 | 35 | 222 | 133,47 |
| Commande de puissance | Non | Non | Oui | Non | Non |
| Gain de crête à la réception de station terrienne (dB) | 70 et 59,5 | 34,1 | 34,2 | 51,7 | 35,9 |
| Diagramme d'antenne de réception de station terrienne | Rec. UIT-R S.1428 | Rec. UIT-R S.1428 | Rec. UIT-R S.1428 | Rec. UIT-R S.1428 | Rec. UIT-R S.1428 |
| Diamètre d'antenne de réception de station terrienne (m) | 20 et 6 | 0,3 | 0,35 | 2,2 | 0,36 |
| Température de bruit à la réception de la station terrienne (K) | 255 | 288 | 678,4 | 259,6 | 192 |
| Gain de crête à l'émission du satellite (dB) | 51 | 34,7 à 35,7 | 34,3 | 41,28 | 44,6 |
| Diagramme de rayonnement de l'antenne d'émission du satellite | Rec. UIT-R S.672 | -0,5 en limite de zone de couverture, -25 au voisinage du lobe latéral, -30 en dehors du lobe latéral | Rec. UIT-R S.672 $L_N = -25$ dB | Rec. UIT-R S.672 $L_N = -25$ dB | Rec. UIT-R S.672 $L_N = -25$ dB |
| p.i.r.e. à l'émission du satellite (dBW) | 70 | 53,9 | 37,22 | 42,5 | 60,34 |
| Nombre de faisceaux d'émission de même polarisation dans la même fréquence | 1 | 8 | 260 | 24 | 20 |
| Nombre de stations terriennes dans le modèle | 1 | 91 | 91 | 91 | 91 |

2 Analyse

Des simulations ont été effectuées pour déterminer l'efficacité des différentes techniques de limitation et comprendre l'incidence de ces techniques sur les divers systèmes considérés. On compare les valeurs de brouillage relevées (C/I) à une valeur seuil donnée. Dans ces simulations, cette valeur seuil a été arbitrairement fixée à $C/I = 20$ dB. Pour des valeurs importantes de C/N dans des conditions de ciel clair, par exemple 35 dB, l'effet des précipitations peut ramener le C/N à environ 20 dB. Les effets de la pluie sont l'affaiblissement du signal, une augmentation de la température de bruit du récepteur de la station terrienne et (dans le cas d'une polarisation double) une augmentation du brouillage de transpolarisation. La combinaison d'un C/N de 20 dB et d'un C/I de 20 dB donne un rapport $C/(N + I)$ de 17 dB, valeur considérée comme suffisante dans la présente étude en ce qui concerne la qualité de fonctionnement de la liaison. Le seuil choisi pour le C/I ne correspond pas à la valeur effective caractéristique des systèmes modélisés, et l'on pourrait procéder à une étude plus fine en recourant au critère spécifié dans la Recommandation UIT-R S.1323 (réduction générale de disponibilité de 10%). Par ailleurs, il faut tenir compte de la probabilité de phénomènes conjoints d'affaiblissement et de brouillage. Toutefois, pour la présente analyse, le brouillage est considéré comme acceptable lorsque la valeur résultante du C/I est égale ou supérieure à 20 dB.

L'effet de la technique de limitation considérée est évalué par référence à la réduction du nombre de satellites disponibles pour une zone donnée dans le système auquel est appliquée la technique. Un autre type d'incidence qui n'est pas pris en compte dans la présente étude serait l'augmentation du nombre et de la complexité des opérations de commutation requises pour mettre en œuvre les techniques de limitation. Toutefois, il convient de noter que le système HEO modélisé n'est pas conçu pour des opérations de commutation complexes. Les satellites du système USCSID-P ne sont dotés que d'un seul faisceau et, s'il est vrai que la technique de diversité de satellite est modélisée dans les simulations, il demeure que le système USCSID-P ne peut pas assurer les opérations de commutation requises pour ce type de moyen de limitation des brouillages.

Les simulations ont été effectuées sur 100 jours, à intervalles de 0,5 s. Les scénarios modélisaient les brouillages occasionnés au niveau de petites et de grandes antennes de station terrienne du système USCSID-P par des satellites des systèmes LEOSAT-1, LEOSAT-2, USAMEO-2 et USAMEO-3. Les brouillages causés par le système USCSID-P aux systèmes LEO et MEO ont également été examinés. Les hypothèses de travail additionnelles suivantes ont également été formulées dans ces simulations:

- au niveau de chaque station terrienne non OSG, le choix du satellite non OSG se faisait sur la base de l'angle d'élévation le plus important;
- lorsque le satellite présentant l'angle d'élévation le plus élevé n'était pas disponible en raison de la technique de limitation adoptée ou lorsque tous ses faisceaux étaient occupés par d'autres stations terriennes, on choisissait le satellite suivant dans l'ordre décroissant des angles d'élévation;
- lorsque aucun satellite n'était disponible pour le système brouilleur en raison des techniques de limitation choisies, ou lorsque tous les faisceaux étaient occupés par d'autres stations terriennes (c'est-à-dire, lorsqu'il n'y avait pas de phénomène de brouillage), on prenait une valeur de C/I élevée afin de ne pas fausser les statistiques;
- les systèmes LEO et MEO de l'échantillon devant être associés à des stations terriennes assurant une couverture totale, le modèle déterminait autour de la station terrienne LEO/MEO centrale un réseau de stations terriennes situé au même emplacement qu'une station terrienne unique du système HEO;

- les stations terriennes des systèmes LEO et MEO étaient configurées en réseau autour de la station terrienne du système HEO. Le diamètre de cellule et la distance requise pour la réutilisation des fréquences déterminaient la distance entre les stations terriennes du système LEO et celles du système MEO. Les stations terriennes étaient placées sur des cercles concentriques, avec, au centre, la station terrienne du système HEO;
- un seul faisceau de satellite non OSG pouvait émettre en direction d'une seule cellule non OSG;

Quatre techniques de limitation des brouillages ont été modélisées dans cette étude: diversité de satellite, diversité d'emplacement de station terrienne, critère de sélection du satellite et évitement de l'apogée HEO. Toutes les techniques de limitation ont été examinées dans deux configurations, les systèmes LEO et MEO protégeant le système HEO dans la première, et le système HEO protégeant les systèmes LEO et MEO (exception faite de l'évitement de l'apogée HEO) dans la seconde. La technique d'évitement de l'apogée HEO, dans la configuration où le système HEO protège les systèmes LEO et MEO, a cependant été examinée elle aussi puisque, lorsque les systèmes LEO ou MEO évitent l'apogée de l'orbite HEO, on peut observer les avantages obtenus en ce qui concerne les brouillages émanant du système HEO.

2.1 Diversité de satellite

La technique de diversité de satellite n'est pas généralement envisageable dans le cas de systèmes HEO puisque la plupart de ces systèmes ne comportent pas des satellites multiples dotés eux-même de faisceaux multiples capables de desservir simultanément un emplacement de station terrienne donné. Pourtant, rien, dans la définition d'un système HEO ou d'une orbite quelconque, n'empêche d'utiliser la technique de diversité de satellite.

Le Tableau 2 récapitule les caractéristiques de plusieurs systèmes HEO. Dans l'examen de ce Tableau, il convient de noter que la partie opérationnelle de la plupart des orbites considérées est tout à fait limitée. Les systèmes sont conçus de telle sorte que lorsqu'un satellite quitte la zone opérationnelle de l'orbite, un autre satellite y pénètre. D'une manière générale, ces systèmes fonctionnent selon le principe qu'un seul satellite se trouve dans la fenêtre opérationnelle définie pendant la plus grande partie du temps.

Dans un système HEO, une double couverture satellitaire n'est généralement pas requise pour assurer une couverture continue. Une constellation de systèmes à orbite HEO conçue pour offrir un grand nombre de satellites visibles ou accessibles à partir d'une station terrienne donnée pendant une période de temps relativement longue s'écarterait des caractéristiques normales d'un système HEO. En conséquence, les techniques de diversité de satellite ne paraissent pas optimales dans le cas de systèmes HEO, car il faudrait alors des systèmes conçus pour fonctionner avec une fenêtre d'exploitation importante, des angles d'élévation minimums plus petits et des stations terriennes plus complexes et, par ailleurs, il faudrait prévoir dans les constellations un certain nombre de satellites additionnels. Le recours à une fenêtre opérationnelle relativement large pourrait entraîner un accroissement des brouillages occasionnés aux satellites OSG. La réduction de l'angle d'élévation minimal entraînerait une augmentation de la complexité des opérations de poursuite des stations terriennes. Enfin, l'adjonction d'un certain nombre de satellites additionnels se traduirait par davantage de coûts et de complexité. Il convient d'ailleurs de noter ici que ces conséquences s'appliquent d'une manière générale à tout système non OSG. Toutefois, de telles mesures permettraient d'accroître les possibilités de coordination avec d'autres systèmes non OSG.

Pour définir l'angle d'évitement adéquat (Fig. 1), plusieurs simulations ont été effectuées (recherche de l'angle d'évitement le plus approprié compte tenu d'un C/I déterminé). La technique de diversité de satellite exploite les avantages offerts au niveau de la discrimination de gain d'antenne par les antennes de station terrienne.

TABLEAU 2

Paramètres orbitaux des systèmes HEO

| Système | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------|------------------|----------------|----------------|
| Altitude de l'apogée (km) | 35 970 | 44 640,5 | Environ 39 000 | 35 800 | 52 700 | 40 000 |
| Altitude du périégée (km) | 4 500 | 26 931,5 | 500 | 35 800 | 18 900 | 31 600 |
| Excentricité | 0,59 | 0,21 | 0,74 | 0 (circulaire) | 0,4 | 0,1 |
| Période orbitale | Environ 12 h | 23 h et 56 min | 11,97 h | 23 h et 56 min | 23 h et 56 min | 23 h et 56 min |
| Inclinaison de l'orbite (degrés) | 50 | 42,5 | 63,43 | 63,4 | 60 | 40 |
| Partie opérationnelle de l'orbite | De 4 h avant l'apogée à 4 h après l'apogée | De 4,5 h avant l'apogée à 3,5 h après l'apogée | 3,5 h centrées sur l'apogée | (Voir la Note 1) | 4 h | 6 h |
| Nombre de satellites dans la constellation | 3 ou 4 | 3 ou 4 | 7 | (Voir la Note 1) | 6 | 4 |

TABLEAU 2 (suite)

| Système | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|--------------------------------------------|----------------|----------------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| Altitude de l'apogée (km) | 50 400 | 52 400 | 20 180 | 34 800 | 39 300 | 27 470 |
| Altitude du périégée (km) | 21 200 | 19 200 | 20 180 | 20 600 | 1 075 | 310 |
| Excentricité | 0,347 | 0,393 | 0 | 0,55 | 0,72 | 0,67 |
| Période orbitale | 23 h et 56 min | 23 h et 56 min | Environ 12 h | Environ 12 h | Environ 12 h | Environ 8 h |
| Inclinaison de l'orbite (degrés) | 63,4 | 63,4 | 63,4 | 45 | 63,4 | 45 |
| Partie opérationnelle de l'orbite | 6 h | 4 h | 2 h | 8 h | 6 h | 4 h |
| Nombre de satellites dans la constellation | 4 | 6 | 12 | 3 | 4 | 6 |

TABLEAU 2 (*fin*)

| Système | Quasi-OSG 31 Rec. UIT-R S.1328-2 (Tableau 1, p. 8) | USAKU-H1 Rec. UIT-R S.1328-2 (Tableau 24, p. 36) | Tanya Rec. UIT-R S.1328-2 (Tableau 25, p. 37) | USAKU-H2 Rec. UIT-R S.1328-2 (Annexe 13, section 3, p. 59) | LEO E ⁽¹⁾ Rec. UIT-R S.1328-2 (Tableau 1, p. 2) |
|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| Altitude de l'apogée (km) | 40 000 | 41 449 | 41 449 | 27 288,3 | 7 846 |
| Altitude du périogée (km) | 1 000 | 4 100 | 4 100 | 517,4 | 520 |
| Excentricité | 0,73 | 0,64 | 0,64 | 0,66 | 0,35 |
| Période orbitale | 12 h | 14 h | 14 h | 8 h | 3 h |
| Inclinaison de l'orbite (degrés) | 63 | 63,4 | 63,4 | 63,435 | 116,6 |
| Partie opérationnelle de l'orbite | Non disponible | Non disponible | Non disponible | Latitude du satellite supérieure à 45° | Non disponible |
| Nombre de satellites dans la constellation | 8 | 12 | 4 | 15 | 10 |

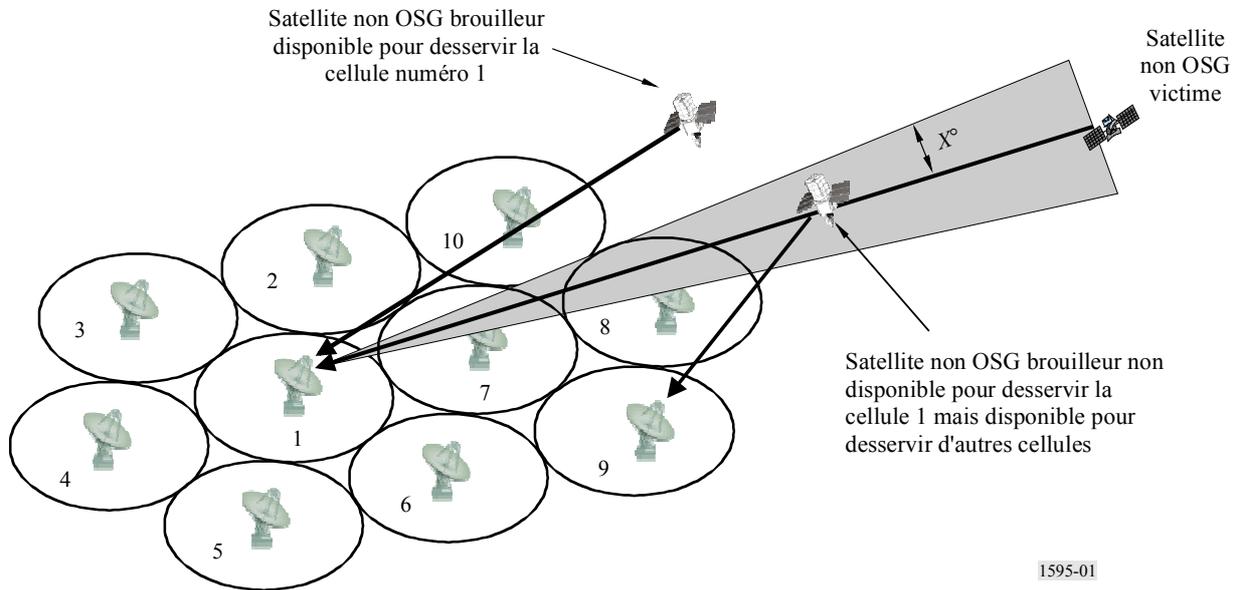
(1) Le système LEO E est un système du service mobile par satellite qui dessert des liaisons de connexion.

NOTE 1 – Pour l'orbite décrite pour les systèmes 4, 5, 6, 7 et 8, le Tableau suivant indique la partie opérationnelle de l'orbite et le nombre de satellites dans la constellation.

| | | | | | | |
|-----------------------------------------------|-----|-----|-----|---------------|---------------|-----|
| Partie opérationnelle de l'orbite | 4 h | 8 h | 6 h | 4 h et 48 min | 3 h et 26 min | 3 h |
| Nombre de satellites dans la constellation | 6 | 3 | 4 | 5 | 7 | 8 |

FIGURE 1

Description de la technique de limitation par définition d'un angle d'évitement



1595-01

Les angles utilisés dans ces simulations sont indiqués au Tableau 3. Dans la première partie de ce Tableau figurent les angles requis pour réduire les brouillages occasionnés au système USCSID-P. Des analyses ont été effectuées pour étudier les brouillages occasionnés au niveau des antennes de station terrienne de grand diamètre ou de petit diamètre du système USCSID-P. L'angle d'évitement indiqué dans le Tableau correspond au plus important des deux angles ou à l'angle d'évitement requis pour réduire suffisamment le brouillage afin de respecter le seuil de 20 dB pour les deux types d'antennes de réception de station terrienne (grand diamètre et petit diamètre). La seconde partie du Tableau indique les angles d'évitement requis pour que le système USCSID-P permette d'obtenir la valeur seuil du *C/I* requise pour les systèmes LEO et MEO. Il convient de noter que le système USCSID-P ne prévoit qu'un faisceau par satellite et n'a pas été conçu pour des algorithmes de commutation complexes. Les simulations indiquent que cette technique de limitation peut être efficace lorsque le système HEO est conçu pour assurer ce type de commutation, mais, une fois encore, tel n'est pas le cas du système USCSID-P.

TABLEAU 3

Angles d'évitement

Limitation des brouillages occasionnés en direction du système USCSID-P

| Système appliquant la technique | Angle d'évitement (degrés) |
|---------------------------------|----------------------------|
| LEOSAT-1 | 18,0 |
| LEOSAT-2 | 12,0 |
| USAMEO-2 | 0,1 |
| USAMEO-3 | 2,8 |

Technique de limitation appliquée au système USCSID-P

| Système visé par la protection | Angle d'évitement (degrés) |
|--------------------------------|----------------------------|
| LEOSAT-1 | 2,7 |
| LEOSAT-2 | 3,3 |
| USAMEO-2 | 1,7 |
| USAMEO-3 | 2,6 |

On constate dans le Tableau 3 que, s'agissant de la protection du système HEO, les angles d'évitement respectés sont beaucoup plus importants dans le cas des systèmes LEO que dans le cas des systèmes MEO.

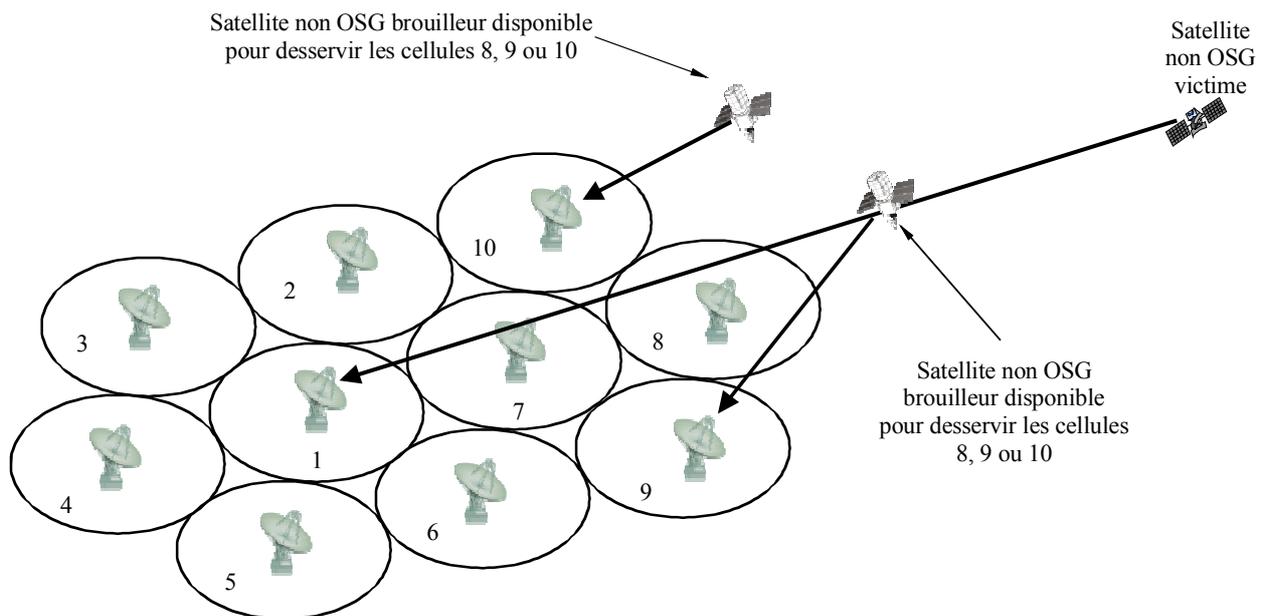
Cette technique réduit naturellement la capacité du système non OSG auquel on l'applique et impose la connaissance du lieu orbital des deux satellites non OSG. Aux fins de la présente analyse, la réduction relative de la capacité est évaluée par référence au nombre de satellites disponibles pour servir un point donné de la Terre.

2.2 Diversité d'emplacement de station terrienne

La deuxième technique de limitation des brouillages examinée est celle de la diversité d'emplacement de station terrienne. Il s'agit de séparer les stations terriennes de telle sorte que lorsque les satellites se trouvent dans une configuration d'alignement géométrique, le satellite brouilleur ne pointe pas vers la station terrienne victime mais plutôt vers une autre station terrienne située plus loin. Ainsi, on évite les phénomènes de brouillage de faisceau principal à faisceau principal, puisque le brouillage a lieu de lobe latéral à faisceau principal, de sorte qu'il est moins important. La diversité d'emplacement de station terrienne exploite la capacité de discrimination de gain d'antenne offerte par les antennes de satellites. La technique est d'autant plus commode à mettre en œuvre que le nombre de stations terriennes est peu important. Dans ce système, on limite le nombre de stations terriennes pouvant être utilisées par un système non OSG et on restreint les lieux géographiques de ces stations terriennes. Pour modéliser cette technique dans la simulation, on a retiré un certain nombre de stations terriennes du réseau des constellations LEO et MEO (voir l'exemple de la Fig. 2). Le nombre de stations terriennes à supprimer ou la distance à prévoir entre la source de brouillage et la station terrienne victime est déterminée par simulations successives jusqu'à obtention de la valeur à respecter pour le C/I . Le Tableau 4 indique le nombre de stations terriennes supprimées dans chaque cas et les résultats de ces suppressions.

FIGURE 2

Configuration de limitation des brouillages par diversité de station terrienne



Les cellules de station terrienne brouilleuse 1 à 7 ont été retirées du scénario, et seule la station terrienne victime demeure dans la cellule 1.

TABLEAU 4

Séparation des stations terriennes**Limitation des brouillages occasionnés
en direction du système USCSID-P**

| Système appliquant la technique | Nombre de stations terriennes | Résultats |
|---------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------|
| LEOSAT-1 | Même emplacement, plus 4 anneaux | Amélioration, mais valeur de 20 dB non atteinte |
| LEOSAT-2 | Même emplacement, plus 3 anneaux | Valeur de 20 dB atteinte |
| USAMEO-2 | Même emplacement | Valeur de 20 dB atteinte |
| USAMEO-3 | Même emplacement, plus 4 anneaux | Amélioration, mais valeur de 20 dB non atteinte |

**Technique de limitation appliquée
au système USCSID-P**

| Système visé par la protection | Nombre de stations terriennes | Résultats |
|--------------------------------|----------------------------------|--------------------------|
| LEOSAT-1 | Même emplacement, plus 1 anneau | Valeur de 20 dB atteinte |
| LEOSAT-2 | Même emplacement, plus 1 anneau | Valeur de 20 dB atteinte |
| USAMEO-2 | Même emplacement, plus 3 anneaux | Valeur de 20 dB atteinte |
| USAMEO-3 | Même emplacement, plus 1 anneau | Valeur de 20 dB atteinte |

L'incidence de cette technique de limitation des brouillages n'intervient pas nécessairement au niveau de la capacité utilisable des satellites: la technique a plutôt pour effet de limiter le nombre de stations terriennes pouvant être desservies par un système non OSG donné dans une zone donnée, ainsi que de restreindre les lieux géographiques de ces stations terriennes. Cette technique impose également la connaissance de tous les lieux géographiques possibles des stations terriennes victimes.

2.3 Stratégie de sélection de satellite

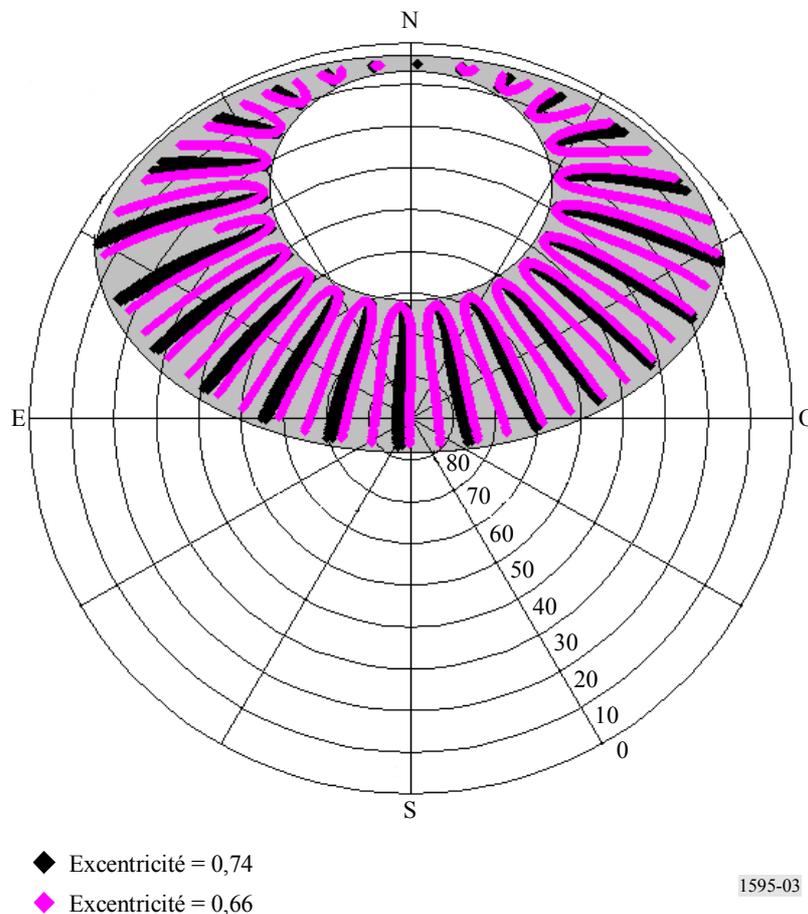
La troisième technique de limitation des brouillages modélisée aux fins de la présente analyse était une technique de sélection d'un satellite de remplacement. En général, les stations terriennes choisissent les satellites en fonction de l'angle d'élévation, recherchant l'angle d'élévation le plus élevé. Dans la technique considérée, on cherche à réduire le brouillage en appliquant une stratégie selon laquelle les stations terriennes choisiront le satellite présentant la plus importante discrimination angulaire par rapport aux satellites de l'autre système non OSG. Cette technique impose elle aussi une parfaite connaissance des lieux orbitaux des satellites des deux systèmes non OSG. Bien qu'elle ne se traduise pas par une réduction du nombre de satellites visibles, le nombre des opérations de commutation requises peut s'accroître et la qualité de service peut être affectée puisque l'on utilise alors plus souvent des liaisons présentant un angle d'élévation moins important, ce qui par ailleurs peut aussi réduire l'angle de séparation par rapport à l'arc OSG, sans toutefois que cet angle devienne inférieur à l'angle de séparation minimal défini pour chaque système.

2.4 Evitement de l'apogée HEO

Des simulations ont été effectuées avec un argument de périégée de 270° , une station terrienne à une latitude de 40° et deux scénarios de service d'arc HEO différents. Dans le premier scénario, représenté à la Fig. 3, un satellite HEO est actif avec une latitude subsatellite supérieure à 35° . Le pourcentage de ciel occupé par les satellites HEO est d'environ 32%. Dans le second scénario, l'arc de service HEO est ramené à ± 3 h par rapport à l'apogée, ce qui réduit considérablement l'arc de service. Le pourcentage de ciel occupé par le système HEO dans ce scénario est de 16%. Ces deux scénarios de service représentent les configurations d'exploitation types de certains systèmes à satellites HEO, sans pour autant être représentatifs de la totalité de ces systèmes.

FIGURE 3

Azimuth et élévation par rapport à l'arc de service de l'apogée du système HEO à partir d'une latitude de 40° (orbite de 12 h)
(le satellite HEO n'émet que lorsque la latitude subsatellite dépasse 35°)



Dans tous les cas, le brouillage occasionné au système HEO a été ramené au-dessous du seuil cible lorsque les systèmes LEO et MEO évitaient l'arc de service correspondant à la partie grise de la zone du ciel illustrée dans la Fig. 3 (apogée HEO). Lorsque cette technique est utilisée dans les systèmes LEO et MEO, on observe une diminution du brouillage occasionné par le système HEO. Si, dans la plupart des cas, les brouillages occasionnés par les systèmes HEO aux systèmes LEO et MEO n'atteignaient pas la valeur seuil fixée, on observait néanmoins une sensible diminution de ces brouillages.

Cette technique réduit nécessairement la capacité du système non OSG brouilleur mais n'impose pas la connaissance des emplacements orbitaux des satellites du système HEO victime. Aux fins de la présente analyse, la réduction de la capacité a été évaluée d'après la réduction du nombre de satellites disponibles pour servir un lieu donné de la Terre.

3 Résultats

Les courbes représentatives de la fonction de distribution cumulative (CDF) du C/I correspondant à la simulation des brouillages occasionnés par chacun des systèmes LEO et MEO au système HEO avec et sans technique de limitation des brouillages font l'objet des Fig. 4 à 11. Les Fig. 12 à 15 représentent les courbes de simulation des brouillages occasionnés par le système HEO à chacun des systèmes LEO et MEO avec et sans technique de limitation. Les Fig. 16 à 20 regroupent un certain nombre de données statistiques sur le nombre de satellites disponibles pour une station terrienne à 40° de latitude lorsque le système brouilleur fonctionne en mode nominal sans technique de limitation, lorsque le système brouilleur fonctionne avec diversité de satellite (discrimination angulaire) par rapport au système non OSG utile et enfin lorsque le système brouilleur utilise ces deux systèmes d'évitement du système HEO. Il n'est pas nécessaire de proposer des statistiques relatives au nombre de satellites disponibles dans le cas de la technique de limitation par séparation de station terrienne ou par sélection d'un autre satellite puisque ces options n'ont aucune incidence sur le nombre de satellites disponibles pour le service.

FIGURE 4

CDF du C/I : système LEOSAT-1 vers USCSID-P (antenne de grand diamètre)

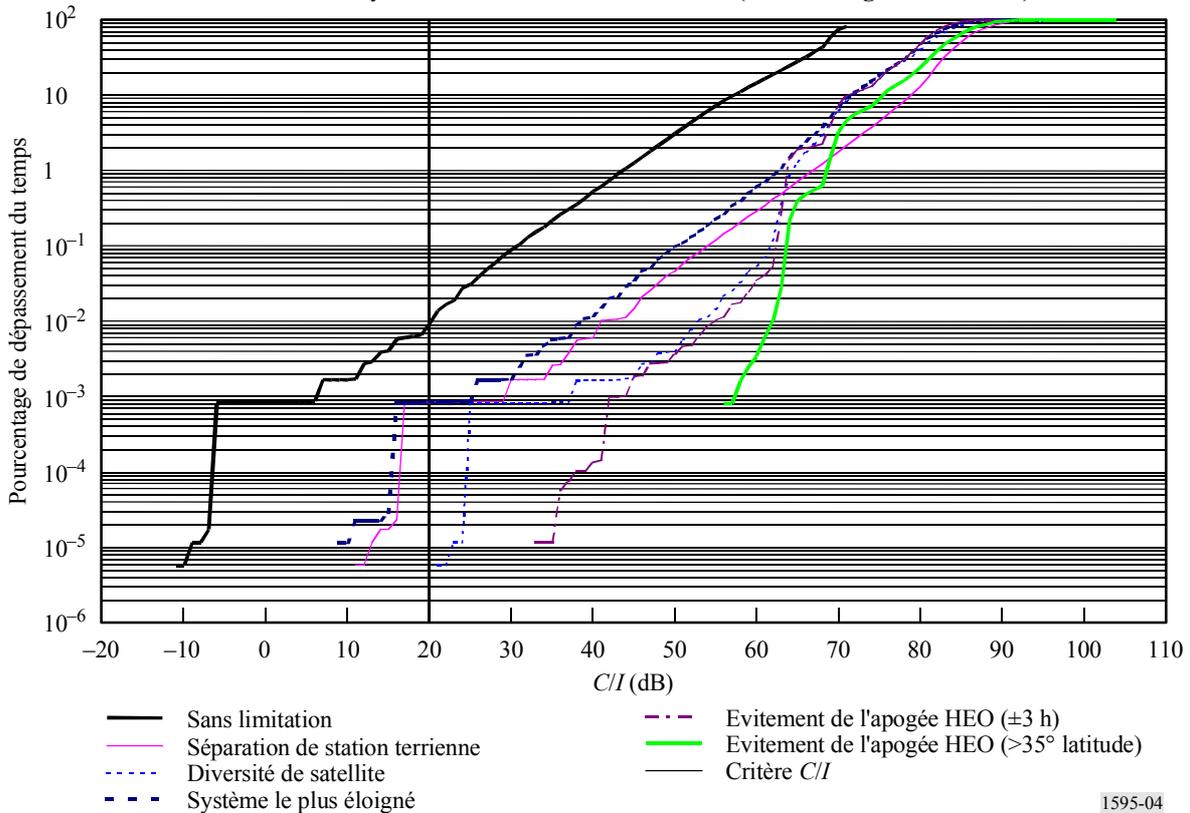


FIGURE 5

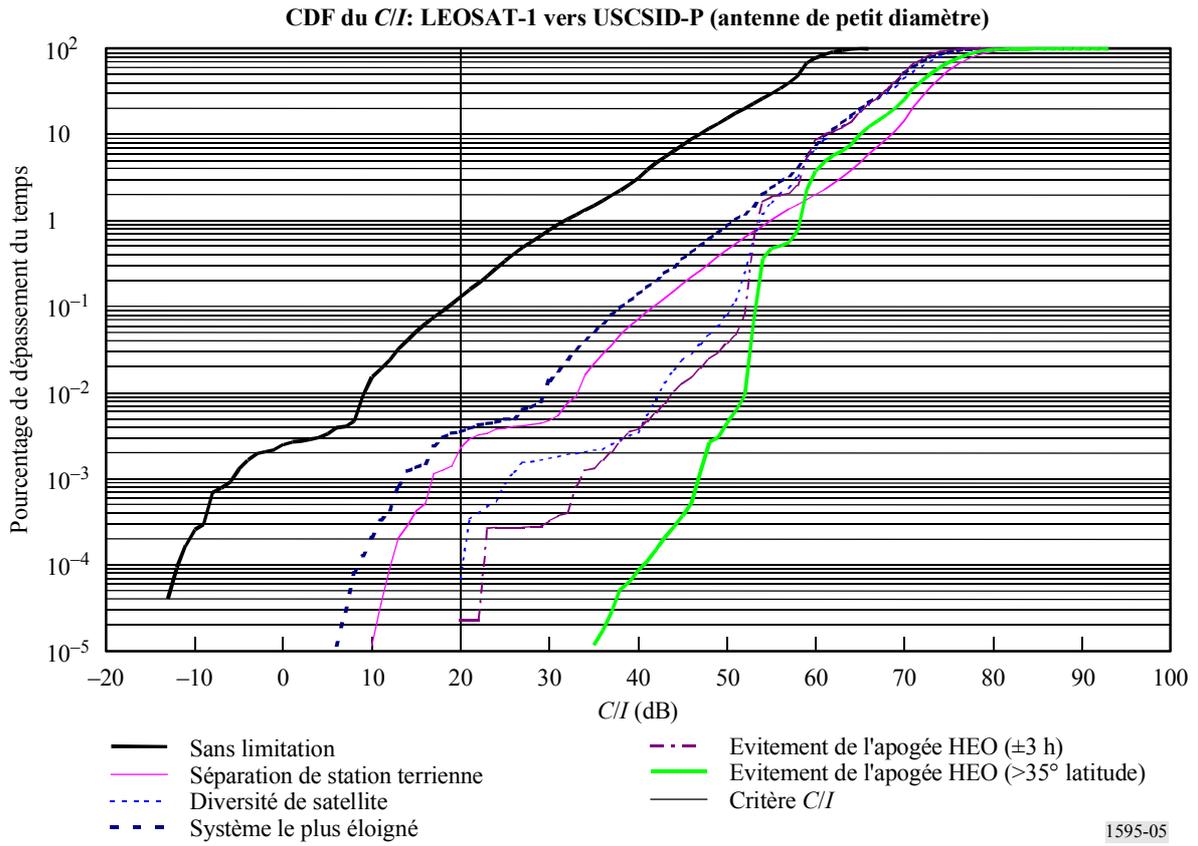


FIGURE 6

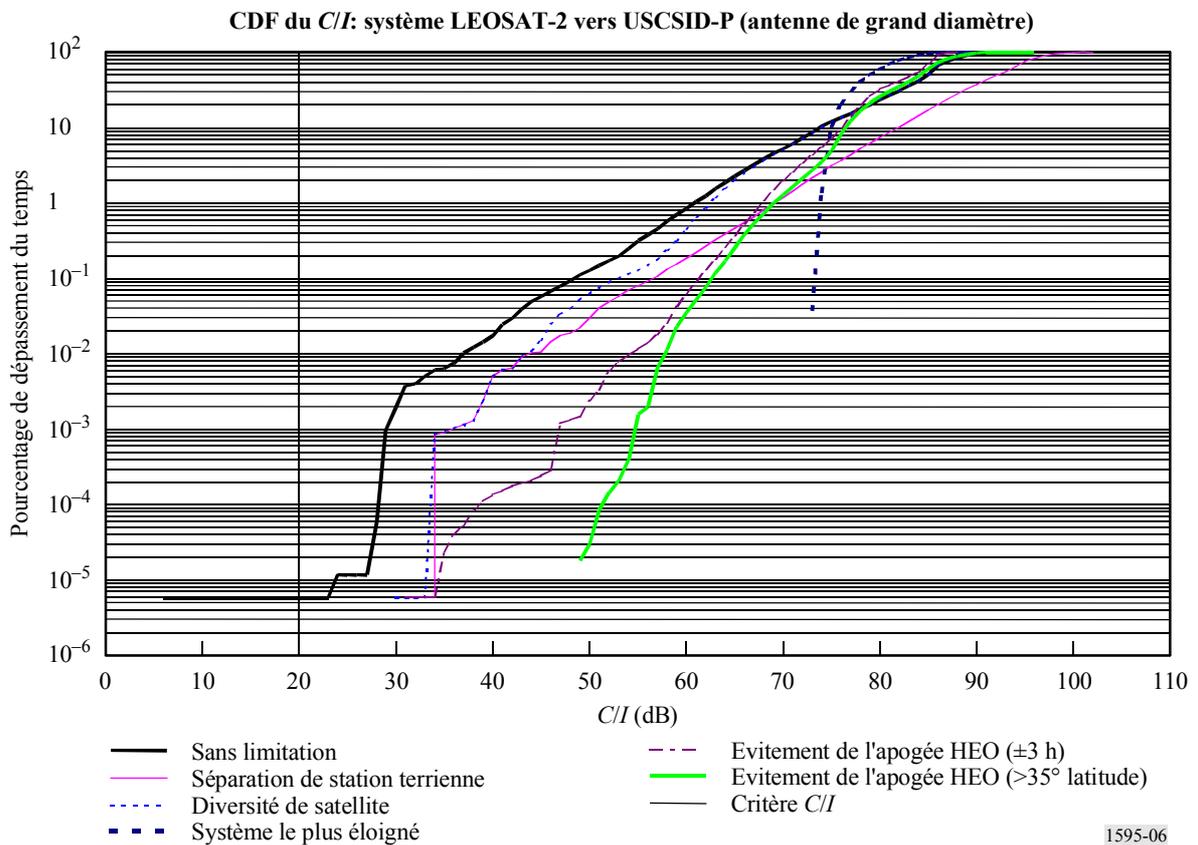


FIGURE 7

CDF du C/I: système LEOSAT-2 vers USCSID-P (antenne de petit diamètre)

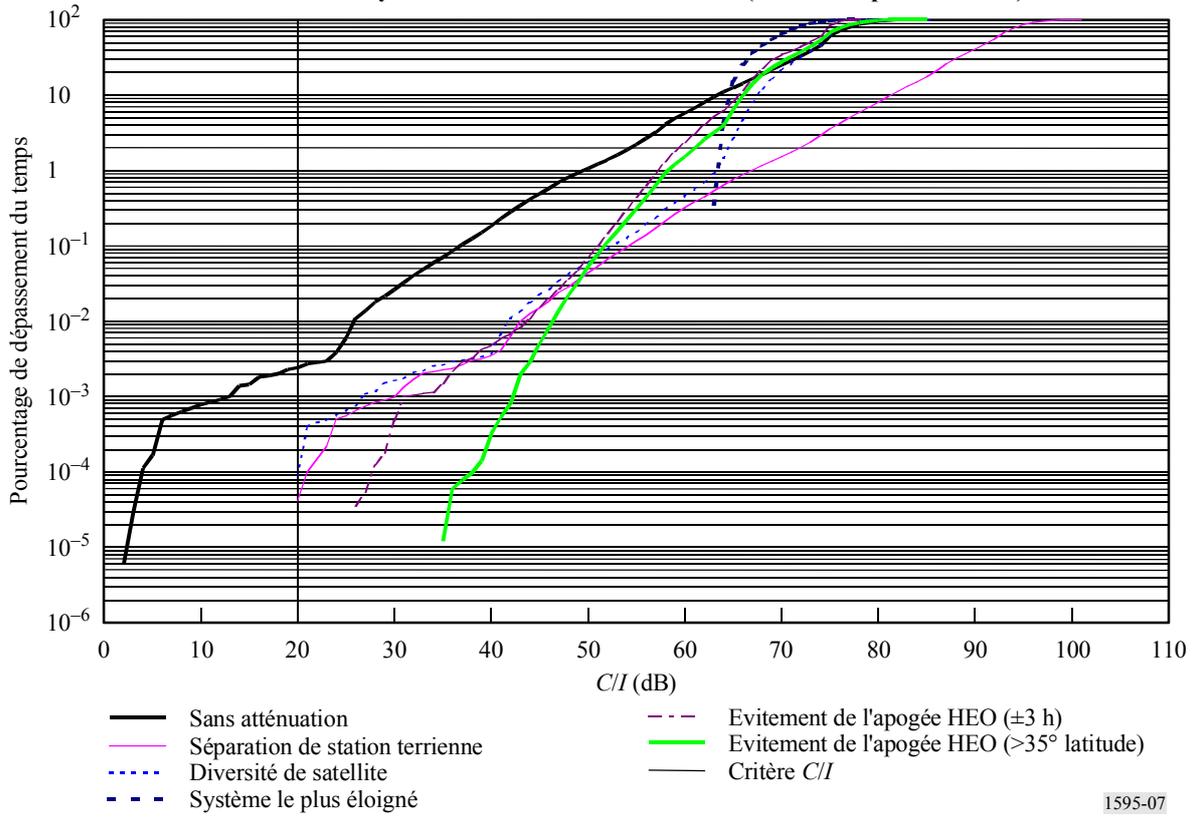


FIGURE 8

CDF du C/I: système USAMEO-2 vers USCSID-P (antenne de grand diamètre)

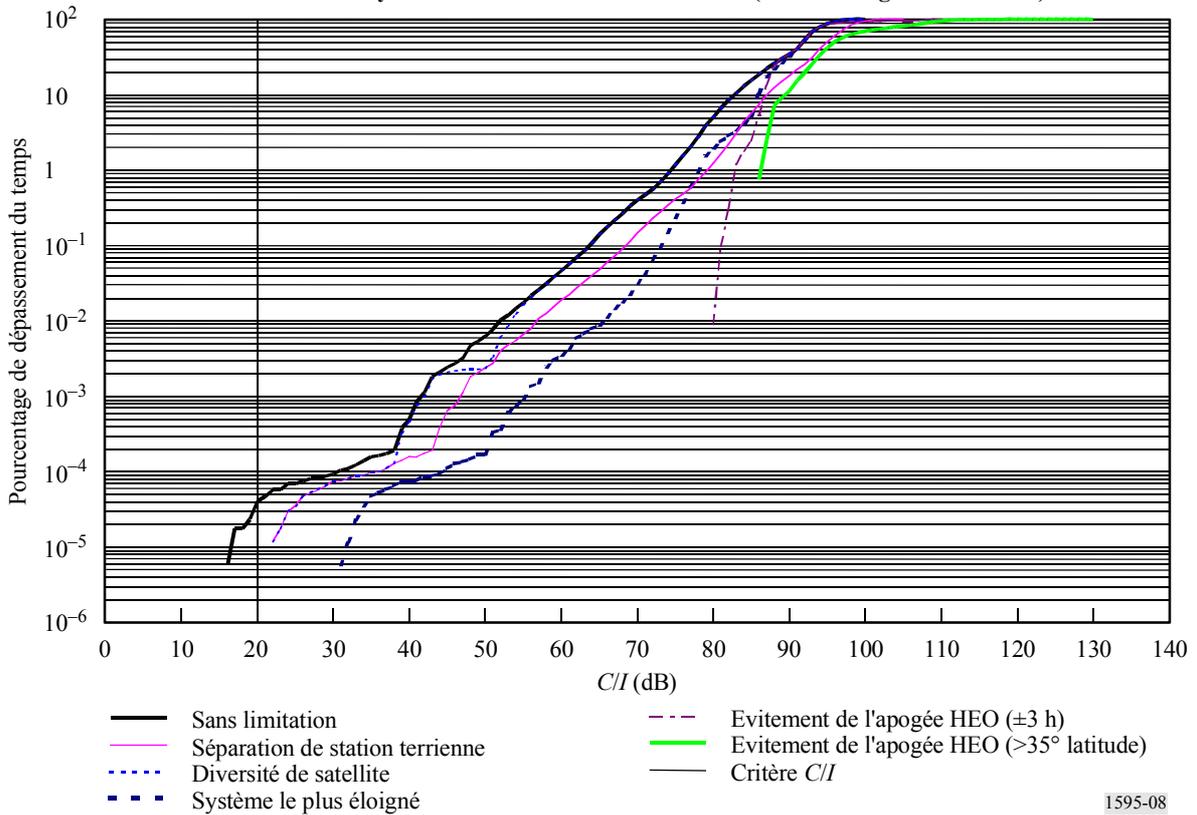


FIGURE 9

CDF du C/I: système USAMEO-2 vers USCSID-P (antenne de petit diamètre)

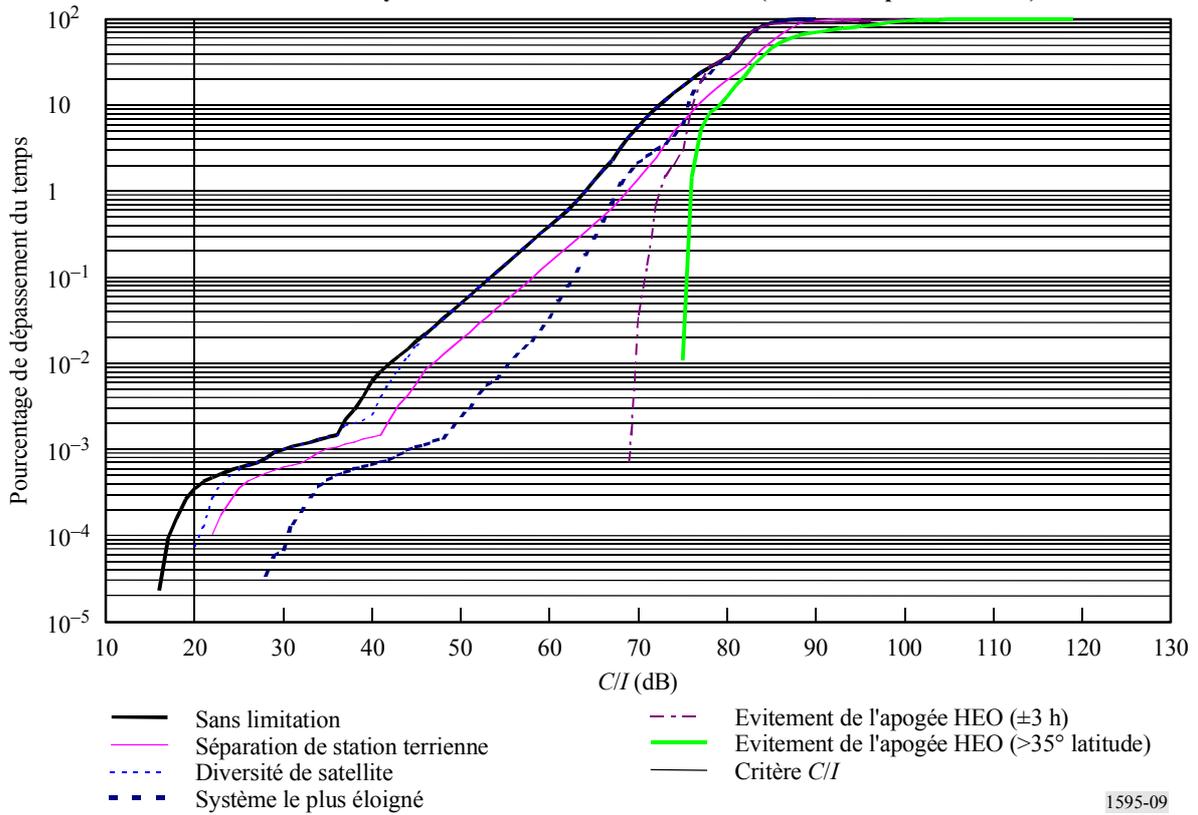


FIGURE 10

CDF du C/I: système USAMEO-3 vers USCSID-P (antenne de grand diamètre)

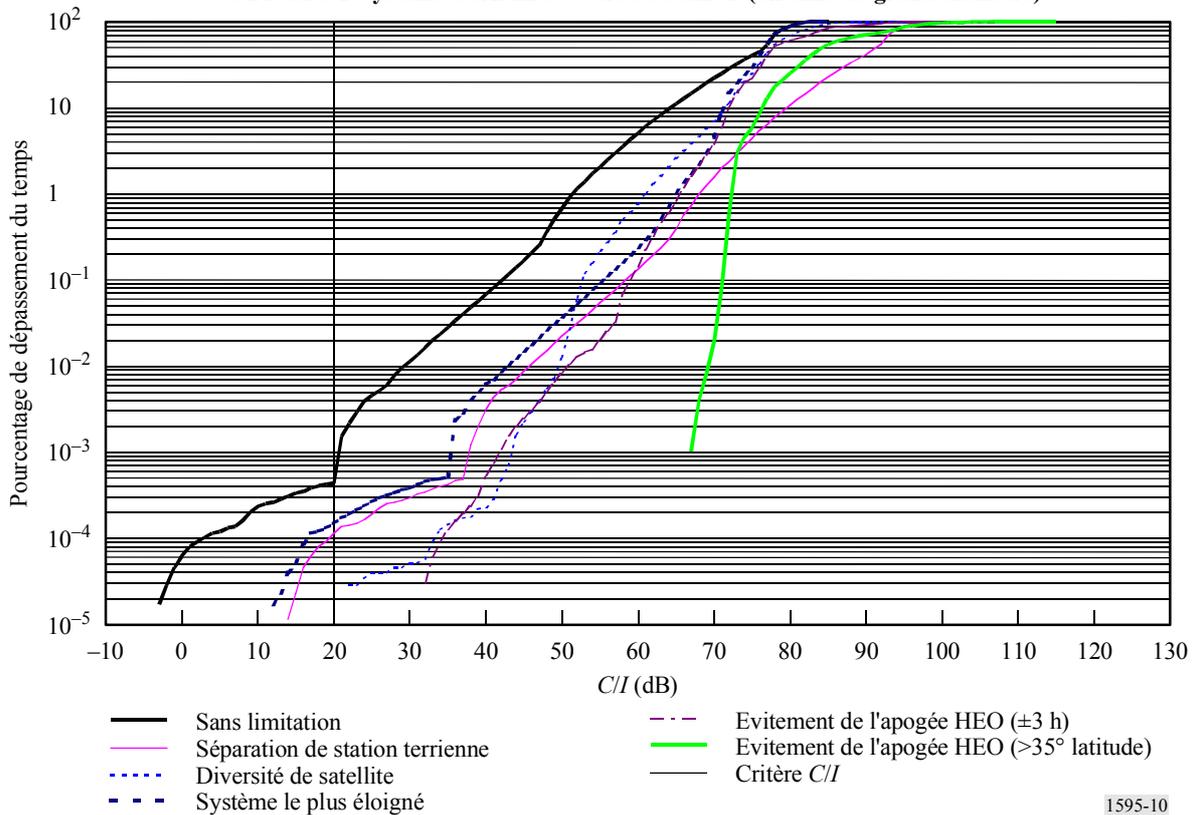


FIGURE 11
 CDF du C/I: système USAMEO-3 vers USCSID-P (antenne de petit diamètre)

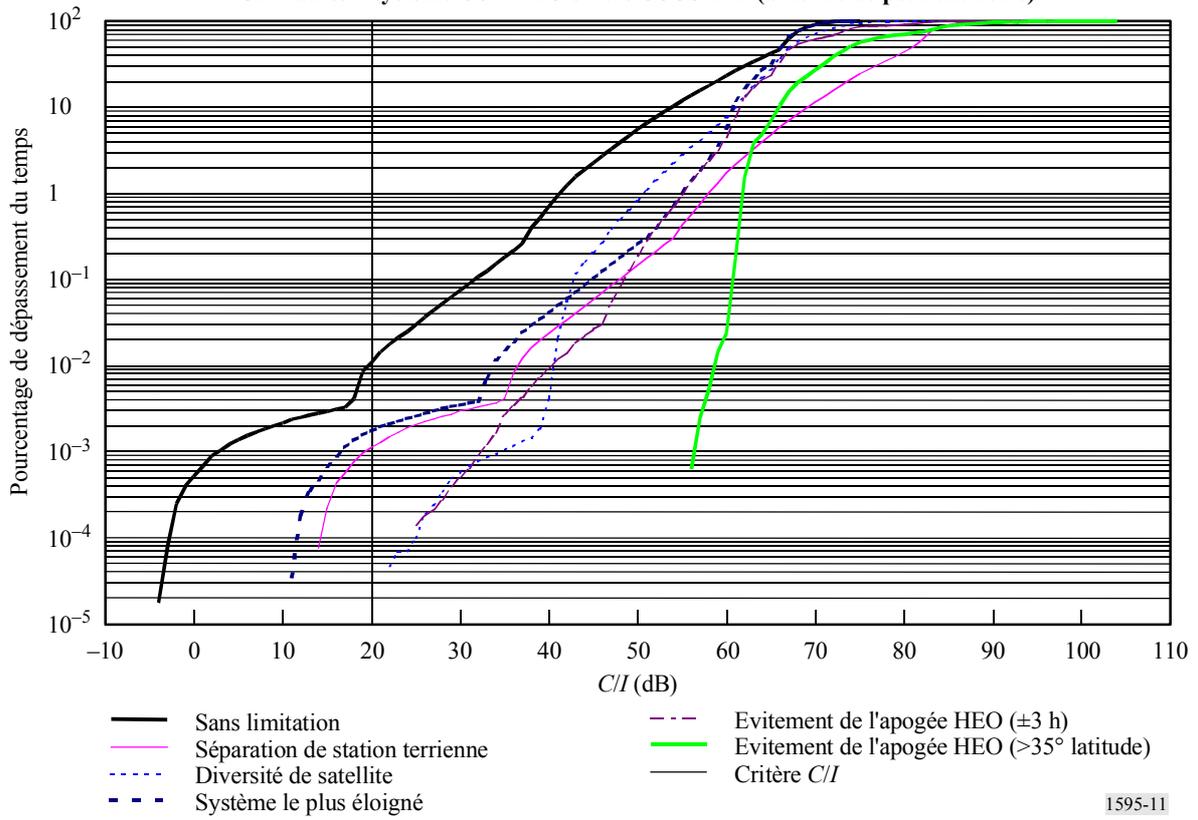


FIGURE 12
 CDF du C/I: système USCSID-P vers LEOSAT-1

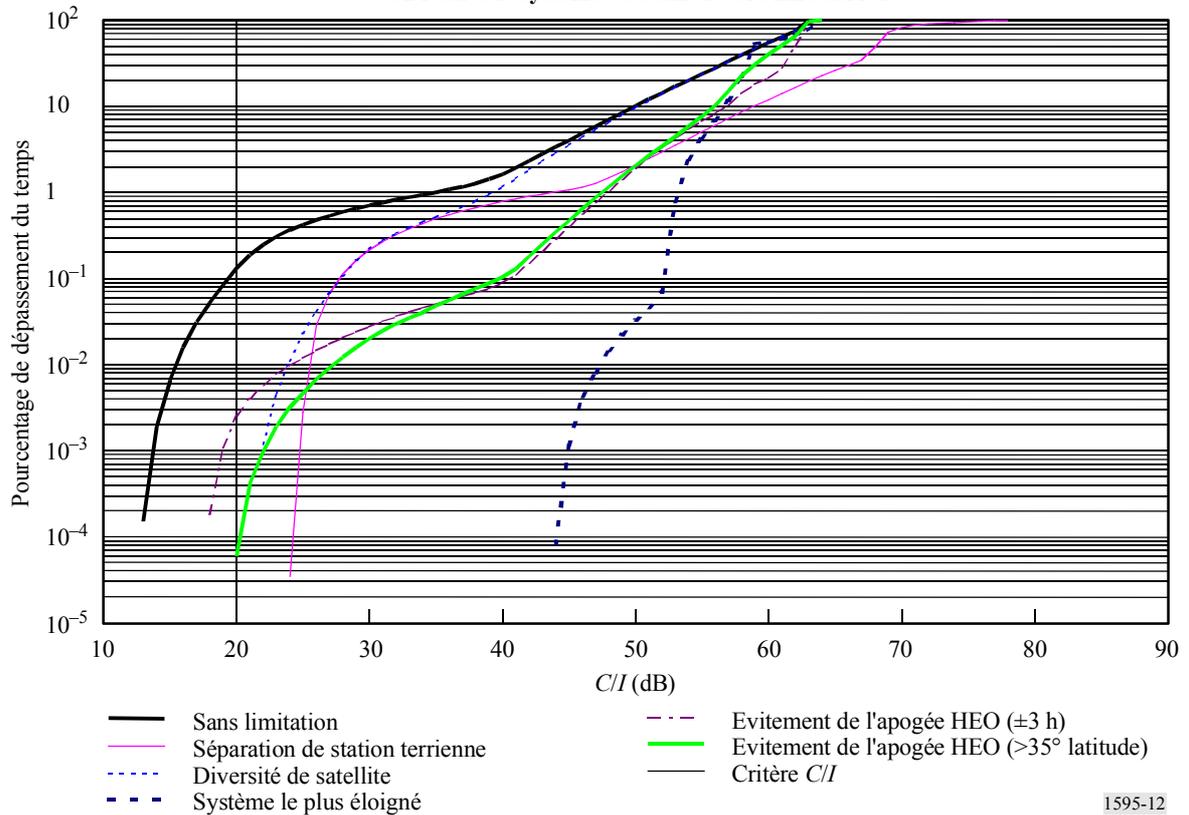
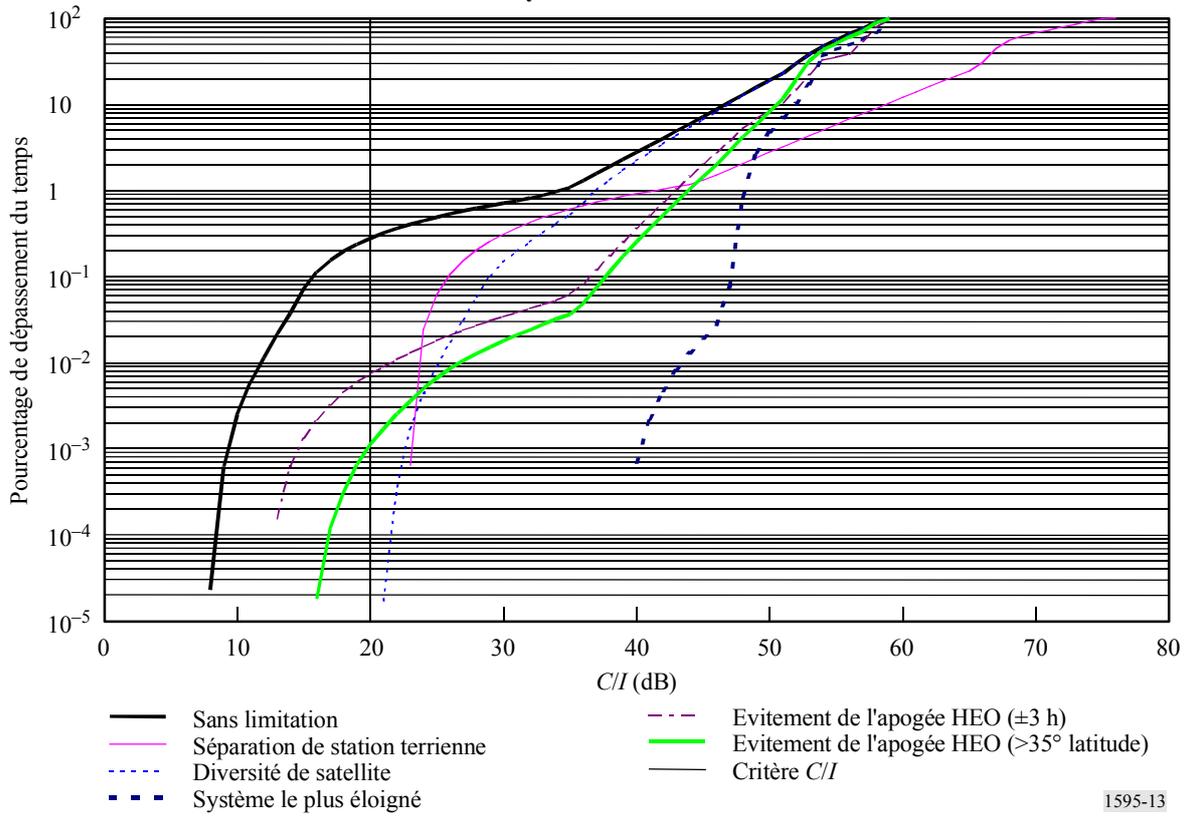


FIGURE 13

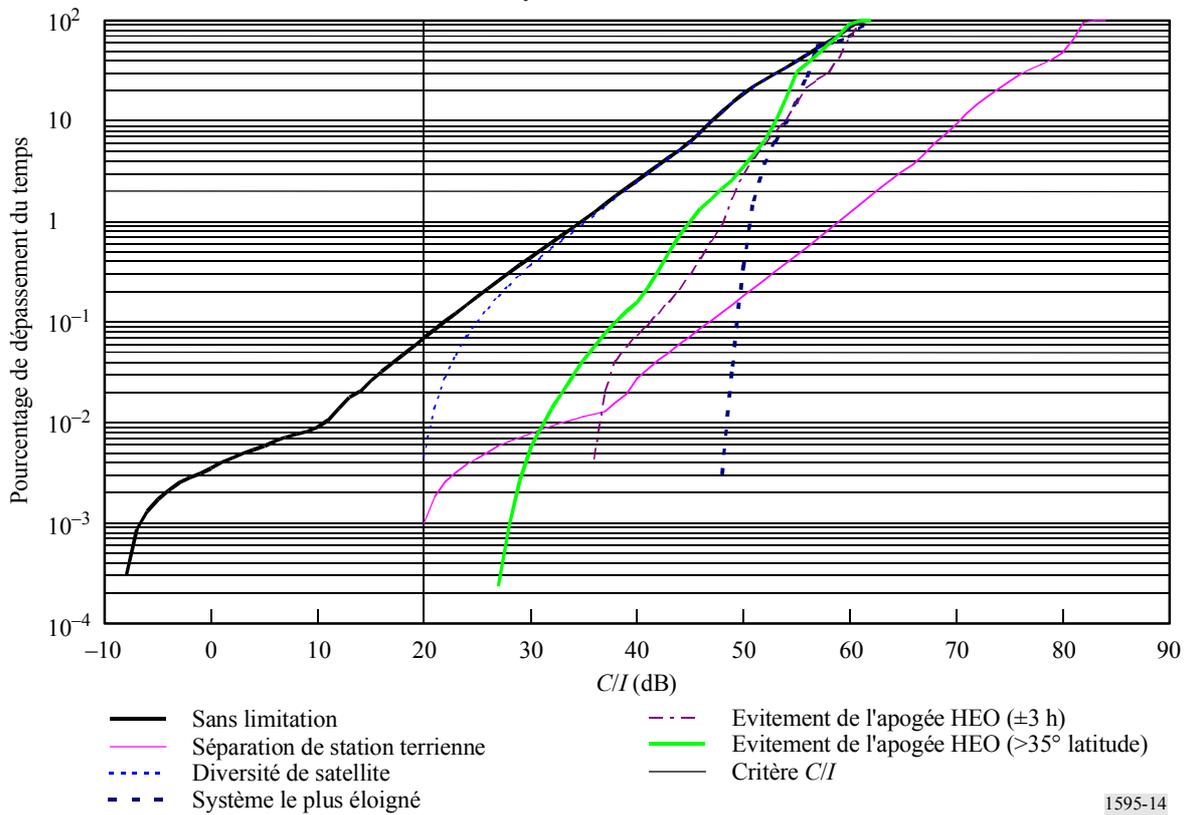
CDF du C/I: système USCSID-P vers LEOSAT-2



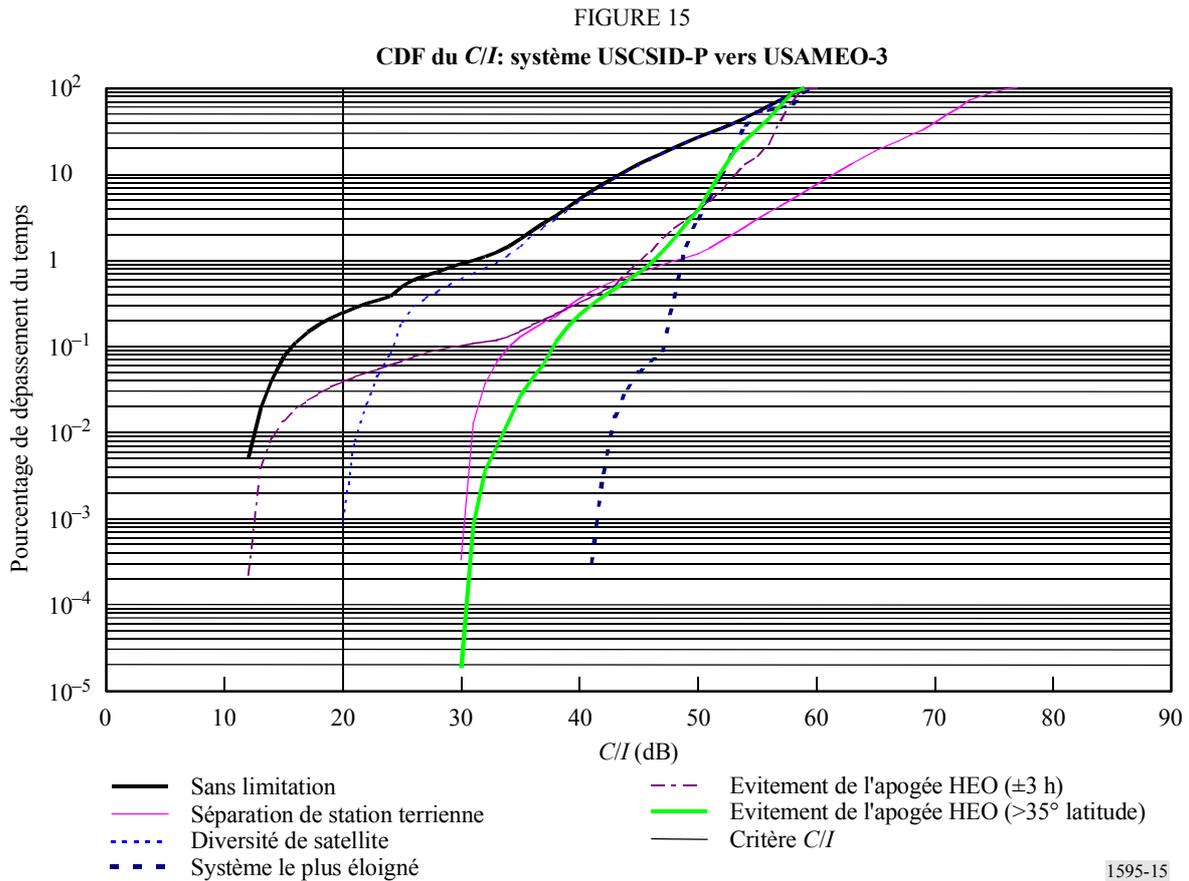
1595-13

FIGURE 14

CDF du C/I: système USCSID-P vers USAMEO-2



1595-14



3.1 Limitation au niveau des systèmes LEO et MEO en direction du système HEO

Comme les Fig. 4 à 15 le font apparaître, toutes les techniques de limitation des brouillages ont un certain effet et permettent de réduire les brouillages occasionnés au système USCSID-P ou émanant de ce système. Pour ce qui est des brouillages occasionnés aux systèmes HEO, les techniques les plus efficaces étaient la diversité de satellite (discrimination angulaire) et l'évitement de l'apogée HEO. Pour ce qui est de limiter les brouillages émanant du système HEO, les techniques les plus efficaces étaient la séparation de station terrestre, la diversité de satellite et le choix d'un autre satellite. Les paragraphes qui suivent traitent des résultats obtenus dans l'un et l'autre sens (limitation des brouillages provenant des systèmes LEO et MEO et reçus par le système HEO, puis limitation des brouillages émanant du système HEO et captés par chacun des systèmes LEO et MEO).

Les techniques de diversité de satellite et d'évitement de l'apogée HEO ont permis de limiter les brouillages émanant du système LEOSAT-1 à la valeur cible (Fig. 4 et 5). La discrimination angulaire requise pour que le système LEOSAT-1 respecte le critère C/I de 20 dB se chiffre à 18°. Comme la Fig. 16 le fait apparaître, cette valeur angulaire importante ramène la disponibilité d'un satellite donné de 100% à 93% et limite fortement la disponibilité de deux satellites (de 83% à 59%). Toutefois, la technique d'évitement de l'arc de service correspondant à l'apogée du système HEO (limitation du fonctionnement du système HEO à $\pm 3\text{ h}$ par rapport à l'apogée) ne ramène la disponibilité d'un satellite unique qu'à 94% et la disponibilité de deux satellites qu'à 68%. Lorsque l'apogée HEO est limité aux latitudes supérieures à 35°, la disponibilité d'un satellite unique est fortement limitée (69%). La technique d'évitement de l'apogée HEO avec un arc de service HEO aussi important ne serait d'ailleurs très vraisemblablement pas une option pour le système LEOSAT-1. Les Fig. 4 et 5 montrent également que les techniques de séparation de station terrestre et de sélection d'un autre satellite ne permettent pas de ramener les valeurs de brouillage à la valeur cible. Toutefois, les brouillages sont sensiblement réduits (environ 20 dB) avec chacune de ces techniques.

Les Fig. 6 et 7 montrent que toutes les techniques de limitation modélisées ramènent les valeurs des brouillages occasionnés par le système LEOSAT-2 au système USCSID-P à des valeurs inférieures au seuil retenu comme cible tout en n'ayant qu'un effet minimal sur la disponibilité des satellites. La discrimination angulaire requise est de 12° . La Fig. 17 montre que cette valeur angulaire relativement importante ramène la disponibilité d'un satellite unique de 100% à 99,9% et la disponibilité de deux satellites de 100% à 96%. Toutefois, la technique d'évitement de l'apogée HEO (exploitation du système HEO limitée à ± 3 h par rapport à l'apogée) ne réduit pas la disponibilité d'un satellite unique et ne ramène la disponibilité de deux satellites qu'à 97%. Lorsque l'apogée HEO est limitée aux latitudes supérieures à 35° , la disponibilité d'un seul et de deux satellites retombe respectivement à 96% et 69%. La technique de limitation par évitement de l'apogée HEO, avec un arc de service HEO relativement important, ne serait très vraisemblablement pas une option non plus pour réduire les brouillages occasionnés par le système LEOSAT-2. La technique de séparation de station terrienne a également donné de bons résultats dans le cas du système LEOSAT-2. Dans la simulation, lorsque l'on supprime la station terrienne située au même emplacement et les trois anneaux, le *C/I* est ramené à la valeur cible de 20 dB. Cette technique n'a aucune incidence sur la disponibilité des systèmes à satellites mais restreint l'emplacement et le nombre des stations terriennes du système LEOSAT-2. La dernière technique, celle de la sélection d'un autre satellite, a donné également de bons résultats dans le cas du système LEOSAT-2. Le *C/I* a été ramené très en dessous de la valeur cible et la disponibilité des satellites n'est pas affectée avec cette technique de limitation. Toutefois, le système LEOSAT-2 pourrait subir alors une certaine diminution de la qualité de service en raison du recours accru à des liaisons fonctionnant à des angles d'élévation moins importants.

Les Fig. 8 et 9 montrent que le *C/I* des émissions du système USAMEO-2, sans application de technique de limitation, est très proche de la valeur cible, et que toutes les techniques de limitation donnent de très bons résultats. La discrimination angulaire requise pour ramener le brouillage à la valeur cible n'est que de $0,1^\circ$. La Fig. 18 fait apparaître que cette faible valeur d'angle de discrimination ne réduit pas la disponibilité d'un seul ou de deux satellites et ne réduit la disponibilité de trois satellites que de 6%. Cette technique semble donc très efficace. La technique d'évitement de l'apogée HEO a également été très efficace dans la réduction des brouillages émanant du système USAMEO-2. Lorsque l'apogée HEO est limitée à ± 3 h, la disponibilité d'un seul satellite est ramenée de 100% à 95%, et la disponibilité de deux satellites de 87% à 75%. Lorsque la zone de service correspondant à l'apogée HEO est déterminée par les latitudes supérieures à 35° , la disponibilité d'un seul ou de deux satellites diminue de façon impressionnante, tombant respectivement à 69% et 51%. La technique d'évitement de l'apogée HEO ne serait probablement envisageable qu'avec le petit créneau de fonctionnement (± 3 h). La technique de séparation de station terrienne a également permis de ramener les brouillages à la valeur cible. Seule la station terrienne située au même emplacement a dû être supprimée, de sorte que l'incidence sur le système USAMEO-2 n'est pas très importante. La technique de limitation par sélection d'un autre satellite a donné de forts bons résultats et permis de ramener les brouillages à la valeur cible. Toutefois, le système USAMEO-2 pourrait avec cette technique présenter une baisse de qualité de service en raison de l'utilisation accrue de liaisons fonctionnant à des angles d'élévation relativement peu importants. Toutes les techniques de limitation étudiées pourraient donc être utilisées par le système USAMEO-2 dans le cadre d'une stratégie de limitation des brouillages occasionnés au système USCSID-P.

Les simulations effectuées avec le système USAMEO-3 (Fig. 10 et 11) montrent que seules les techniques de limitation par diversité de satellite et par évitement de l'apogée HEO permettent de ramener le *C/I* à la valeur seuil. Si les techniques de limitation par séparation de station terrienne et par choix d'un autre satellite n'ont pas permis de ramener le *C/I* à la valeur cible, ces deux dernières techniques ont bel et bien offert une importante possibilité de réduction du *C/I* (environ 15 dB). La valeur de discrimination angulaire requise pour que le système USAMEO-3 respecte le critère *C/I*

de 20 dB est d'ailleurs tout à fait raisonnable: $2,8^\circ$. Comme la Fig. 19 le fait apparaître, au moins deux satellites sont disponibles pendant 99% et non pas 100% du temps lorsque aucune technique de limitation n'est utilisée. La technique d'évitement de l'apogée HEO (dans les deux scénarios) est également très efficace et permet de ramener le C/I caractéristique du système USAMEO-3 à la valeur cible. La Fig. 19 montre que pendant 8% du temps de simulation aucun satellite ne serait disponible avec une zone de service HEO limitée à ± 3 h par rapport à l'apogée. Toutefois, lorsque l'on étend la zone de service, la disponibilité d'un seul satellite est sensiblement réduite (63%). Un pourcentage d'indisponibilité aussi important ne serait très vraisemblablement pas acceptable pour le système USAMEO-3.

3.2 Application des techniques de limitation au système HEO en direction des systèmes LEO et MEO

Les Fig. 12 et 13 illustrent les simulations effectuées dans le cas où les techniques de limitation sont appliquées au système USCSID-P en faveur des divers systèmes LEO et MEO, à l'exception de la technique d'évitement de l'apogée HEO. Cette technique s'applique aux systèmes de type LEO et MEO pour la protection d'un système HEO. Toutefois, lorsqu'elle est utilisée dans les systèmes LEO et MEO, ces systèmes bénéficient également d'une réduction du C/I du signal reçu du système HEO. Il convient aussi de noter que les simulations ont été également faites dans le cas où le système USCSID-P utilise la technique de diversité de satellite. Ce système, comme de nombreux systèmes HEO, n'est pas conçu pour appliquer cette technique; il ne dispose donc pas d'un nombre de faisceaux suffisants, et ne peut pas non plus traiter les algorithmes de commutation complexe requis. La simulation n'a été effectuée que pour montrer qu'un système de type HEO peut effectivement utiliser la technique de diversité de satellite s'il est conçu pour cela. La Fig. 20 montre que la diversité de satellite aurait peu d'effets sur la disponibilité des satellites du système USCSID-P si ce système pouvait fonctionner de cette manière.

La Fig. 12 montre que toutes les techniques, à l'exception de l'évitement de l'apogée HEO ± 3 h, permettent de réduire le C/I des émissions USCSID-P en direction du système LEOSAT-1. Un angle de discrimination de $2,7^\circ$ ramènera C/I à la valeur cible, avec une incidence peu importante au niveau de la disponibilité des satellites du système USCSID-P. Les configurations d'évitement de l'apogée HEO font également apparaître une réduction sensible du C/I dans le sens USCSID-P vers LEOSAT-1. La technique de sélection d'un autre satellite est la technique de limitation des brouillages la plus efficace. Pour ramener le C/I à la valeur seuil cible avec la technique de séparation de station terrienne, on a supprimé la station terrienne située au même emplacement ainsi qu'un anneau de la configuration LEOSAT-1. Cette suppression se traduirait par des restrictions concernant l'emplacement des stations terriennes du système LEOSAT-1 et du système USCSID-P, mais, du fait que le système USCSID-P ne prévoit pas des stations terriennes en nombre suffisant pour assurer une couverture totale, la technique ne serait pas excessivement contraignante.

La Fig. 13 expose les résultats de la limitation appliquée au système USCSID-P au bénéfice du système LEOSAT-2. On constate que la technique de limitation par sélection d'un autre satellite réduit sensiblement le C/I du signal brouilleur capté par le système LEOSAT-2 (d'environ 30 dB). L'angle de discrimination requis pour ramener le C/I à la valeur seuil retenue comme cible est de $3,3^\circ$, et la Fig. 20 montre une incidence assez faible sur la disponibilité des satellites du système USCSID-P. Bien que les configurations d'évitement de l'apogée HEO ne ramènent pas le C/I à la valeur cible, la réduction du C/I est significative. Pour parvenir à la valeur cible avec la séparation de station terrienne, on a supprimé la station terrienne située au même emplacement plus un anneau du système LEOSAT-2. Comme nous l'avons déjà vu au paragraphe précédent, cette intervention n'est pas nécessairement trop contraignante, du fait que le système USCSID-P ne prévoit pas des stations terriennes en nombre suffisant pour assurer une couverture totale.

La Fig. 14 montre que toutes les techniques de limitation simulées ont pour effet de réduire le C/I dans le sens USCSID-P vers USAMEO-2 et de ramener ce rapport à la valeur cible. La discrimination angulaire requise avec la diversité de satellite est de $1,7^\circ$, et cette technique n'a pas beaucoup d'incidence négative au niveau de la disponibilité des satellites du système USCSID-P. La séparation de station terrienne est efficace lorsque l'on supprime la station terrienne située au même emplacement plus trois anneaux du système USAMEO-2. On peut en déduire que cette technique de limitation pourrait être très contraignante pour ce système en raison de l'importance des distances de séparation.

La Fig. 15 montre que toutes les techniques considérées, à l'exception de l'évitement de l'apogée HEO avec un arc de service HEO limité à ± 3 h par rapport à l'apogée, sont efficaces et permettent de ramener le C/I du signal brouilleur capté par le système USAMEO-3 à la valeur cible. Ici encore, la technique de sélection d'un autre satellite réduit sensiblement le C/I (d'environ 30 dB). La discrimination angulaire requise pour ramener le C/I à 20 dB est de $2,6^\circ$, et cette faible valeur angulaire n'a aucune conséquence négative sur la disponibilité des satellites du système USCSID-P. La valeur cible est atteinte avec la technique de séparation de station terrienne lorsque l'on supprime la station terrienne située au même emplacement et un anneau du système USAMEO-3. Cette technique peut ne pas être excessivement contraignante, du fait que le système USCSID-P ne prévoit pas un nombre de stations terriennes suffisant pour assurer une couverture totale.

Le Tableau 5 résume les résultats obtenus. La configuration système brouilleur-système victime apparaît dans la colonne de gauche, et les colonnes suivantes correspondent aux différentes techniques de limitation simulées. Dans chaque cas, les chiffres représentent les pourcentages de temps de disponibilité d'au moins un satellite, tandis que la mention oui ou non précise si l'application de la technique considérée s'est traduite par une réduction du C/I en deçà de la valeur seuil fixée, et que la mention ND signifie que la technique de limitation n'a pas eu d'effet sur la disponibilité.

TABLEAU 5

Résumé des résultats

| | Sans limitation | Séparation de station terrienne | Diversité de satellite | Système le plus éloigné | Apogée HEO (± 3 h) | Apogée HEO ($>35^\circ$ latitude) |
|--------------------|-----------------|---------------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------------------|
| Brouilleur/Victime | Oui ou Non (%) | Oui ou Non (%) | Oui ou Non (%) | Oui ou Non (%) | Oui ou Non (%) | Oui ou Non (%) |
| LEOSAT-1/USCSID-P | 100/Non | ND/Non | 93/Oui | ND/Non | 94/Oui | 69/Oui |
| LEOSAT-2/USCSID-P | 100/Non | ND/Oui | 99,9/Oui | ND/Oui | 100/Oui | 96/Oui |
| USAMEO-2/USCSID-P | 100/Non | ND/Oui | 100/Oui | ND/Oui | 95/Oui | 69/Oui |
| USAMEO-3/USCSID-P | 100/Non | ND/Non | 100/Oui | ND/Non | 92/Oui | 63/Oui |
| USCSID-P/LEOSAT-1 | 100/Non | ND/Oui | 100/Oui | ND/Oui | 100/Non | 100/Oui |
| USCSID-P/LEOSAT-2 | 100/Non | ND/Oui | 100/Oui | ND/Oui | 100/Non | 100/Non |
| USCSID-P/USAMEO-2 | 100/Non | ND/Oui | 100/Oui | ND/Oui | 100/Oui | 100/Oui |
| USCSID-P/USAMEO-3 | 100/Non | ND/Oui | 100/Oui | ND/Oui | 100/Non | 100/Oui |

ND: non disponible

4 Conclusions

Toutes les techniques de limitation des brouillages exposées dans la présente Recommandation sont efficaces, et permettent de réduire les brouillages entre les systèmes LEO et MEO et le système HEO pris comme exemple. L'analyse fait apparaître que la technique de limitation des brouillages par diversité de satellite est plus contraignante pour les systèmes LEO que pour le système HEO et les systèmes MEO. L'angle requis pour obtenir la valeur cible retenue en ce qui concerne le C/I dépasse 10° pour les systèmes LEO alors qu'il est inférieur à 3° pour le système HEO et pour les

systèmes MEO. Bien que les angles de discrimination requis pour protéger les systèmes LEO et MEO des brouillages occasionnés par le système HEO soient peu importants, il n'est pas possible de recourir à la technique de diversité de satellite avec le système USCSID-P. La technique de diversité de satellite n'est envisageable que dans un système HEO conçu de telle sorte que plusieurs satellites soient en vue d'une station terrienne donnée pendant des périodes de temps prolongées. Cette technique impose par ailleurs des communications étroites entre les systèmes à satellites et une connaissance parfaite des lieux géographiques des satellites.

La technique d'évitement de l'apogée HEO permet de ramener les brouillages à des niveaux acceptables. Lorsque la zone de service correspondant à l'apogée du système HEO est limitée à ± 3 h autour de l'apogée, l'incidence, sur les systèmes LEO, est moins importante que celle de la technique de diversité de satellite. La couverture d'un seul satellite est ramenée à 94% dans ce cas, contre 93% avec la technique de diversité de satellite pour ce qui est du système LEOSAT-1, tandis que, avec le système LEOSAT-2, les résultats obtenus sont respectivement une réduction nulle et une réduction de 1% (99%). Pour les systèmes MEO, l'incidence est plus sensible, la couverture d'un seul satellite étant ramenée à 95% contre 100% dans le cas du système USAMEO-2 et 92% contre une réduction nulle dans le cas du système USAMEO-3. Ces résultats s'expliquent essentiellement par le fait que les systèmes MEO imposent des angles d'évitement beaucoup plus faibles que les systèmes LEO lorsque l'on cherche à ramener le C/I à la valeur cible. La situation change lorsque la zone de service du système HEO est étendue aux latitudes supérieures à 35° . L'incidence sur tous les systèmes est alors très sensible, la couverture d'un seul satellite pouvant retomber à 63% dans certains cas. Ce type de scénario opérationnel HEO ne pourrait pas être retenu avec la technique d'évitement de l'apogée. L'avantage de la technique d'évitement de l'apogée HEO est que, si l'on évite la totalité de la zone de service du système HEO, les brouillages occasionnés à ce système deviennent acceptables tandis que les brouillages occasionnés aux systèmes auxquels la technique de limitation est appliquée diminuent également sans qu'il soit nécessaire de connaître l'emplacement spécifique des satellites du système HEO. Toutefois, dans certains cas, l'incidence sur le système non OSG du SFS auquel est appliquée la technique de brouillage peut être très importante et imposer, sans aucun doute, des ressources additionnelles.

La technique de séparation de station terrienne a permis de ramener les brouillages à la valeur requise dans plusieurs des scénarios. Cette technique peut être excessivement contraignante lorsque les deux systèmes non OSG doivent présenter une couverture de stations terriennes totale. Toutefois, dans les exemples donnés, la technique réduit effectivement les brouillages lorsque l'un des systèmes ne prévoit pas une couverture de stations terriennes totale et que la distance de séparation entre les stations terriennes des systèmes non OSG n'est pas trop importante.

La technique de limitation par sélection d'un autre satellite est très efficace lorsque l'on cherche à réduire les brouillages occasionnés par le système HEO aux systèmes LEO et MEO. Toutefois, en sens inverse, les résultats sont mitigés. La technique a donné une réduction suffisante des brouillages émanant du système LEOSAT-2 et du système USAMEO-2 mais non pas des brouillages occasionnés par le système LEOSAT-1 ou le système USAMEO-3. Cette technique de limitation peut entraîner une diminution de la qualité du service assuré par le système auquel elle est appliquée, phénomène résultant alors du recours accru à des liaisons caractérisées par des angles d'élévation peu importants.

L'application d'une seule technique de limitation peut ne pas suffire à ramener les brouillages à des niveaux satisfaisants dans toutes les situations. Une combinaison de deux techniques de limitation différentes pourra dans certains cas donner des résultats suffisants dans de meilleures conditions d'efficacité, et avec moins de contraintes, qu'une technique appliquée isolément. Les résultats de nos exemples de simulation font apparaître que chaque situation de partage est spécifique et dépend des caractéristiques opérationnelles et techniques des systèmes considérés. Dans certains cas, la meilleure manière de déterminer la ou les techniques de limitation optimales entre deux systèmes non OSG du SFS donnés, dont un est un système HEO, consistera peut-être à rechercher la solution dans le cadre de la coordination entre ces systèmes.

FIGURE 16

Nombre de satellites du système LEOSAT-1 disponibles

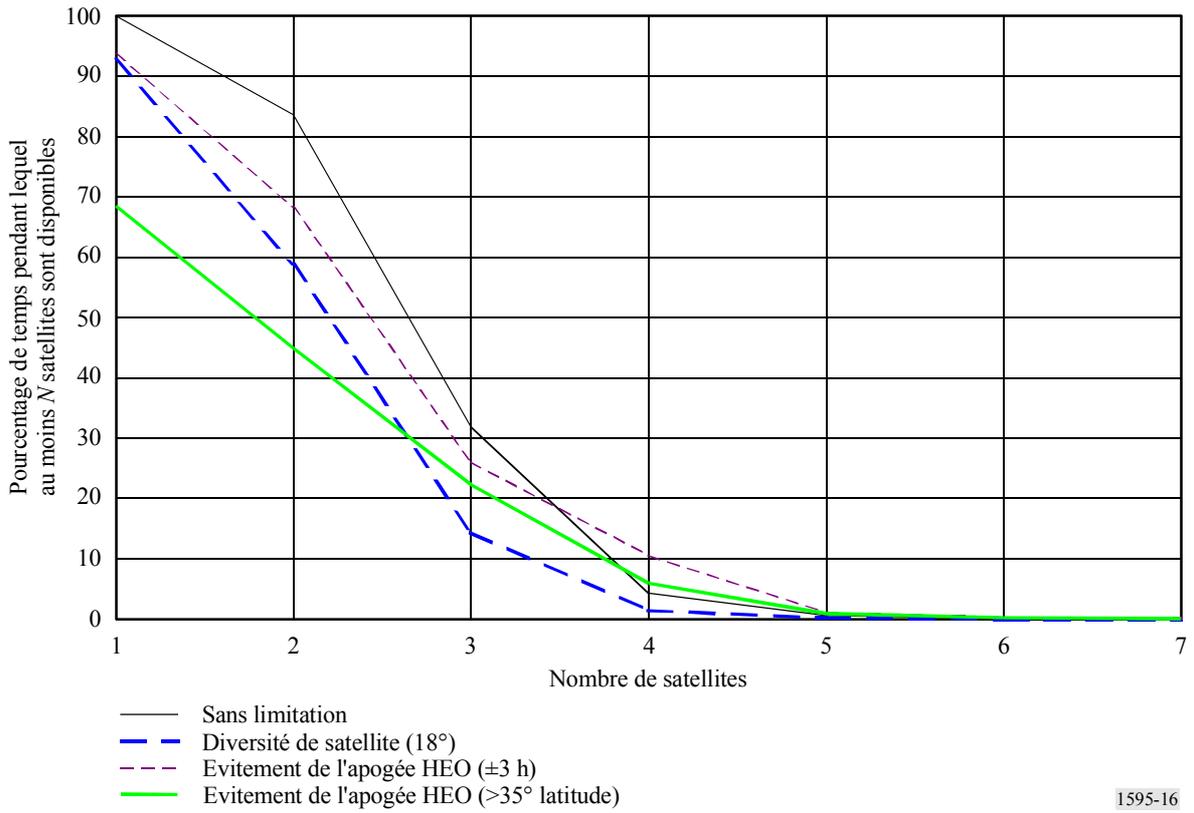


FIGURE 17

Nombre de satellites du système LEOSAT-2 disponibles

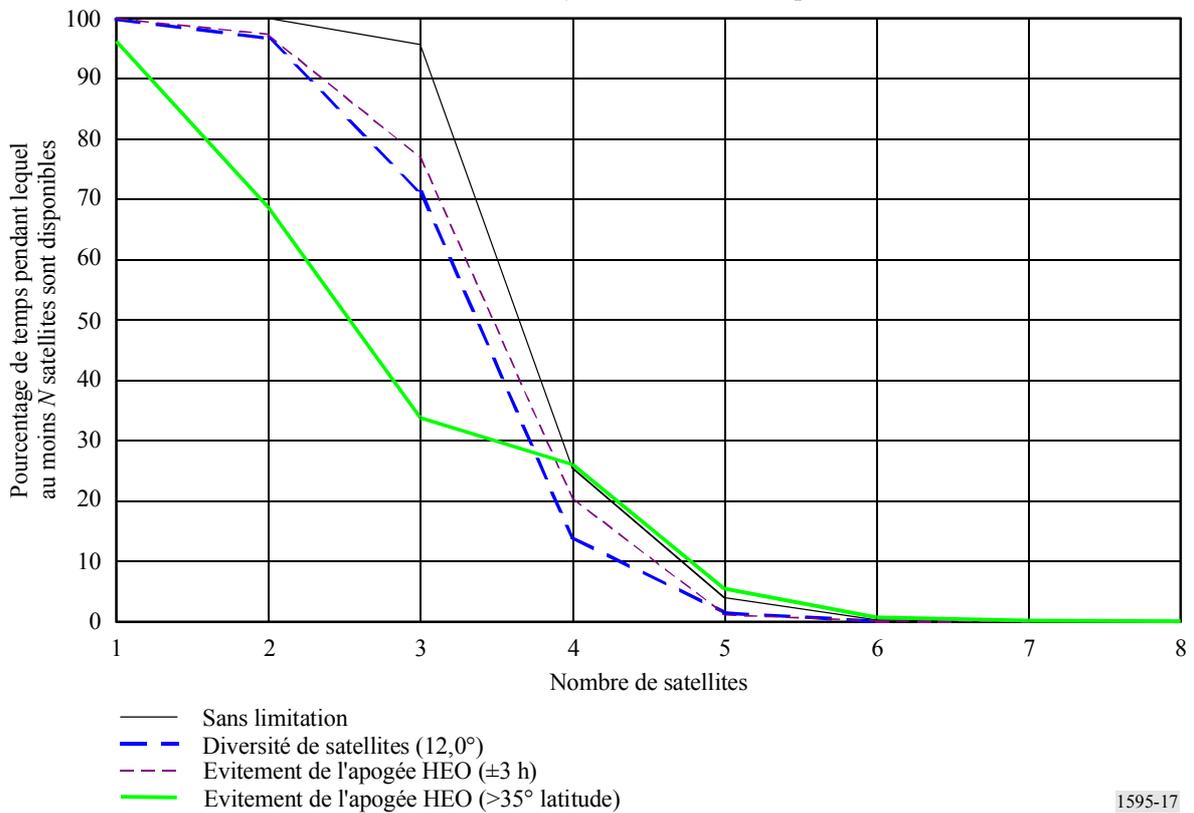


FIGURE 18

Nombre de satellites du système USAMEO-2 disponibles

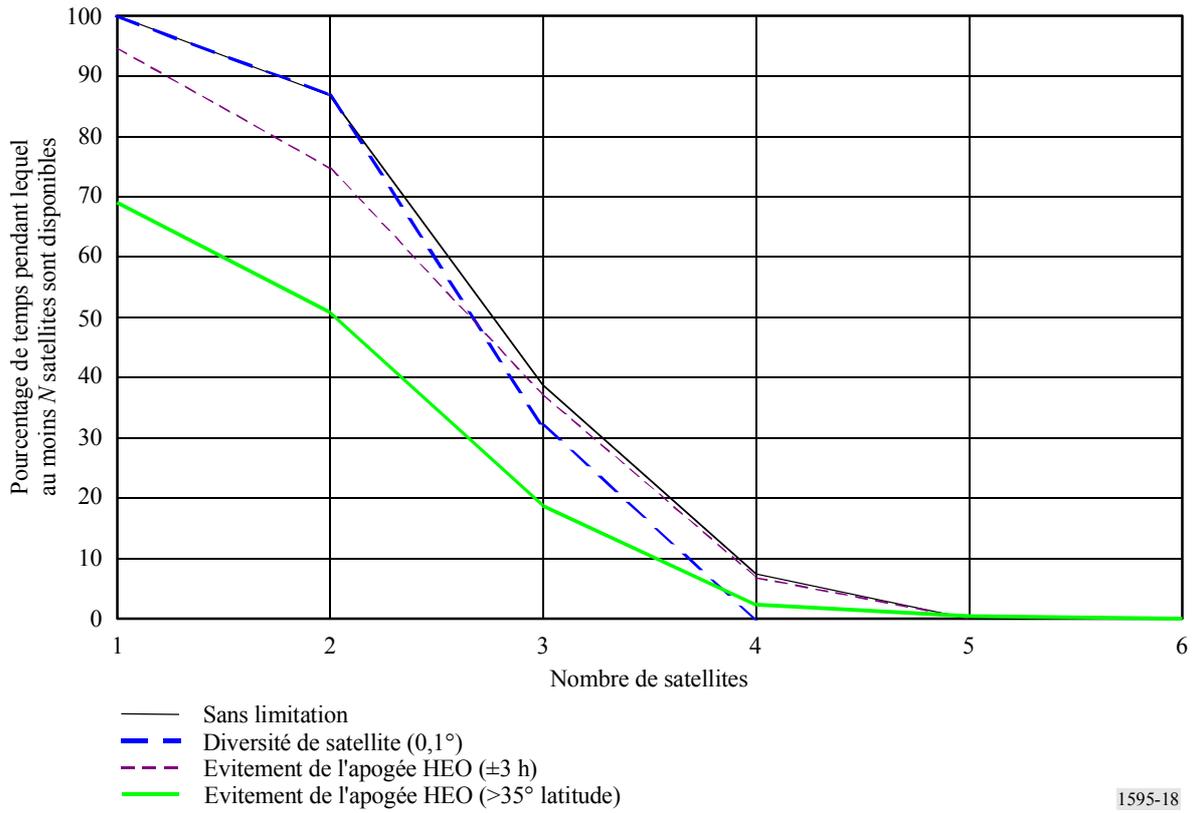


FIGURE 19

Nombre de satellites du système USAMEO-3 disponibles

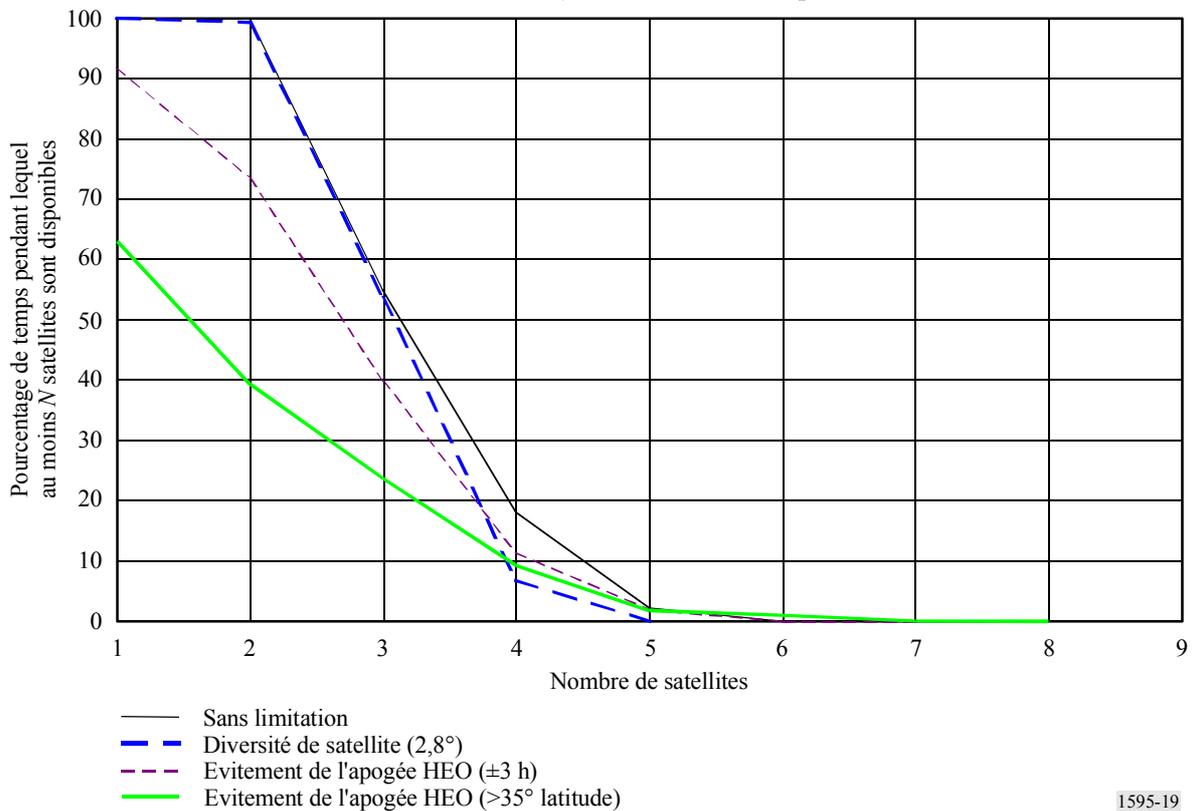


FIGURE 20

Nombre de satellites du système USCSID-P disponibles

