

## RECOMMANDATION UIT-R SA.1416\*

**PARTAGE ENTRE DES DÉTECTEURS PASSIFS SPATIOPORTÉS DU SERVICE D'EXPLORATION DE LA TERRE PAR SATELLITE ET LE SERVICE INTERSATELLITES AU VOISINAGE DE 118 ET 183 GHz**

(Question UIT-R 228/7)

(1999)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

*considérant*

- a) que la Résolution 723 (CMR-97) a pour objet l'attribution aux services passifs de bandes de fréquences supérieures à 71 GHz;
- b) que la Recommandation UIT-R SA.515 indique qu'il est nécessaire de recourir à la bande 115-122 GHz pour obtenir des profils verticaux de température au moyen de détecteurs passifs spatioportés;
- c) que la Recommandation UIT-R SA.515 indique qu'il est nécessaire de recourir à la bande 175-192 GHz pour obtenir des profils verticaux de vapeur d'eau au moyen de détecteurs passifs spatioportés;
- d) que les prévisions météorologiques sont essentielles pour l'ensemble des activités économiques et jouent également un rôle prédominant dans la rapide identification des phénomènes présentant un danger potentiel, permettant dans ce cas de donner rapidement l'alerte;
- e) que les profils de température atmosphérique et de vapeur d'eau sont des données essentielles nécessaires, à l'échelle planétaire, aux prévisions météorologiques;
- f) que la bande d'absorption de l'oxygène au voisinage de 118 GHz et la bande d'absorption de la vapeur d'eau autour de 183 GHz représentent une ressource naturelle unique pour la télé-détection de profils de température et de vapeur d'eau dans l'atmosphère;
- g) que les mesures passives susmentionnées sont extrêmement sensibles au brouillage en raison de la variabilité naturelle de l'atmosphère, qui empêche de déterminer et de filtrer les mesures altérées par le brouillage;
- h) que les mesures de télé-détection passives altérées peuvent avoir une incidence négative extrêmement importante sur les études climatologiques et la qualité des prévisions météorologiques,

*reconnaissant*

- a) que les bandes 116-126 GHz, 174,5-182 GHz et 185-190 GHz sont actuellement attribuées au service intersatellites (SIS);
- b) que la Recommandation UIT-R SA.1029 spécifie les critères de brouillage à appliquer pour les détecteurs passifs fonctionnant dans les bandes 115-122 GHz et 175-192 GHz;
- c) que les études réalisées dans les bandes 116-122 GHz, 174,5-182 GHz et 185-190 GHz ont démontré que les liaisons intersatellites (LIS) dans un système à satellites non géostationnaires (non OSG) peuvent provoquer, au niveau des détecteurs passifs, un brouillage considérablement supérieur à ce qui est défini par les critères de protection susmentionnés (voir l'Annexe 1);
- d) que les études réalisées dans ces bandes ont démontré que les LIS des systèmes à satellites OSG peuvent partager la bande de fréquences utilisée avec des détecteurs passifs à condition que la puissance surfacique produite par les satellites OSG à l'altitude orbitale du détecteur soit limitée de manière appropriée (voir l'Annexe 1);
- e) que le numéro S9.7 du Règlement des radiocommunications spécifie que les stations spatiales utilisant l'orbite des satellites géostationnaires doivent prendre en compte les autres systèmes de radiocommunications spatiales et assurer une coordination avec ces systèmes,

*recommande*

- 1** que, compte tenu des § b) et c) du *reconnaissant*, les détecteurs passifs et les LIS des systèmes à satellites non OSG ne fonctionnent pas aux mêmes fréquences dans les bandes 116-122 GHz, 174,5-182 GHz et 185-190 GHz;

---

\* Cette Recommandation doit être portée à l'attention de la Commission d'études 4 des radiocommunications.

2 que, compte tenu du § d) du *reconnaisant*, les détecteurs passifs et les LIS des systèmes à satellites OSG puissent partager la bande 116-122 GHz à condition que la puissance surfacique produite par une station SIS n'excède pas la valeur de  $-148 \text{ dB(W/(m}^2 \cdot 200 \text{ MHz))}$  et cela pour tous les angles d'incidence et toutes les altitudes comprises entre 0 et 1 000 km au-dessus de la surface de la Terre au voisinage de toutes les positions orbitales géostationnaires occupées par des c détecteurs passifs, quelles que soient les conditions et les méthodes de modulation;

3 que, compte tenu des § d) et e) du *reconnaisant*, les détecteurs passifs et les LIS des systèmes à satellites OSG puissent partager les bandes 174,5-182 GHz et 185-190 GHz à condition que la puissance surfacique produite par une station du SIS n'excède pas la valeur de  $-144 \text{ dB(W/(m}^2 \cdot 200 \text{ MHz))}$  et cela pour tous les angles et toutes les altitudes comprises entre 0 et 1 000 km au-dessus de la surface de la Terre au voisinage de toutes les positions orbitales géostationnaires occupées par des détecteurs passifs, quelles que soient les conditions et les méthodes de modulation.

## ANNEXE 1

### Faisabilité du partage entre le service d'exploration de la Terre par satellite (SETS) (détecteurs passifs spatioportés) et le SIS au voisinage de 118 et 183 GHz

#### 1 Introduction

Les bandes de fréquences proches de 118 et 183 GHz sont attribuées à titre primaire au SETS pour la télédétection passive, comme indiqué au Tableau 1. Les fréquences proches de 118 GHz sont partagées avec d'autres services. Au voisinage de 183 GHz, les services passifs fonctionnent dans une bande qui leur est attribuée en exclusivité. Il a été établi qu'il était nécessaire, dans cette bande, d'étendre la gamme des fréquences dans laquelle des mesures passives peuvent être effectuées et il est donc possible que les détecteurs passifs doivent partager des fréquences avec des services actifs fonctionnant dans les bandes adjacentes. Il est essentiel d'étudier le partage des fréquences:

- pour déterminer si le partage actuellement applicable à 118 GHz protège les détecteurs passifs de manière appropriée; et
- pour déterminer si l'extension de la gamme de fréquences dans laquelle les détecteurs passifs fonctionnent au voisinage de 183 GHz poserait éventuellement un problème de partage avec d'autres services.

TABLEAU 1

#### Attribution au SETS de fréquences dans la bande 116-126 GHz et au voisinage de 183 GHz

Bande de fréquences (GHz)	Attribution aux services (à l'échelle mondiale)
116-126	SERVICE D'EXPLORATION DE LA TERRE PAR SATELLITE (PASSIF) FIXE INTERSATELLITES MOBILE RECHERCHE SPATIALE (PASSIF)
174,5-176,5	SERVICE D'EXPLORATION DE LA TERRE PAR SATELLITE (PASSIF) FIXE INTERSATELLITES MOBILE RECHERCHE SPATIALE (PASSIF)
176,5-182	FIXE INTERSATELLITES Mobile
182-185	SERVICE D'EXPLORATION DE LA TERRE PAR SATELLITE (PASSIF) RADIOASTRONOMIE RECHERCHE SPATIALE (PASSIF)
185-190	FIXE INTERSATELLITES MOBILE

## 2 Caractéristiques de l'équipement

### 2.1 Détecteurs passifs

#### 2.1.1 Détecteurs à balayage en orbite terrestre basse (LEO)

Le détecteur passif LEO utilisé dans la présente analyse est modélisé à partir du détecteur hyperfréquence perfectionné (AMSU, *advance microwave sensing unit*). Le détecteur AMSU-B est déjà en service à 183 GHz et représente la technique actuellement utilisée en matière de détecteurs hyperfréquence.

Le fonctionnement du détecteur est fortement tributaire d'une antenne à balayage mécanique. Le réflecteur se déplace à l'intérieur d'une coiffe cylindrique, dans laquelle est ménagée une ouverture qui permet à l'antenne de recevoir des rayonnements à  $\pm 50^\circ$  environ de la surface de la Terre et dans le ciel nocturne jusqu'à environ  $85^\circ$  du nadir. L'antenne effectue un balayage de la Terre, pointe vers le ciel pour une mesure d'étalonnage à froid et se déplace ensuite à l'intérieur de la coiffe pour une mesure d'étalonnage à chaud. L'angle auquel l'antenne effectue la mesure à froid est limité par le limbe de la Terre et par la surface de la coiffe nécessaire à la mesure à chaud. L'étalonnage sert à mesurer le gain du système récepteur. Le système de balayage du détecteur AMSU présente un avantage sur les autres systèmes en ce sens que tous les éléments récepteurs demeurent identiques, qu'il s'agisse de mesures atmosphériques ou de mesures d'étalonnage.

Cette méthode de balayage et d'étalonnage est utilisée sur les détecteurs LEO. L'orbite étant héliosynchrone, le détecteur peut toujours effectuer une mesure à froid au même emplacement par rapport à l'engin spatial. La plupart des autres arrangements risqueraient d'avoir pour effet que l'antenne d'étalonnage pointe vers le soleil et ne produise pas de mesures à froid.

#### 2.1.2 Détecteurs en orbite géostationnaire

Il a été proposé de recourir à des détecteurs fonctionnant en orbite géostationnaire. Un type d'antenne à balayage similaire au détecteur AMSU balayerait la partie visible de la Terre à environ  $\pm 8^\circ$  par rapport au nadir de l'engin spatial. Si un tel détecteur utilise l'espace froid pour l'étalonnage, il pourrait pointer son antenne de balayage loin de la Terre de manière similaire au détecteur AMSU ou pointer une antenne séparée vers tout emplacement approprié en vue de l'étalonnage. L'antenne d'étalonnage à froid doit éviter non seulement la Terre mais aussi le Soleil et il est préférable qu'elle évite la Lune. Placé en orbite héliosynchrone, le détecteur AMSU peut effectuer des étalonnages au même emplacement par rapport à l'engin spatial et éviter systématiquement de pointer vers le Soleil. Si le satellite géostationnaire pointe vers tout endroit du plan orbital, il est probable qu'à un moment donné, il pointera vers le Soleil ou la Lune et altérera les mesures effectuées à froid. On suppose donc que le satellite géostationnaire pointe l'antenne d'étalonnage à froid dans une certaine direction qui permet d'éviter que l'antenne ne pointe vers un endroit proche du Soleil, de la Terre ou de la Lune. Le fonctionnement de l'antenne d'étalonnage est le moins affecté lorsque l'antenne est pointée perpendiculairement au plan équatorial. L'antenne d'étalonnage pointe donc à au moins  $67^\circ$  par rapport à l'écliptique, là où le gain directionnel serait relativement faible.

#### 2.1.3 Détecteurs en peigne

À l'heure actuelle, aucun détecteur en peigne n'est en service et aucune méthode d'étalonnage n'a été minutieusement définie. Dans la réalité, on peut considérer que le détecteur en peigne est constitué d'une série de petits faisceaux d'antenne situés le long de la trace de l'engin spatial. Comme les soies d'une brosse, les multiples faisceaux balayent le long de la trace. Un tel système n'est pas mécanique: chaque faisceau d'antenne est fixe. Par conséquent, les faisceaux qui pointent vers la Terre ne peuvent pas être utilisés pour l'étalonnage à froid. Si l'on utilise une antenne séparée, elle n'est pas soumise à des contraintes comme c'est le cas pour l'antenne du détecteur AMSU en ce qui concerne le gain ou l'angle d'étalonnage. L'unique contrainte est le fait qu'elle doit pointer vers l'espace froid. Pour les orbites héliosynchrones, la meilleure direction est celle qui s'éloigne du Soleil, c'est-à-dire celle dans laquelle pointe le détecteur AMSU. Toutefois, le détecteur en peigne peut fonctionner seulement avec des angles supérieurs à la limite de  $85^\circ$  imposée par la coiffe du détecteur AMSU.

#### 2.1.4 Détecteurs de limbosondage

Les détecteurs de limbosondage ont des caractéristiques différentes de celles du détecteur AMSU-B, mais ne sont pas traités dans la présente étude.

#### 2.1.5 Caractéristiques des détecteurs

Les caractéristiques des détecteurs sont indiquées au Tableau 2 pour les détecteurs AMSU et OSG. Deux modes de fonctionnement sont étudiés:

- le mode balayage; et
- le mode étalonnage.

Pour les deux modes, les angles de pointage sont indiqués dans le Tableau 2.

TABLEAU 2  
Caractéristiques des détecteurs passifs

Paramètre	AMSU-B	OSG
Gain du lobe principal de l'antenne (dBi)	45	66
Gain des lobes arrières de l'antenne (dBi)	-14	-14
Ouverture à mi-puissance du faisceau (degrés)	1,15	0,102
Plage d'altitudes du détecteur (km)	500 à 1 000 850 (valeur nominale)	35 786
Critères de brouillage par largeur de bande (dB(W/200 MHz))	-160	-160
Angles de balayage pour les mesures (par rapport au nadir) (degrés)	$\pm 50$	$\pm 8$
Angle d'étalonnage à froid (par rapport au plan orbital) (degrés)	$90 \pm 4$	90
Plage des angles d'étalonnage à froid (par rapport au nadir) (degrés)	65 à 85 83 (valeur nominale)	90 (valeur nominale)

Dans la pratique, les détecteurs LEO fonctionnent dans une plage comprise entre 500 et 1 000 km environ. Les systèmes de détection actuellement en service ou planifiés qui fonctionnent dans cette bande ont une orbite d'une altitude nominale de 833 km. Toutefois, l'altitude des orbites occupées par les systèmes actuellement en service peut varier dans une plage allant jusqu'à 20 km.

## 2.2 Systèmes intersatellites

### 2.2.1 Systèmes modélisés

On trouvera au Tableau 3 les caractéristiques d'un système intersatellites modélisé dans la présente étude. On suppose qu'il s'agit d'un système numérique à large bande doté d'un débit binaire de 200 Mbit/s, qui a été choisi en fonction de la largeur de bande de référence du détecteur. Cette étude traite également des systèmes à bande plus large dont la puissance est proportionnellement plus élevée.

TABLEAU 3  
Paramètres des LIS

Paramètre	Valeur
Gain du lobe principal de l'antenne (dBi)	45, 50, 55 ou 60
Gain des lobes arrières de l'antenne (dBi)	-10
Température de bruit du système (K)	2 000 à 118 GHz et 3 000 à 183 GHz
Critère de qualité de fonctionnement de la liaison, rapport $C/N$ (dB)	12

La qualité de fonctionnement de la liaison est choisie en fonction d'un rapport porteuse/bruit,  $C/N$  de 12 dB. Y sont également compris un rapport  $E_b/N_0$  de 10 dB pour une modulation MDP-4 et une perte de mise en œuvre de 2 dB. La température de bruit du système est déterminée à partir de la conception des LIS dans les bandes inférieures et des récepteurs construits pour le détecteur AMSU-B. Des gains d'antenne compris entre 45 et 60 dBi sont étudiés. En règle générale, l'antenne de 45 dBi est choisie pour les liaisons à basse altitude et le gain d'antenne plus élevé de 55 ou 60 dBi est choisi pour les liaisons à haute altitude et plus longues. Les diagrammes des lobes latéraux de l'antenne sont modélisés selon le modèle d'antenne à alimentation unique et à faisceau circulaire décrit dans la Recommandation UIT-R S.672.

L'étude a porté uniquement sur les détecteurs à balayage et les systèmes intersatellites en orbite circulaire. Les LIS sont limitées à un réseau de satellites de même altitude orbitale.

### 2.2.2 Systèmes en service dans d'autres bandes

Aucun système intersatellites connu ne fonctionne actuellement dans les bandes examinées dans cette étude. Dans le cadre de l'UIT, le Bélarus, la Malaisie et les Etats-Unis d'Amérique ont notifié à l'avance leur intention d'exploiter des systèmes espace-espace dans la bande 116-126 GHz. Aucune notification préalable n'a été faite pour les LIS au voisinage de 183 GHz. Dans les autres bandes, la plupart des liaisons ont lieu en orbite OSG ou en LEO à une altitude nominale comprise entre 700 et 800 km. Quelques systèmes fonctionnent au-dessus du détecteur à des orbites comprises entre 1 000 et 10 350 km. Ces systèmes font appel à plusieurs constellations de satellites qui leur permettent d'assurer une couverture complète de la Terre.

Le Tableau 4 énumère plusieurs constellations de satellites LIS non OSG actuellement en service ou proposées. Les angles géocentriques sous-tendus par les liaisons sont indiqués pour chaque constellation.

TABLEAU 4

#### Exemples de constellations de satellites non OSG

Système	Nombre d'orbites	Nombre de satellites par orbite	Séparation sur la même orbite (degrés)	Séparation entre les orbites (degrés)	Altitude orbitale (km)
Système A	6	11	32,7	60	780
Système B	3	4	90	120	10 350
Système C	8	6	60	45	1 414
Système D	4	8	45	90	775
Système E	21	40	9	17,1	700
Système F	6	8	45	60	950
Système G	4	6	60	90	800
Système H	2	5	72	180	500
Système I	6	4	90	60	1 000

En règle générale, on observe un espacement non uniforme des satellites dans les systèmes à satellites OSG existants ou en projet qui fonctionnent dans d'autres bandes. Par exemple, on peut constater qu'un système présente cinq liaisons caractérisées par des angles géocentriques variables: 149°, 31°, 85°, 85° et 125°. Le Tableau 5 montre l'espacement longitudinal maximal ainsi que les gains d'antenne pour dix constellations OSG.

TABLEAU 5

#### Paramètres des systèmes intersatellites OSG donnés en exemple

Système	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Gain d'antenne (dBi)	58,5	59	58	46	55,5	60,3	53	50,3	49,1	55,7
Espacement longitudinal maximal (degrés)	162,6	162,6	78,6	10,1	67,3	162,6	53,9	111,1	77,4	136,4

### 3 Méthode utilisée

La présente étude tient compte de nombreux paramètres pour les constellations LIS et détermine quelles restrictions appliquées à ces paramètres permettraient d'assurer le partage du même canal. Un tel partage n'est réalisable que si les restrictions relatives aux paramètres LIS permettent de mettre au point des systèmes analogues aux systèmes prévus pour d'autres bandes.

Deux critères déterminent le brouillage qui est inacceptable pour le service (passif) d'exploration de la Terre par satellite. Le premier critère concerne un seuil de brouillage de  $-160$  dB(W/200 MHz). On considère comme inacceptable un brouillage supérieur à ce niveau. Un tel niveau de puissance correspond à 20% de la sensibilité du détecteur (Recommandation UIT-R SA.1029). Le brouillage causé au-dessus de ce niveau accroîtra la valeur de température indiquée par le satellite et altérera à long terme les moyennes de température. Une valeur supplémentaire de  $-3$  dB sera ajoutée à la sensibilité pour prendre en compte le partage entre les services spatiaux et les services de Terre. Le deuxième critère est d'ordre temporel et s'applique lorsque le premier critère, le niveau de seuil, est dépassé. Le brouillage ne devrait pas dépasser le seuil pendant plus de 0,01% du temps. Ce pourcentage est indiqué dans le § 4 du *recommande* de la Recommandation UIT-R SA.1029.

#### 3.1 Plan de l'analyse

L'analyse comporte deux études. La première porte sur le brouillage causé aux détecteurs LEO par des LIS qui ont lieu sur des orbites allant d'orbites proches de la Terre à l'orbite géostationnaire. La deuxième étude porte sur le brouillage occasionné aux détecteurs en orbite géostationnaire par des LIS OSG et non OSG.

Chaque étude débute par une analyse statique qui identifie les conditions dans lesquelles un brouillage peut se produire. Il s'agit pour la plupart des orbites des LIS et de la position de l'émetteur LIS par rapport au détecteur. Ces paramètres de brouillage sont appliqués à une analyse temporelle qui détermine le nombre d'émetteurs qui pourraient fonctionner tout en satisfaisant au critère temporel. On examine ensuite les conditions pour déterminer s'il est possible d'éviter le brouillage en limitant les paramètres de fonctionnement des LIS ou des détecteurs passifs. On détermine enfin les restrictions en fonction du nombre de LIS, de la longueur des trajets intersatellites et des restrictions de pointage appliquées aux antennes des détecteurs. On compare ces restrictions à celles qui sont appliquées aux systèmes déjà en service ou en projet fonctionnant dans d'autres bandes afin de déterminer si les contraintes sont applicables.

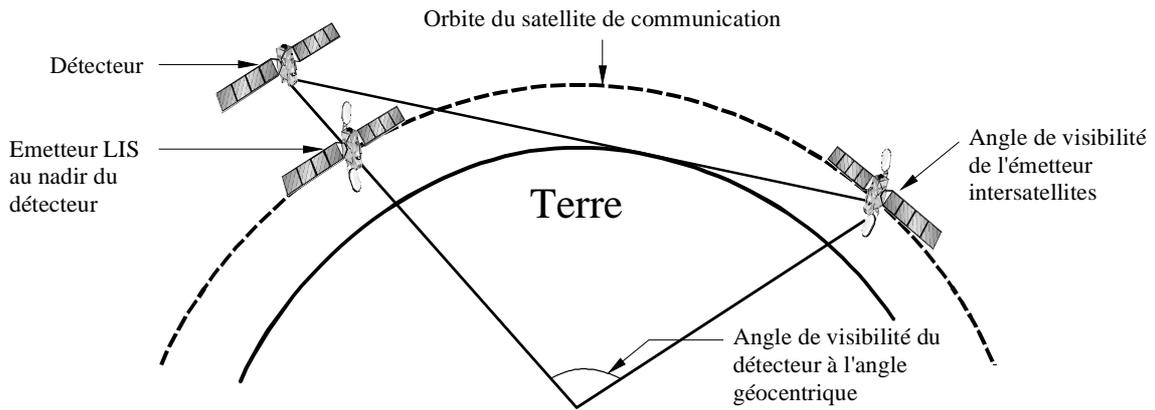
#### 3.2 Détermination des configurations géométriques à l'origine d'un brouillage

Le couplage de l'antenne est examiné pour toutes les orientations possibles du détecteur et de l'émetteur LIS. On analyse les positions relatives des satellites de détection et des satellites brouilleurs pour déterminer les positions ou les orientations qui causent un brouillage. Il est tenu compte dans cette étude des différences d'altitude, des angles géocentriques entre le détecteur et l'émetteur LIS et des orientations des antennes. Dans un premier temps, on analyse les LIS en maintenant le centre du trajet à 200 km au-dessus de la Terre pour garder le trajet au-dessus de l'atmosphère. On réduit ensuite la longueur du trajet intersatellites en termes d'angle géocentrique tout en observant les orientations qui produisent le plus de brouillage pour déterminer la longueur maximale de la liaison qui empêche qu'un brouillage inacceptable se produise. Les résultats de l'analyse permettent d'identifier les orientations et les configurations spécifiques à l'origine d'un brouillage, ce qui permet de délimiter la relation entre l'angle géocentrique et l'altitude qui empêche le brouillage.

On a établi un algorithme qui permet de calculer la puissance émanant d'un satellite brouilleur et reçue par le détecteur pour plusieurs altitudes, longueurs de trajets intersatellites, angles géocentriques entre le détecteur et le satellite brouilleur et gains de l'antenne LIS. La puissance reçue par le détecteur a été calculée à partir de l'angle géocentrique qui sépare le détecteur de l'émetteur LIS. Les angles géocentriques étaient compris entre l'horizon et le nadir du détecteur comme indiqué à la Fig. 1.

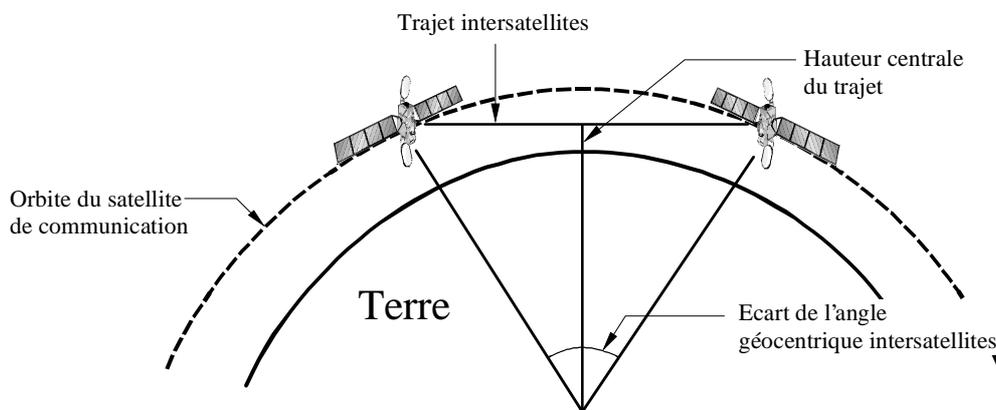
On calcule la puissance de l'émetteur qui permet de maintenir une qualité de fonctionnement constante de la liaison, comme indiqué au Tableau 3, en tenant compte de la distance du trajet LIS et des gains des deux antennes. La hauteur du trajet intersatellites et l'angle géocentrique sont liés et permettent de définir la longueur du trajet LIS. Cette configuration géométrique est représentée à la Fig. 2.

FIGURE 1  
Angles de visibilité entre le détecteur et l'émetteur LIS



1416-01

FIGURE 2  
Configuration géométrique de la LIS



1416-02

La longueur de trajet de la LIS a été évaluée au moyen de l'équation (1).

$$d_{liaison} = 2 \sqrt{(R_e + Alt_{non\ OSG})^2 - (R_e + Alt_{centre})^2} \quad (1)$$

où:

- $d_{liaison}$ : distance (m) entre le satellite émetteur LIS et le satellite récepteur LIS
- $R_e$ : rayon de la Terre = 6 378 140 m
- $Alt_{non\ OSG}$ : altitude de l'orbite non OSG (m)
- $Alt_{centre}$ : altitude du centre du trajet de la liaison non OSG (m) (voir la Fig. 2).

La puissance de l'émetteur LIS a été calculée au moyen de l'équation (2).

$$P_t = -20 \log \left( \frac{0,3}{4\pi f d_{liaison}} \right) + 10 \log (k T B) 2G_{LIS} + 12 \quad (2)$$

où:

- $P_t$ : puissance de la LIS (dBW)
- $f$ : fréquence de réglage du détecteur (Hz)
- $k$ : constante de Boltzman =  $1,38 \times 10^{-23}$  J/K
- $B$ : largeur de bande de référence du détecteur (Hz)
- $T$ : température de bruit du récepteur LIS (K)
- $G_{LIS}$ : gain des antennes LIS (dBi) (supposé être identique pour l'émetteur et le récepteur)
- 12: niveau de qualité du récepteur LIS (rapport  $C/N = 12$  dB).

La puissance d'émission calculée permet ensuite de déterminer la puissance de brouillage reçue compte tenu de la longueur de trajet entre le détecteur et l'émetteur et des gains relatifs des antennes respectives. La puissance reçue par le détecteur est calculée pour toutes les distances angulaires géocentriques entre l'horizon mutuel et le point où les satellites sont alignés avec le centre de la Terre (voir la Fig. 1). La puissance transmise au récepteur du détecteur a été calculée au moyen de l'équation (3).

$$P_r = P_t + G_{LIS}(\varphi) + G_{détecteur}(\alpha) + L_{fs} \quad (3)$$

où:

- $P_r$ : puissance de brouillage reçue (dBW)
- $G_{LIS}(\varphi)$ : gain dépendant de l'angle de l'antenne d'émission de la LIS
- $\varphi$ : angle en dehors de l'axe du faisceau principal entre l'antenne d'émission LIS et le récepteur du détecteur
- $G_{détecteur}(\alpha)$ : gain dépendant de l'angle de l'antenne du détecteur en direction de l'émetteur LIS
- $\alpha$ : angle par rapport à l'axe de visée de l'antenne du détecteur orientée vers l'émetteur LIS
- $L_{fs}$ : perte en espace libre (dB) qui se produit entre l'émetteur LIS et le récepteur du détecteur.

La relation entre la puissance reçue et l'angle géocentrique a été tracée en fonction de la variation des paramètres. On a ainsi identifié les situations dans lesquelles se produit le brouillage le plus défavorable ainsi que les combinaisons de paramètres qui permettraient de supprimer le brouillage.

### 3.3 Analyse temporelle des constellations brouilleuses

Le paragraphe précédent a permis d'identifier les orientations des détecteurs et des satellites brouilleurs qui produisent un brouillage, principalement par le biais du couplage du faisceau principal. Le critère temporel de 0,01% est appliqué à ces orientations.

L'analyse porte sur le brouillage causé par des constellations en orbite au-dessus et au-dessous du détecteur. La constellation LIS est analysée comme si des satellites LIS étaient répartis de manière aléatoire sur une sphère.

On considère que le brouillage provient de toute position sur la sphère où se trouve la constellation LIS pour laquelle le signal reçu par le détecteur dépasse le seuil de brouillage. A chaque position, le brouillage excessif provient d'une petite zone elliptique ou circulaire de la sphère dont la surface est déterminée par le gain du faisceau principal de l'antenne et la distance qui sépare la sphère du détecteur. Ces petites zones sont les intersections entre le faisceau principal de l'antenne du détecteur et la sphère où se trouve la constellation.

Les satellites étant supposés être répartis de manière aléatoire sur la sphère de la constellation LIS, un rapport des surfaces peut représenter la quantité de brouillage dans le temps. Pour un seul satellite, il s'agit du rapport entre la surface de brouillage sur la sphère et la surface totale de la sphère.

L'analyse temporelle donne le pourcentage de temps pendant lequel un seul satellite de la constellation LIS dépasse le seuil de brouillage. Il est possible, en comparant ce nombre au critère temporel de 0,01%, de déterminer le nombre maximal de satellites LIS autorisés à dépasser le seuil de brouillage.

L'analyse statique est effectuée à nouveau pour les détecteurs en orbite géostationnaire mais aucune analyse temporelle n'est nécessaire étant donné que les LIS OSG sont fixes. On trouvera ci-après une analyse temporelle fondée sur la technique du rapport des surfaces pour le brouillage occasionné par des constellations de satellites LEO.

### 3.4 Comparaison

En résumé, l'analyse initiale du brouillage permet de déterminer les restrictions à appliquer à l'altitude orbitale et à l'angle géocentrique pour éviter le brouillage. Pour les configurations de satellites qui n'appliquent pas ces restrictions, une analyse temporelle permet de déterminer le nombre de satellites qui peuvent dépasser le seuil de puissance tout en respectant le critère temporel de 0,01%. On compare à ces restrictions les paramètres des constellations de satellites prévues pour fonctionner dans d'autres bandes afin d'évaluer si ces restrictions sont applicables aux systèmes à satellites devant partager ces bandes de fréquences avec des détecteurs passifs.

## 4 Analyse

### 4.1 Brouillage des détecteurs LEO

#### 4.1.1 Identification des conditions de brouillage

Il est nécessaire, dans un premier temps, de déterminer dans quelles conditions éventuelles les niveaux de puissance d'une LIS pourraient dépasser le seuil de brouillage du détecteur. Pour ce faire, une série de calculs a été effectuée, le détecteur et l'émetteur LIS étant placés selon diverses orientations l'un par rapport à l'autre. Pour représenter les orientations les plus défavorables, on a placé le détecteur, l'émetteur LIS et le centre de la Terre sur le même plan. L'émetteur LIS s'approche du détecteur perpendiculairement au plan orbital de celui-ci. L'antenne LIS pointe vers le détecteur. La Fig. 1 indique la plage angulaire entre l'horizon et le nadir du détecteur dans laquelle les calculs ont été effectués. Les Fig. 3 et 4 sont des graphes représentant la puissance de brouillage émanant des LIS et reçue par le détecteur dans la plage angulaire illustrée à la Fig. 1. La Fig. 3 représente la puissance de brouillage reçue par le détecteur dans le mode balayage et la Fig. 4 la représente dans le mode étalonnage.

FIGURE 3  
Puissance de brouillage - Mode balayage

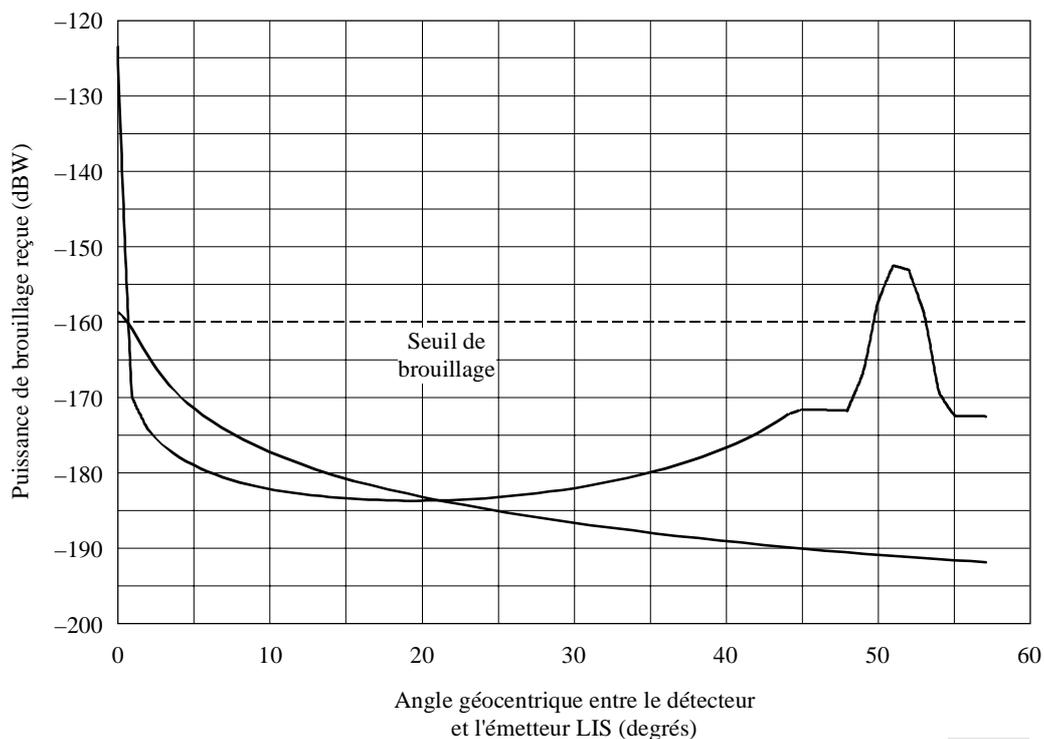
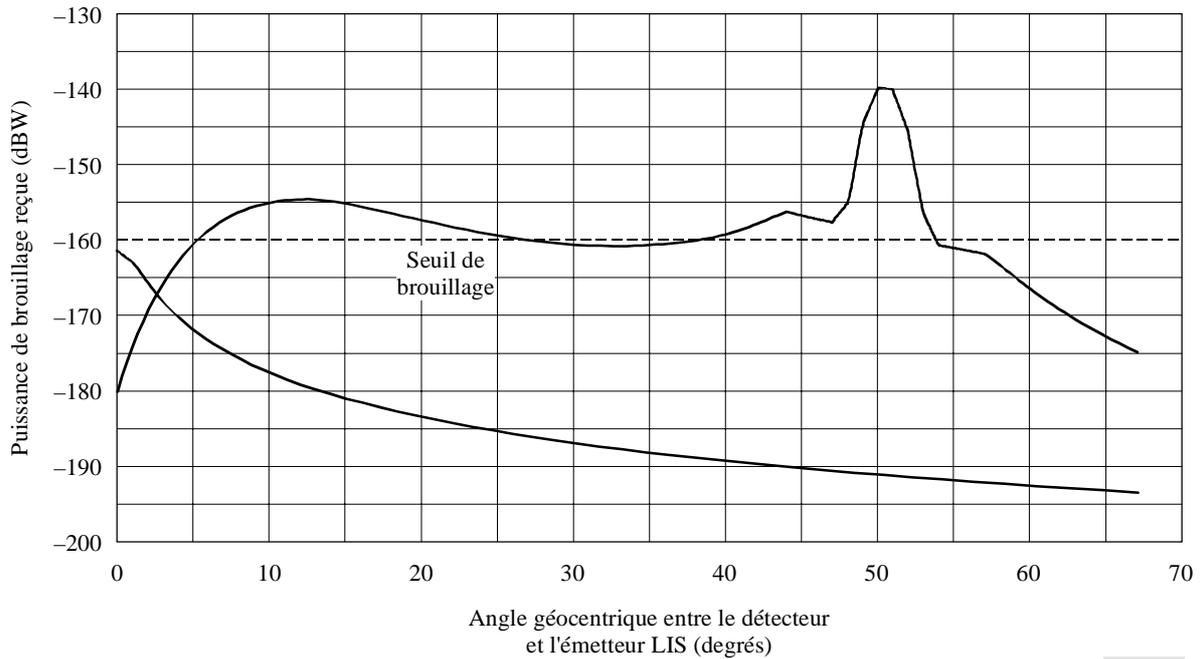


FIGURE 4

## Puissance de brouillage - Mode étalonnage



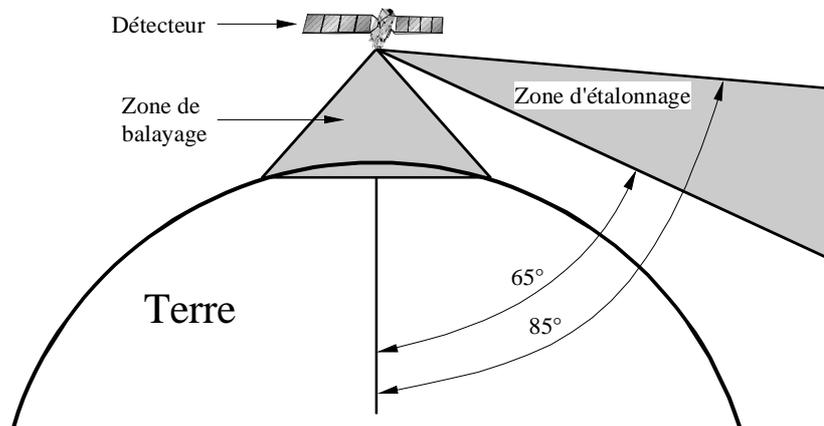
1416-04

Trois lignes sont tracées sur les Fig. 3 et 4. La ligne horizontale à  $-160$  dBW représente le seuil de brouillage du détecteur. La courbe inférieure représente la puissance de brouillage reçue par le détecteur à supposer que le détecteur et l'émetteur LIS aient des antennes équidirectionnelles d'un gain de 0 dBi. La troisième ligne caractérisée par des crêtes représente la puissance de brouillage lorsque le détecteur et l'émetteur LIS présentent un gain directionnel. L'ampleur relative des courbes de brouillage montre l'effet des antennes à gain élevé. Il ressort de la Fig. 3 que la courbe de l'antenne à gain omnidirectionnel ne dépasse le seuil que lorsque l'émetteur LIS est proche du détecteur, à proximité de  $0^\circ$ . La courbe de l'antenne à gain élevé dépasse le seuil de brouillage aussi bien lorsque l'émetteur LIS est proche de  $0^\circ$  et se trouve dans le faisceau principal de l'antenne du détecteur que lorsque l'émetteur LIS est plus proche de l'horizon et que son faisceau principal éclaire le détecteur. La Fig. 4 montre que le niveau de brouillage est supérieur au seuil lorsque l'émetteur LIS est proche du faisceau principal de l'antenne d'étalonnage du détecteur et à nouveau lorsque le détecteur se trouve dans le faisceau principal de l'antenne d'émission LIS.

Dans les deux Figures, les niveaux de brouillage sont élevés si l'émetteur LIS s'approche du faisceau principal de l'antenne du détecteur. La Fig. 5 indique les plages angulaires dans lesquelles l'antenne du détecteur pourrait fonctionner.

FIGURE 5

## Angles du détecteur et plages de fonctionnement dans les modes balayage et étalonnage



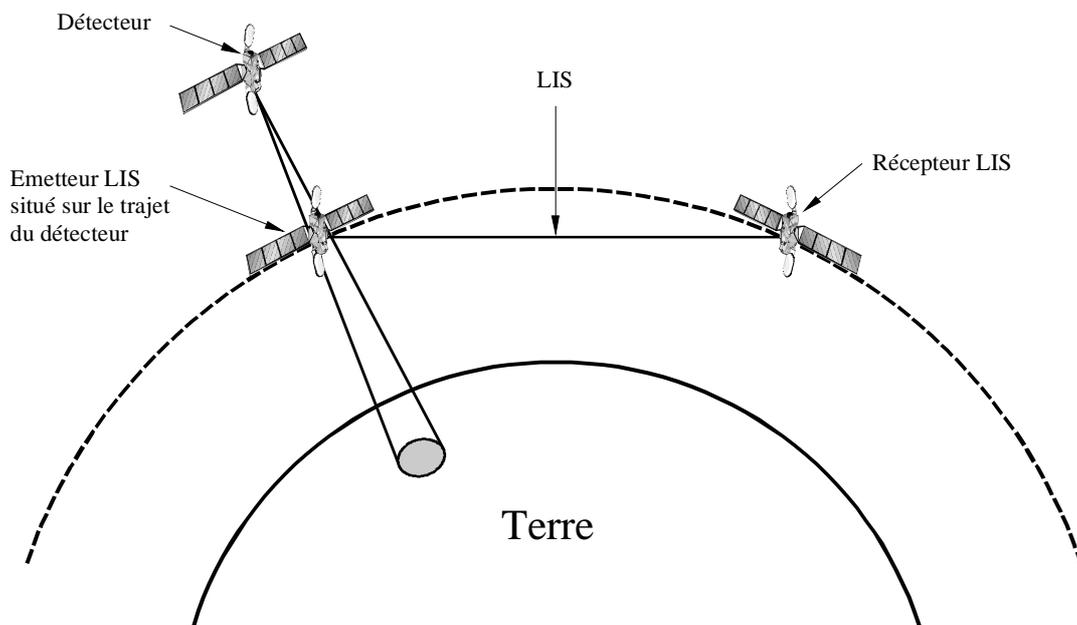
1416-05

La Fig. 5 peut s'appliquer aux détecteurs AMSU ainsi qu'aux détecteurs en peigne. La plage de balayage du détecteur AMSU est la plage de balayage de l'antenne pendant le fonctionnement. Pour le détecteur en peigne, plusieurs faisceaux couvrent la zone de manière continue. La zone d'étalonnage représentée sur la Figure est la plage angulaire qui peut être utilisée par le détecteur AMSU. Pendant son fonctionnement, celui-ci n'utilisera qu'un seul angle, d'une valeur nominale de  $83^\circ$ . Le détecteur en peigne doit utiliser une antenne séparée pour l'étalonnage à froid et ne fait pas l'objet d'autant de contraintes que le détecteur AMSU. Il peut être pointé dans toute direction à l'exclusion de la Terre. Cependant, il existe un autre facteur à prendre en considération, à savoir que le détecteur doit également éviter le Soleil. En cas d'utilisation d'une orbite héliosynchrone, comme c'est le cas dans notre hypothèse, le détecteur pourrait pointer jusqu'à l'horizontale ou au-delà de l'horizontale. Il pourrait également pointer le long du plan orbital ou obliquement par rapport au plan orbital.

Un brouillage excessif peut se produire lorsque l'émetteur LIS se trouve dans le faisceau principal du détecteur; ce phénomène se produit donc lorsque le détecteur se trouve dans les zones représentées en gris sur la Fig. 5. Dans le mode balayage, le faisceau principal de l'antenne est donc brouillé par les constellations en orbite au-dessous du détecteur. En revanche, dans le mode étalonnage, le faisceau principal de l'antenne du détecteur est brouillé par les satellites dont l'orbite est au-dessus ou au-dessous de l'orbite du détecteur. Les Fig. 6 et 7 représentent les différentes orientations susmentionnées qui provoquent un brouillage.

FIGURE 6

**Configuration du brouillage lorsque le satellite émetteur LIS se trouve dans l'axe du faisceau de balayage du détecteur**



1416-06

Ainsi qu'il a été établi précédemment, le brouillage se produit également lorsque le faisceau principal de l'émetteur LIS intercepte le détecteur. Les Fig. 8 et 9 représentent l'interception du détecteur par le faisceau principal LIS provenant de constellations situées au-dessous et au-dessus du détecteur.

#### 4.1.2 Analyse temporelle

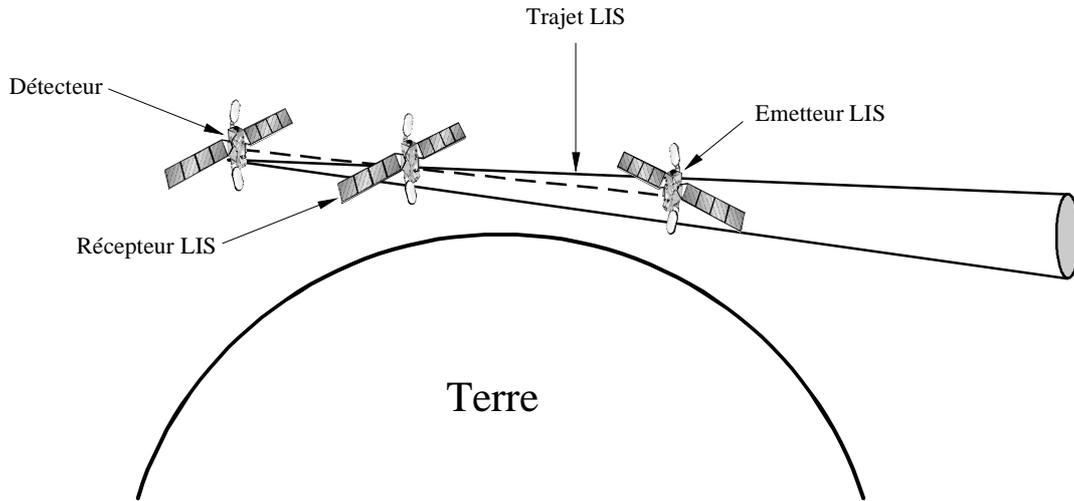
##### 4.1.2.1 Analyses à basse altitude

Trois zones de brouillage ont été identifiées:

- au-dessous du détecteur en mode balayage, là où se produit un couplage entre le faisceau principal du détecteur et le lobe latéral LIS;
- sur le côté du détecteur en mode étalonnage, lorsqu'il se produit un couplage entre l'antenne d'étalonnage du détecteur et le lobe latéral du satellite émetteur LIS; et
- à l'endroit où il se produit un couplage entre le faisceau principal de l'émetteur LIS et le lobe latéral du détecteur.

FIGURE 7

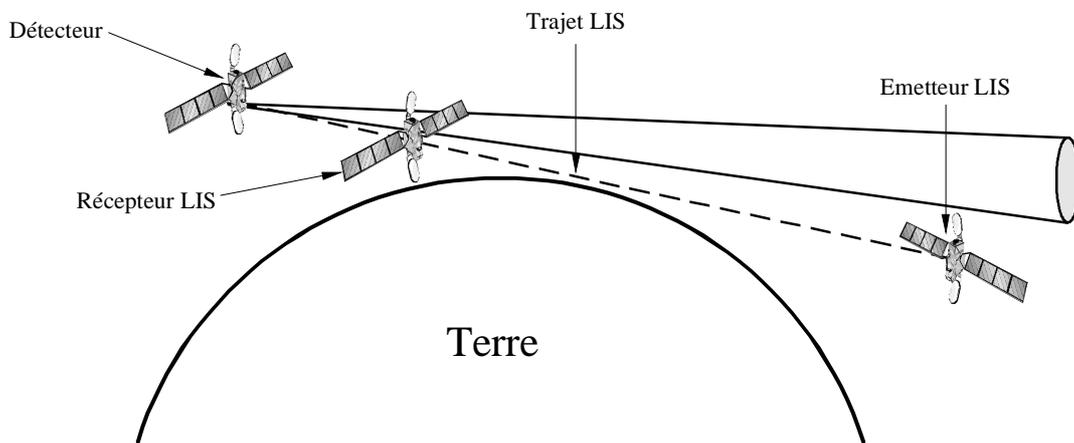
**Brouillage lorsque l'émetteur LIS se trouve dans l'axe du faisceau principal de l'antenne d'étalonnage**



1416-07

FIGURE 8

**Brouillage en mode étalonnage causé par le faisceau principal de l'antenne d'émission LIS ou par la constellation en orbite au-dessous du détecteur**

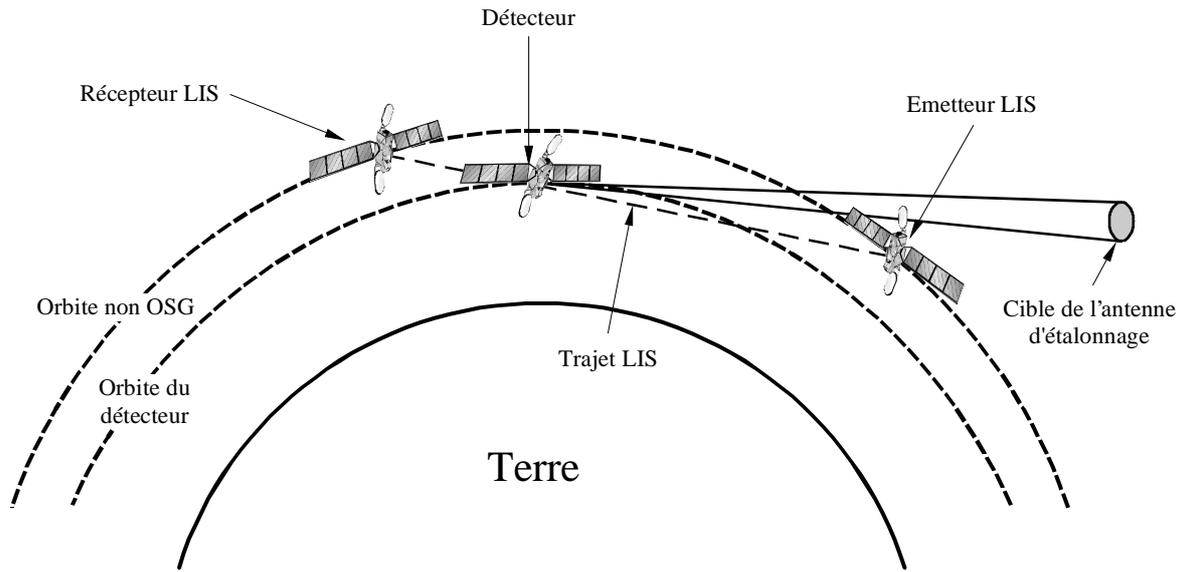


1416-08

Il ressort de cette analyse (voir la Fig. 10) qu'au maximum huit satellites dans l'ensemble de la sphère orbitale peuvent partager la bande des 118 GHz et que cinq satellites peuvent partager la bande des 183 GHz, si leur orbite se trouve à une altitude proche de 300 km. Le nombre de satellites qui peuvent partager ces bandes de fréquences tombe à deux à une altitude de 500 km environ et à zéro à une altitude de 900 km. La courbe est une courbe composite combinant les trois probabilités correspondant aux trois zones de brouillage résultant du couplage du faisceau principal avec l'antenne de balayage du détecteur, l'antenne d'étalonnage du détecteur et l'antenne de l'émetteur LIS. Le principal mécanisme de brouillage est dû à une émission du faisceau principal LIS en direction des lobes latéraux du détecteur. A une altitude de 749 km, le point dominant sur la courbe composite correspond au brouillage subi par l'antenne du détecteur pendant l'étalonnage.

FIGURE 9

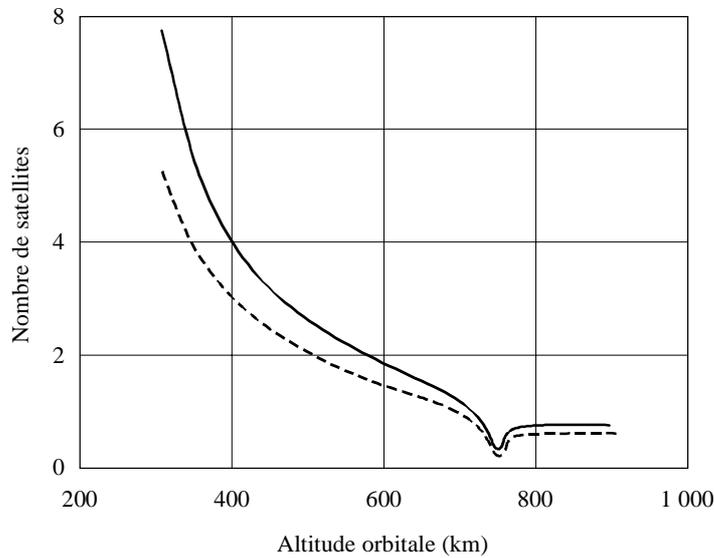
**Brouillage en mode étalonnage causé par le faisceau principal de l'antenne d'émission LIS ou par la constellation en orbite au-dessus du détecteur**



1416-09

FIGURE 10

**Nombre de satellites dans une constellation LEO satisfaisant au critère de 0,01%**



— Bande des 118 GHz

- - - Bande des 183 GHz

1416-10

L'angle d'étalonnage appliqué au détecteur influe sur les possibilités de partage, comme illustré ci-dessus. En règle générale, lorsque l'antenne d'étalonnage peut subir un brouillage, un seul satellite peut partager les fréquences sans enfreindre le critère de 0,01%. Etant donné que l'angle d'étalonnage passe de 65° à 85°, l'altitude à laquelle se produit le maximum de brouillage augmente. Le Tableau 6 indique les altitudes auxquelles se produit un brouillage maximal pour des angles d'étalonnage compris entre 65° et 85°, plage dans laquelle le plus petit nombre de satellites peut partager des fréquences.

TABLEAU 6

Altitude à laquelle un brouillage maximal est causé à l'antenne du détecteur en mode étalonnage

Angle d'étalonnage (degrés)	Altitude à laquelle se produit un brouillage maximal (km)
65	308
70	555
75	749
80	888
85	971

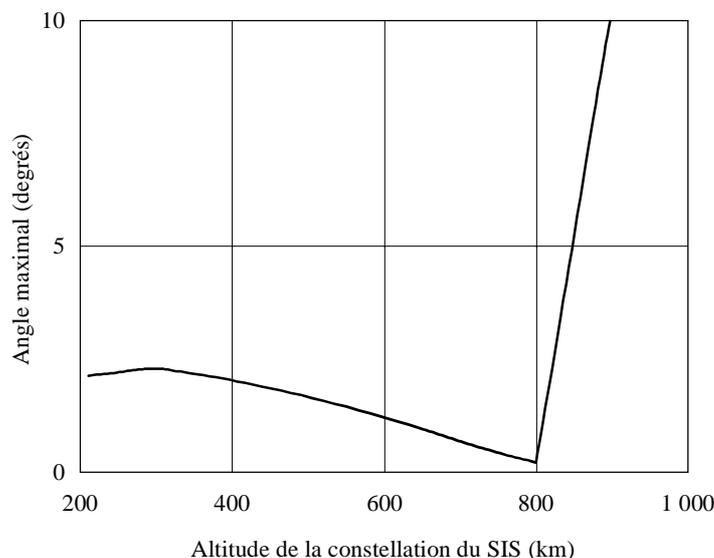
#### 4.1.3 Analyse de la technique permettant d'éviter le brouillage dans les LIS

Les longueurs de trajet LIS examinées jusqu'à présent produisent un brouillage maximal car il s'agit des trajets les plus longs, qui nécessitent la plus forte puissance d'émission. Tout facteur qui réduit la p.i.r.e. du satellite fera baisser les niveaux de brouillage. La p.i.r.e. est affectée par deux facteurs, le gain d'antenne et la longueur de trajet. Si la LIS a été définie avec des antennes de transmission et de réception adaptées l'une à l'autre, chaque décibel de plus du gain d'antenne donne lieu à un accroissement de 2 dB de la puissance du signal LIS reçu. Pour maintenir cette même puissance de signal, on peut donc réduire de 2 dB la puissance de l'émetteur LIS. Autrement dit, chaque décibel de plus du gain du faisceau principal de l'antenne entraîne une diminution de 1 dB de la p.i.r.e. du faisceau principal ainsi qu'une réduction du rayonnement des lobes latéraux. La p.i.r.e. requise est également proportionnelle au carré de la distance, de sorte qu'une réduction de la longueur de la liaison fait baisser la p.i.r.e. et, par conséquent, la puissance de brouillage reçue. Il existe une longueur de trajet LIS maximale pour chaque altitude pour laquelle il ne se produit aucun brouillage inacceptable.

Les Fig. 11 et 12 représentent l'angle géocentrique maximal, pour les LIS, qui empêche les brouillages inacceptables. On a obtenu ces résultats en calculant la puissance de brouillage au niveau du détecteur et en diminuant la longueur de trajet LIS jusqu'à ce que cette puissance soit inférieure au seuil de  $-163$  dBW. Le gain des antennes d'émission et de réception LIS est de 45 dBi.

FIGURE 11

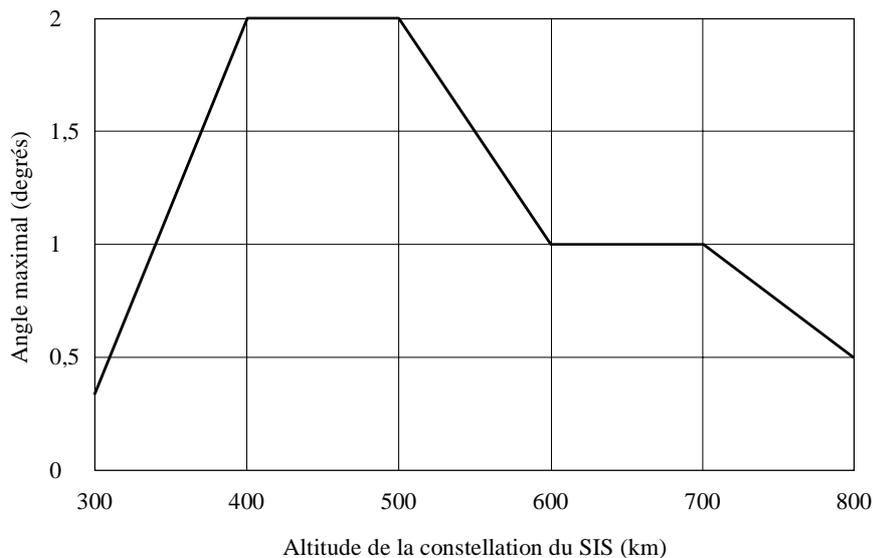
Angle géocentrique maximal à appliquer dans un système intersatellites pour éviter un brouillage des détecteurs spatioportés lorsque ceux-ci se trouvent en mode balayage et à une altitude de 850 km



La Fig. 11 illustre le cas où le détecteur se trouve à une altitude de 850 km en mode balayage, les LIS étant situées à une hauteur inférieure ou légèrement supérieure. L'angle géocentrique maximal est de 2° ou moins pour le mode balayage jusqu'à ce que la constellation LIS se trouve au-dessus du détecteur. L'angle maximal devient proche de zéro lorsque les altitudes de la constellation LIS et du satellite de détection sont identiques. Dans le mode étalonnage, comme indiqué sur la Fig. 12, l'angle maximal est inférieur à 1°. Le mode étalonnage est donc plus susceptible de subir un brouillage.

FIGURE 12

**Angle géocentrique maximal à appliquer dans un système intersatellites pour éviter un brouillage des détecteurs spatioportés lorsque ceux-ci se trouvent en mode étalonnage à 83° et à une altitude de 850 km**



1416-12

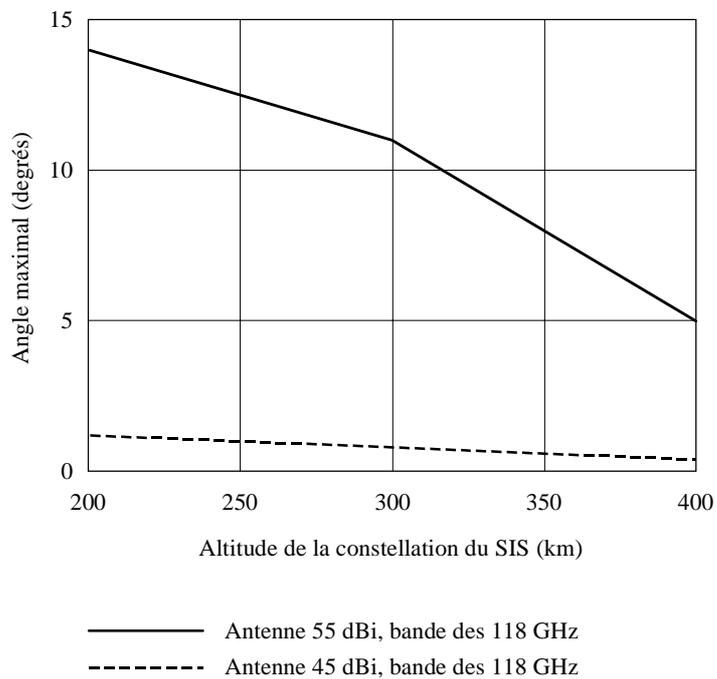
Les orbites qui peuvent être occupées par les détecteurs sont comprises entre 500 et 1 000 km. Il ressort de la Fig. 11 que le partage n'est pas possible lorsque les LIS sont effectuées à la même altitude; toutefois, les possibilités de partage augmentent lorsque l'orbite de l'émetteur LIS devient inférieure à celle du détecteur. Etant donné que le détecteur peut se trouver à toute altitude comprise entre 500 et 1 000 km, les LIS ne peuvent pas occuper cette plage orbitale. Le partage est possible au-dessous de 500 km pour un détecteur se trouvant à une altitude de 500 km et au-dessus de 1 000 km pour un détecteur se trouvant à cette altitude. Les Fig. 13 et 14 montrent les restrictions angulaires à appliquer lorsque le détecteur se trouve à 500 km pour le mode balayage et le mode étalonnage respectivement. De même, les Fig. 15 et 16 indiquent les restrictions angulaires à appliquer lorsque le détecteur se trouve à une altitude de 1 000 km, les LIS se produisant au-dessus du détecteur. Sur ces Figures, deux gains d'antenne sont étudiés pour la LIS. Des courbes sont tracées pour une antenne 45 dBi et une antenne 55 dBi utilisées dans la LIS.

Un accroissement du gain d'antenne dans la LIS permet d'augmenter les angles de liaison qui permettent d'éviter le brouillage. Ceci est dû au fait que, premièrement, une plus faible p.i.r.e. de l'émetteur LIS est requise et que, deuxièmement, l'antenne de l'émetteur LIS a un faisceau plus étroit, qui réduit les émissions hors du lobe principal.

Lorsque la LIS a lieu au-dessus du détecteur situé à une altitude de 1 000 km, le gain d'antenne semble avoir peu d'incidence dans le mode balayage (Fig. 15) et la limite imposée à l'angle géocentrique de la LIS est moins rigoureuse. Le gain d'antenne de la LIS a un effet plus important en mode étalonnage (Fig. 16). L'antenne 45 dBi est toujours soumise à de fortes restrictions, ce qui n'est pas le cas pour l'antenne 55 dBi. Les Fig. 14 et 16 montrent le cas où les possibilités de partage sont plus grandes avec des antennes LIS à gain plus élevé.

FIGURE 13

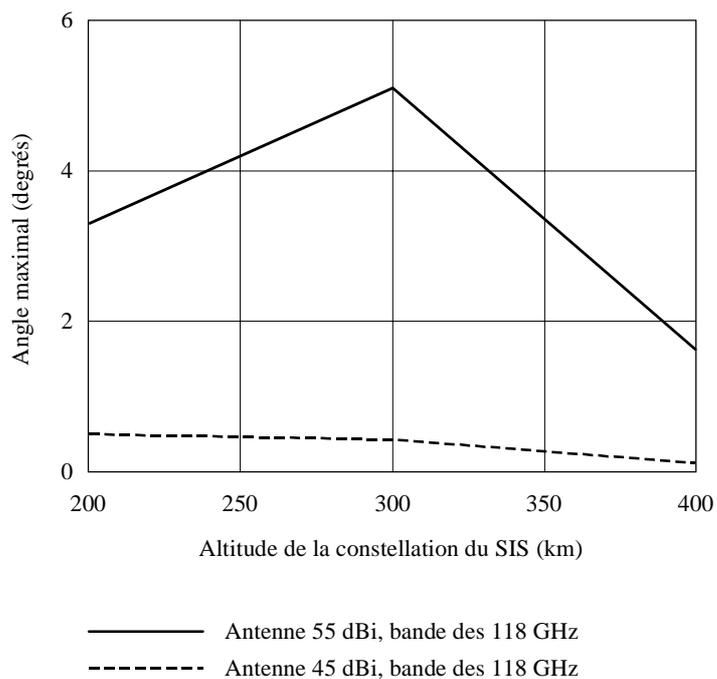
Angle géocentrique maximal à appliquer dans un système intersatellites pour éviter un brouillage des détecteurs spatioportés lorsque ceux-ci se trouvent en mode balayage et à une altitude de 500 km



1416-13

FIGURE 14

Angle géocentrique maximal à appliquer dans un système intersatellites pour éviter un brouillage des détecteurs spatioportés lorsque ceux-ci se trouvent en mode étalonnage à  $83^\circ$  et à une altitude de 500 km



1416-14

FIGURE 15

Angle géocentrique maximal à appliquer dans un système intersatellites pour éviter un brouillage des détecteurs spatioportés lorsque ceux-ci se trouvent en mode balayage et à une altitude de 1 000 km

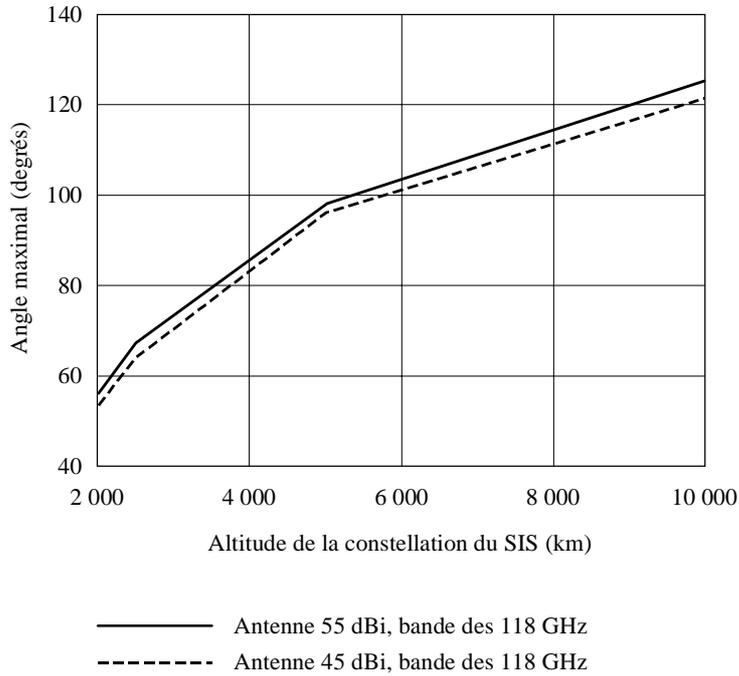
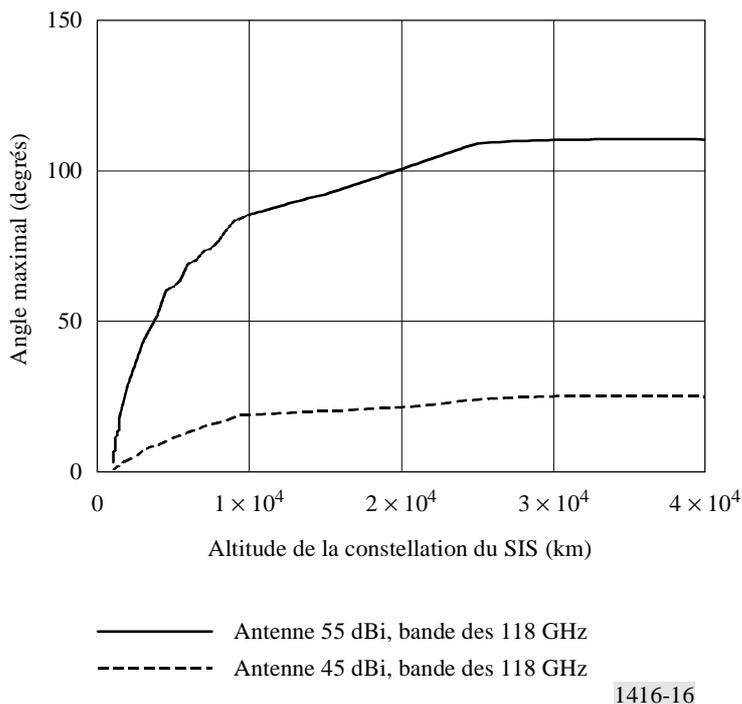


FIGURE 16

Angle géocentrique maximal à appliquer dans un système intersatellites pour éviter un brouillage des détecteurs spatioportés lorsque ceux-ci se trouvent en mode étalonnage à 83° et à une altitude de 1 000 km



#### 4.1.4 Restrictions appliquées à l'angle d'étalonnage et au gain d'antenne du détecteur pour faciliter le partage

L'étalonnage par l'antenne du détecteur s'est révélé être le mode le plus contraignant pour ce qui est du partage avec le SIS. Aux fins de l'analyse, le gain et l'angle de l'antenne d'étalonnage ont été fixés à 45 dBi et à 83°. De même qu'un gain d'antenne différent atténue les restrictions appliquées aux liaisons LIS en matière de partage, il est possible d'accroître les possibilités de partage en ajustant le gain d'antenne et l'angle d'étalonnage. Toutefois, la mise en œuvre d'une antenne d'étalonnage différente sur les futurs détecteurs risque d'entraîner une diminution et non une augmentation du gain. Les Tableaux 7 et 8 reprennent les résultats d'une étude portant sur les restrictions imposées par le gain et l'orientation de l'antenne du détecteur.

Le Tableau 7 présente les résultats d'une étude visant à déterminer dans quelle mesure l'émetteur et le récepteur utilisés dans la LIS doivent être proches l'un de l'autre pour éviter un brouillage excessif. L'examen a porté sur des altitudes supérieures et inférieures à celles du détecteur. Celui-ci a été positionné à 850 km et l'angle d'étalonnage a été fixé à 90° par rapport au nadir. Il serait possible de recourir à un angle d'étalonnage moins restrictif si des antennes séparées étaient utilisées pour l'étalonnage. Le tableau 7 indique l'angle géocentrique maximal pour différentes combinaisons d'altitudes orbitales LIS et de gains d'antenne d'étalonnage.

TABLEAU 7

#### Angle géocentrique maximal de la LIS qui assure une protection totale des détecteurs hyperfréquences passifs situés sur une orbite de 850 km

Hauteur de l'orbite non OSG (km)	Gain de l'antenne d'étalonnage			
	45 dBi	40 dBi	35 dBi	30 dBi
300	2°	5°	10°	20° (distance maximale) <sup>(1)</sup>
400	2°	4,4°	8°	21°
500	1°	3,3°	5°	13°
600	1°	1,9°	3°	8°
700	0,5°	1°	2°	3,8°
800	0,2°	0,2°	0,5°	0,9°
1 500	2°	4°	7°	12°
2 000	4°	7°	12°	18°
2 500	7°	11°	14°	25°
3 000	8°	13°	20°	30°
5 000	13°	21°	31°	45°
10 000	17°	27°	40°	59°
15 000	21°	33°	49°	67°
OSG	134°	143°	149°	153°

<sup>(1)</sup> L'indication (distance maximale) signifie que la liaison traversera l'atmosphère avant que les critères de brouillage ne soient appliqués.

Il ressort également du Tableau 7 que des gains d'antenne d'étalonnage plus faibles accroîtraient les possibilités de partage. En outre, plus l'orbite LIS est proche de l'orbite du détecteur, plus l'angle devient restrictif. Les restrictions sont même d'autant plus rigoureuses que l'analyse n'a porté que sur une orbite de 850 km alors que l'orbite des détecteurs pourrait varier entre 500 et 1 000 km. Cependant, les angles ne sont pas très restrictifs pour les LIS OSG si l'on considère que l'angle maximal sur lequel une liaison OSG peut s'étendre sans qu'il y ait une occultation par la Terre est de 162,6°.

Le Tableau 7 montre la sensibilité du gain et de l'angle de pointage de l'antenne d'étalonnage au brouillage occasionné par des LIS sur des orbites inférieures à celle du détecteur. L'angle d'étalonnage minimal qui maintient le niveau de brouillage au-dessous du seuil est indiqué pour diverses combinaisons d'altitudes et de gains de l'antenne d'étalonnage. Le détecteur AMSU a un gain d'antenne de 45 dBi mais le détecteur en peigne pourrait utiliser des gains plus faibles. Dans cet exemple, le détecteur est situé sur une orbite de 850 km.

TABLEAU 8

**Angle d'étalonnage minimal par rapport au nadir permettant de protéger totalement les détecteurs hyperfréquences d'étalonnage situés sur une orbite de 850 km contre le brouillage occasionné par des LIS**

Hauteur de l'orbite non OSG (km)	Gain de l'antenne d'étalonnage			
	45 dBi	40 dBi	35 dBi	30 dBi
300	145°	115°	97°	86°
400	170°	130°	105°	91°
500	175°	135°	110°	93°
600	>180°	145°	115°	96°
700	>180°	145°	120°	100°
800	>180°	145°	120°	100°

NOTE 1 – Les valeurs >180° signifient qu'il est impossible d'éviter un brouillage excessif.

Il ressort du Tableau 8 que plus le gain de l'antenne d'étalonnage est faible, plus l'angle d'étalonnage peut être petit sans que le détecteur subisse un brouillage excessif. Aucun des angles déterminés lors de cette étude n'est aussi petit que les angles définis pour le détecteur AMSU. Cela signifie qu'il n'est pas possible de protéger les détecteurs similaires au détecteur AMSU contre le brouillage occasionné par des LIS se produisant sur des orbites plus basses.

Cette analyse montre clairement qu'une diminution du gain de l'angle d'étalonnage accroît les possibilités de partage avec les LIS. Cela étant, l'antenne d'étalonnage ne doit pointer que sur l'espace froid et des antennes à gain plus faible auraient des diagrammes de rayonnement de lobes latéraux plus importants et exposeraient partiellement l'antenne d'étalonnage aux signaux émanant de la Terre, de l'atmosphère ou du Soleil. Par ailleurs, une orientation plus large de l'antenne exposerait le récepteur au brouillage causé par de multiples LIS. On n'étudiera dans ce contexte qu'une seule liaison. Certes, une antenne de 30 dBi peut ne pas être la plus petite antenne susceptible d'être utilisée pour l'étalonnage, mais elle a une ouverture de faisceau de 6,5° et est probablement proche de la limite imposée.

#### 4.1.5 Limitations imposées aux LIS OSG

Certains systèmes OSG peuvent satisfaire au critère de brouillage comme le montrent les grands angles indiqués dans le Tableau 7. Pour que l'on considère le partage comme étant faisable, il est nécessaire d'imposer des limites aux systèmes OSG afin de protéger les détecteurs passifs. Dans le scénario le plus défavorable, il se produit directement un couplage avec le faisceau principal du détecteur lors de l'étalonnage. Par conséquent, il serait possible de protéger le détecteur en fixant une limite de puissance surfacique en fonction du couplage du faisceau principal. Le niveau de brouillage de -163 dBW par 200 MHz se traduit par une puissance surfacique de -145 dB(W/m<sup>2</sup>) à 118 GHz et de -141 dB(W/m<sup>2</sup>) à 183 GHz. Les calculs sont indiqués au Tableau 9.

TABLEAU 9

**Détermination de la puissance surfacique permettant de protéger les détecteurs passifs des émissions émanant de LIS en orbite géostationnaire**

Paramètre	Bande des 118 GHz	Bandes des 183 GHz
Niveau de brouillage du détecteur (dBW)	-163	-163
Gain d'antenne (dBi)	45	45
Ouverture effective (dB/m <sup>2</sup> )	-63	-67
Facteur relatif à plusieurs systèmes OSG (dB)	3,0	3,0
Niveau de puissance surfacique (dB(W/(m <sup>2</sup> · 200 MHz)))	-148	-144

#### 4.1.6 Compatibilité des détecteurs LEO

On détermine la compatibilité en comparant les restrictions de fonctionnement évaluées ci-dessus à des systèmes en projet ou fonctionnant déjà dans cette bande ou dans d'autres bandes. Ces systèmes sont décrits au § 2. L'analyse effectuée et la comparaison avec d'autres systèmes permettent de tirer les conclusions suivantes:

- Les émetteurs LIS peuvent produire un brouillage dont le niveau est supérieur au seuil de brouillage du détecteur lorsqu'il se produit un couplage au voisinage de l'axe du faisceau principal. Les niveaux de puissance de brouillage peuvent être inférieurs au seuil lorsque d'autres orientations sont utilisées.
- Parmi les émetteurs LIS pris comme exemple qui dépassent le seuil, moins de 8 peuvent se trouver sur des orbites inférieures à celle du détecteur sans dépasser le critère temporel à appliquer pour le partage.
- Bien qu'un gain plus faible de l'antenne d'étalonnage réduise effectivement le brouillage susceptible d'être causé aux détecteurs passifs en mode étalonnage, le gain ne peut pas être réduit suffisamment pour que soient autorisées des LIS de portée raisonnablement longue, que l'on détermine en comparant les restrictions calculées aux systèmes types en projet ou fonctionnant dans d'autres bandes.
- Sur certaines orbites, il est également possible de réduire le brouillage émanant des liaisons LIS en limitant l'angle hors nadir vers lequel pointe l'antenne d'étalonnage du détecteur, mais ces restrictions ne sont pas incluses dans la plage de fonctionnement des détecteurs déjà en service et peuvent ne pas être applicables.
- Un plus faible espacement entre l'engin spatial et les LIS peut réduire le brouillage susceptible d'être causé mais les angles géocentriques maximaux admissibles peuvent ne pas être applicables aux systèmes de communication par satellite.
- Le détecteur en peigne est soumis à moins de restrictions que le détecteur AMSU en ce qui concerne l'antenne d'étalonnage, mais cette capacité additionnelle ne semble pas améliorer notablement son insensibilité au brouillage causé par les LIS.
- Les LIS OSG peuvent partager des bandes de fréquences avec les détecteurs à condition que leur puissance surfacique sur l'orbite du détecteur ne dépasse pas certaines limites.

Pour conclure, on peut dire que les restrictions appliquées au détecteur ou aux paramètres LIS pour assurer une protection adéquate peuvent être trop rigoureuses pour les systèmes types susceptibles d'être planifiés ou mis en œuvre.

## 4.2 Brouillage des détecteurs en orbite géostationnaire

### 4.2.1 Identification des situations de brouillage

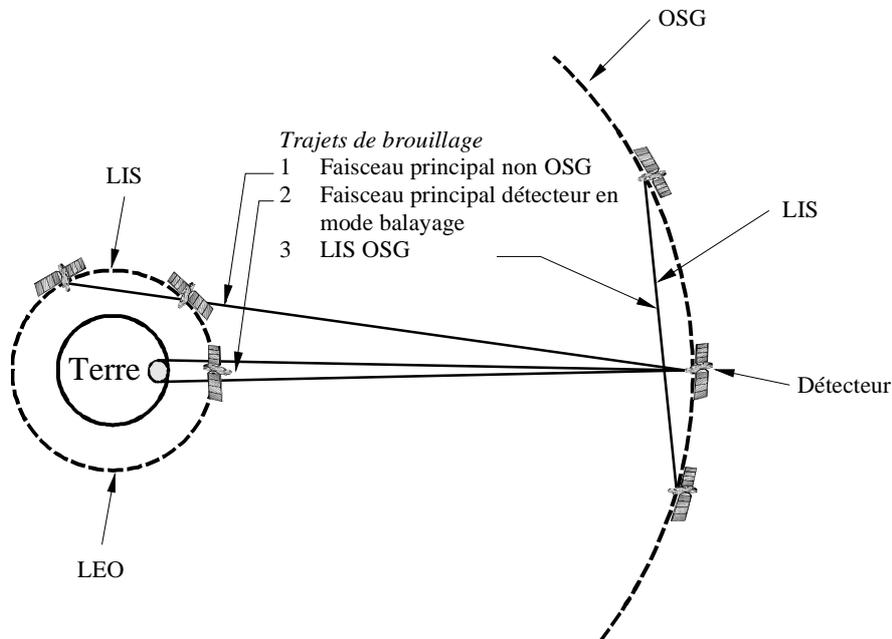
Les détecteurs en orbite géostationnaire fonctionneront avec un type d'antenne à balayage qui balayera la partie visible de la Terre à environ  $\pm 8^\circ$  par rapport au nadir de l'engin spatial. Si un tel détecteur utilise l'espace froid pour l'étalonnage, il pourrait pointer son antenne de balayage loin de la Terre de manière similaire au détecteur AMSU ou pointer une antenne séparée vers tout emplacement approprié en vue de l'étalonnage. L'antenne d'étalonnage à froid doit éviter non seulement la Terre mais aussi le Soleil et il est préférable qu'elle évite la Lune. Placé en orbite héliosynchrone, le détecteur AMSU peut effectuer des étalonnages au même emplacement par rapport à l'engin spatial et éviter systématiquement de pointer vers le Soleil. Si le satellite géostationnaire pointe vers tout endroit du plan orbital, il est probable qu'à un moment donné, il pointera vers le Soleil ou la Lune et altérera les mesures effectuées à froid. On suppose donc que le satellite géostationnaire pointe l'antenne d'étalonnage à froid dans une certaine direction de telle sorte que l'antenne ne pointe pas vers un endroit proche du Soleil, de la Terre ou de la Lune. Le fonctionnement de l'antenne d'étalonnage est le moins affecté lorsque l'antenne est pointée plein nord ou plein sud à  $90^\circ$  par rapport au plan équatorial. L'antenne d'étalonnage pointe donc à au moins  $67^\circ$  par rapport à l'écliptique, là où le gain directionnel serait relativement faible.

Comme il a été indiqué, l'antenne d'étalonnage sera probablement orientée loin de la Terre et loin du plan orbital géostationnaire. Le brouillage étant en majeure partie dû à un couplage au voisinage de l'axe du faisceau principal, il est peu probable que l'antenne d'étalonnage soit soumise à un brouillage excessif. Les modes de brouillage susceptibles d'affecter le détecteur installé à bord du OSG seraient les suivants:

- 1 En mode balayage, antenne face à la Terre, brouillage causé par le faisceau principal des satellites en orbite plus basse.
- 2 En mode balayage, antenne face à la Terre, brouillage causé par les lobes latéraux des satellites en orbite plus basse.
- 3 Le détecteur étant dans l'un ou l'autre mode, brouillage causé par les liaisons LIS des satellites OSG.

Les trois modes possibles sont représentés sur la Fig. 17.

FIGURE 17  
Modes de brouillage affectant les détecteurs en orbite géostationnaire



1416-17

#### 4.2.2 Analyse statique du brouillage causé par les LIS non OSG

Il ressort d'études précédemment effectuées sur les détecteurs en orbite basse que la puissance de brouillage est maximale lorsque le faisceau principal du détecteur ou de l'émetteur non OSG pointe directement sur l'autre satellite. La Fig. 17 présente ces alignements sous forme de trajets de brouillage 1 et 2. On examinera conjointement ces deux trajets en déterminant dans un premier temps le seuil de sensibilité du détecteur à l'emplacement de l'émetteur non OSG.

Les neuf systèmes représentés dans le Tableau 10 seront évalués comme s'ils fonctionnaient dans ces bandes. Pour chaque liaison, la puissance de l'émetteur a été déterminée au moyen de l'équation (2) et de la séparation angulaire indiquée dans le Tableau 10. On a supposé qu'une antenne de 45 dBi était utilisée pour chaque liaison. Pour le trajet de brouillage, on est parti de l'hypothèse que la puissance à laquelle s'ajoutait le gain d'antenne total de 45 dBi émanait d'un point situé à  $90^\circ$  de la verticale du détecteur. Pour le trajet de brouillage 2, le gain des lobes arrière était supposé être de  $-10$  dBi, l'émetteur non OSG étant situé à une altitude supérieure au point subsatellite. On a calculé la sensibilité du détecteur au trajet de brouillage 1 en partant de l'hypothèse que le détecteur effectuait un balayage de  $+8^\circ$  dans cette direction. Le gain de l'antenne du détecteur était supposé être de 20 dBi (la sensibilité directionnelle étant de  $-183$  dBW). Au point subsatellite, le détecteur est sensé être pointé vers le nadir et le gain total de 66 dBi de l'antenne du détecteur renforce sa sensibilité ( $-226$  dBW).

Le Tableau 10 indique les résultats des calculs et de la comparaison à la sensibilité du détecteur OSG. Les paramètres de ces systèmes sont indiqués dans les quatre premières colonnes. Leur niveau de puissance (dBW par bande de 200 MHz) sur l'orbite géostationnaire est indiqué dans les quatre colonnes suivantes. Dans les deux dernières colonnes, les niveaux de puissance sont comparés aux seuils de sensibilité du détecteur orienté dans la direction de ces systèmes.

TABLEAU 10

**Détermination de la compatibilité entre le détecteur OSG et les LIS non OSG**

Système	Nombre de satellites	Séparation (degrés)	Altitude orbitale (km)	Puissance des émissions des lobes latéraux sur l'orbite géostationnaire (dBW)		Puissance des émissions du lobe principal sur l'orbite géostationnaire (dBW)		Partage avec le détecteur OSG compte tenu des émissions des lobes latéraux?	Partage avec le détecteur OSG compte tenu des émissions du lobe principal?
				118 GHz	183 GHz	118 GHz	183 GHz		
Système A	66	32,7	780	-218,0	-212,4	-160,9	-159,1	Non	Non
Système B	12	90	10 350	-205,2	-188,6	-151,4	-149,7	Non	Non
Système C	48	60	1 414	-213,3	-207,7	-156,4	-154,7	Non	Non
Système D	32	45	775	-215,6	-210,1	-158,6	-156,8	Non	Non
Système E	840	17,1	700	-223,3	-217,8	-166,2	-164,5	Non	Non
Système F	48	45	950	-215,5	-209,9	-158,5	-156,7	Non	Non
Système G	24	60	800	-213,9	-208,3	-156,8	-155,0	Non	Non
Système H	10	72	500	-213,3	-207,7	-156,2	-154,4	Non	Non
Système I	24	60	1 000	-213,7	-208,1	-156,7	-154,9	Non	Non

Pour tous les systèmes non OSG examinés, le brouillage a dépassé le seuil de brouillage autorisé pour le détecteur.

#### 4.2.3 Analyse temporelle du brouillage causé par les systèmes non OSG

Il a déjà été démontré que la puissance rayonnée par le seul émetteur LIS pourrait brouiller le faisceau principal du détecteur, le brouillage pouvant également être dû aux lobes latéraux éloignés de l'antenne LIS. Par conséquent, tout émetteur LIS passant par le faisceau principal du détecteur peut être à l'origine d'un brouillage.

Le détecteur passif proposé a une empreinte de 2 000 km<sup>2</sup> sur la Terre et une empreinte de taille similaire à des altitudes orbitales inférieures. Si on prend comme hypothèse une altitude nominale de 800 km, le rapport des surfaces entre la sphère entière et l'empreinte du satellite est de 0,0036%. Si les satellites étaient répartis de manière uniforme, il faudrait qu'il y ait 323 733 satellites pour qu'il y ait à tout moment un satellite dans le champ de vision du détecteur. Pour réduire ce chiffre à un satellite se trouvant dans le champ de vision du détecteur pendant moins de 0,01% du temps, il faudrait qu'il y ait moins de 33 satellites LEO dans toute bande de 200 MHz.

#### 4.2.4 Brouillage causé par d'autres LIS OSG

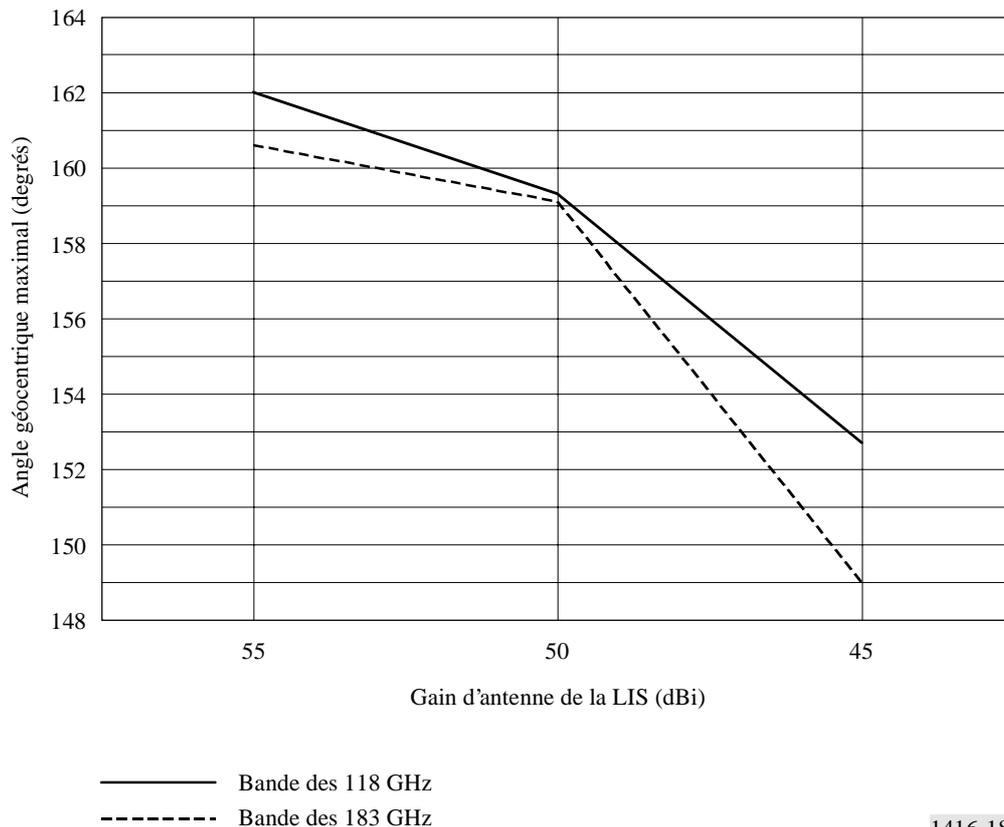
Le trajet de brouillage 3 représente le brouillage causé par d'autres satellites OSG. Dans ce cas, ni le faisceau principal du satellite actif ni le détecteur passif ne pointe directement l'un sur l'autre sauf si le détecteur se trouve au même emplacement que le récepteur prévu. Les positions relatives des satellites ne se modifieront pas avec le temps. Le partage est possible si le gain hors de l'axe du faisceau principal de l'émetteur LIS est suffisamment faible pour empêcher que le détecteur reçoive des niveaux de signal à effet brouilleur. On contrôle ce phénomène au moyen du diagramme de gain de l'antenne d'émission LIS, de l'angle géocentrique de la liaison LIS et de l'angle géocentrique entre le détecteur et l'émetteur LIS.

Pour déterminer si une liaison LIS serait susceptible d'occasionner un brouillage au niveau du détecteur, on a étudié les liaisons avec des gains d'antenne compris entre 60 et 45 dBi. On a fait varier l'angle géocentrique jusqu'à 162,2° pour déterminer l'endroit où le brouillage se produirait. Dans le cas d'une antenne de 60 dBi, aucun niveau de brouillage n'a dépassé le seuil. Ce cas ne s'est produit que lorsque l'espacement était important avec des antennes ayant un gain de 55, 50 et 45 dBi. La Fig. 18 indique l'espacement maximal qui permet d'éviter un brouillage du détecteur au-dessus du seuil.

Pour les systèmes en orbite géostationnaire, les LIS peuvent partager des bandes de fréquences avec des détecteurs en orbite géostationnaire à condition que l'angle géocentrique maximal par rapport au gain d'antenne ne dépasse pas les valeurs indiquées à la Fig. 18.

FIGURE 18

**Angle géocentrique maximal admissible pour les LIS OSG**



#### 4.2.5 Comparaison et conclusions concernant le partage avec des détecteurs en orbite géostationnaire

- Les détecteurs en orbite géostationnaire peuvent recevoir des niveaux de puissance supérieurs au seuil de brouillage en provenance de LIS LEO lorsqu'il se produit un couplage au voisinage de l'axe des faisceaux principaux des antennes.
- La totalité des systèmes LEO examinés à titre d'exemple occasionneraient des brouillages au détecteur en orbite géostationnaire s'ils étaient mis en service dans ces bandes.
- Les constellations LEO produisant 33 LIS ou moins dans cette bande pourraient fonctionner sans enfreindre le critère temporel appliqué au partage.
- La totalité des LIS OSG, à l'exception de quelques liaisons très longues, peuvent fonctionner en partage de fréquences avec des détecteurs en orbite géostationnaire sans dépasser à aucun moment le seuil de brouillage. Tous les systèmes en projet ou fonctionnant dans d'autres bandes pris comme exemple pourraient fonctionner en partage de fréquences s'ils étaient mis en œuvre dans cette bande.

## 5 Conclusions

### 5.1 Partage dans la bande de fréquences 116-126 GHz

Dans la gamme de 116 à 126 GHz, le partage avec le SIS n'est possible que pour les LIS entre les satellites OSG. Il ressort de l'analyse qu'il sera moins aisé, par rapport aux systèmes en projet ou mis en œuvre dans d'autres bandes, d'exploiter des LIS non OSG qui ne dépassent pas le seuil de brouillage du détecteur aussi bien en ce qui concerne la longueur de trajet que le nombre de circuits autorisés. Les systèmes intersatellites en orbite géostationnaire peuvent partager des bandes de fréquences avec le détecteur à condition que leur puissance à l'altitude orbitale de 1 000 km du détecteur soit limitée de la manière suivante:

$$-148 \text{ dB(W/(m}^2 \cdot 200 \text{ MHz))}$$

### 5.2 Partage dans les bandes de fréquences comprises entre 174,5 et 190 GHz

De même, le partage avec le SIS dans les bandes de fréquences comprises entre 174,5 et 190 GHz n'est pas possible sauf pour les LIS sur l'orbite géostationnaire. Les systèmes intersatellites en orbite géostationnaire peuvent partager des bandes de fréquences avec des détecteurs à condition que leur puissance à l'altitude orbitale de 1 000 km du détecteur soit limitée de la manière suivante:

$$-144 \text{ dB(W/(m}^2 \cdot 200 \text{ MHz))}$$

### 5.3 Limitation des techniques de mesure des détecteurs en vue de faciliter le partage

Il est peu probable que l'on puisse assurer une protection adéquate des détecteurs passifs en ajustant ou en limitant les techniques de mesure des détecteurs.

---