

RECOMMANDATION UIT-R RA.1750-0*

Planification entre le service d'exploration de la Terre par satellite (active) et le service de radioastronomie dans les bandes à 94 GHz et à 130 GHz

(2006)

Domaine de compétence

La présente Recommandation décrit les mesures techniques que doivent mettre en œuvre le service d'exploration de la Terre par satellite (SETS) (active) et le service de radioastronomie (SRA) pour minimiser les effets potentiels des radars de cartographie des nuages du service d'exploration de la Terre par satellite (active) dans les bandes à 94 GHz et à 130 GHz sur les observations du SRA dans les bandes adjacentes.

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que les travaux de cartographie des nuages qui sont actuellement effectués et qui seront effectués dans l'avenir, au moyen de radars embarqués à bord de satellites du service d'exploration de la Terre par satellite (SETS) (active) dans les bandes à 94 et à 130 GHz partagées avec le service de radioastronomie (SRA) devraient donner des résultats scientifiques importants sur le climat mondial;
- b) que dans le cadre du SRA d'importantes questions scientifiques devraient continuer à être étudiées dans les bandes à 94 et à 130 GHz partagées avec le SETS (active);
- c) qu'aux longueurs d'ondes millimétriques, le gain de l'antenne directive mesuré sur un satellite et sur des stations au sol du SRA est très élevé, d'où le risque d'un couplage très fort entre les lobes principaux d'une antenne émettrice de satellite et d'une antenne du SRA;
- d) que pour obtenir des échos radar adéquats provenant de phénomènes atmosphériques, la puissance isotrope rayonnée équivalente (p.i.r.e.) des radars en orbite du SETS (active) doit être très élevée, ce qui risque d'occasionner des dommages physiques aux récepteurs sensibles du SRA dans le cas d'un couplage entre lobes principaux;
- e) que des instruments particuliers du SRA peuvent comporter des dizaines, voire des centaines d'antennes orientées dans la même direction, dont certaines ou la totalité peuvent se retrouver instantanément dans le faisceau principal d'un satellite du SETS (active), ce qui aggrave considérablement le phénomène de couplage entre lobes principaux;
- f) qu'aux longueurs d'ondes millimétriques, la technologie actuelle ne permet pas la création de filtres coupe-bande très performants présentant un affaiblissement d'insertion suffisamment faible dans la bande passante du signal utile;
- g) que les récepteurs utilisés par le SRA aux longueurs d'ondes millimétriques doivent faire appel à des technologies de pointe afin d'être suffisamment sensibles pour pouvoir effectuer des

* La Commission d'études 7 des radiocommunications a apporté des modifications rédactionnelles à la présente Recommandation en 2017 conformément aux dispositions de la Résolution UIT-R 1.

recherches astronomiques sur l'origine de la Terre, et que ces technologies se caractérisent actuellement par une portée dynamique très limitée et un seuil de saturation relativement faible;

h) que, en raison de la p.i.r.e. élevée prévue du radar de cartographie des nuages, le couplage faisceau principal-lobes latéraux entre l'émetteur satellite et la station SRA peut entraîner la saturation du récepteur SRA, ce qui risque de compromettre la réalisation des observations au niveau d'une station SRA pendant une fraction importante de temps durant laquelle le satellite du radar actif de cartographie des nuages se trouve au-dessus de l'horizon local;

j) que la technologie actuelle permet désormais aux stations SRA d'être équipées de systèmes récepteurs dotés d'un réseau multi-éléments dans le plan focal donnant dans le faisceau principal une sensibilité maximale équivalant à celle de 1 000 récepteurs à pixel unique,

considérant en outre

a) que par la nécessité, les observatoires du SRA en ondes millimétriques ne sont exploités aux fréquences partagées avec le SETS (active) que par temps clair et sec, de sorte qu'en raison de l'atténuation atmosphérique, la station SRA n'est pas protégée du radar satellite;

b) que la planification entre les opérateurs du SETS (active) et les radioastronomes est essentielle pour éviter d'endommager les instruments du SRA et pour préserver autant que possible l'intégrité des données du SRA et du SETS (active);

c) que le Groupe de coordination des fréquences spatiales (SFCG, *Space Frequency Coordination Group*) et le Comité inter-unions pour l'attribution de fréquences à la radioastronomie et à la science spatiale (IUCAF, *Inter-Union Commission on Frequency Allocations for Radio Astronomy and Space Science*) ont élaboré une procédure de planification commune¹ entre les Membres du Groupe SFCG et les observatoires de radioastronomie afin que les radars spatiaux de cartographie des nuages puissent être exploités dans la bande 94-94,1 GHz,

recommande

1 que le plus tôt possible dans le cycle de conception d'un système radar de cartographie des nuages du SETS (active), des contacts soient établis entre les concepteurs et les opérateurs du SETS (active) et les sites de radioastronomie, l'Organisation internationale IUCAF pouvant servir de point de liaison initial entre les opérateurs du SETS et les observatoires de radioastronomie potentiellement affectés;

2 que des contacts étroits entre les radioastronomes et les opérateurs de systèmes SETS (active) soient maintenus tout au long des cycles de conception et d'exploitation de tous les systèmes qui doivent utiliser des fréquences en partage dans les bandes à 94 et à 130 GHz, de sorte que chaque partie ait connaissance de l'évolution des travaux pertinents de l'autre partie;

3 d'effectuer la conception et l'exploitation des systèmes fonctionnant dans chaque service de façon à prendre en considération les questions de partage dans toute la mesure du possible;

4 de tenir compte des considérations relatives au partage, présentées dans l'Annexe 1, lors de la conception et de l'exploitation de ces systèmes;

5 de prendre en considération l'exemple donné dans l'Annexe 2, illustrant l'incidence d'un satellite exploité dans le service SETS (active) sur un instrument fonctionnant dans le service de radioastronomie, lors de la conception et de l'exploitation de stations de ces deux services.

¹ Voir la Résolution 24-2 du Groupe SFCG, à l'adresse suivante:
[https://www.sfcgonline.org/resolutions/RES_SFCG_24-2_\(94_GHz_allocation_use\).pdf](https://www.sfcgonline.org/resolutions/RES_SFCG_24-2_(94_GHz_allocation_use).pdf)

Annexe 1

Considérations relatives à la conception et à l'exploitation de systèmes destinés à être utilisés en partage entre le SETS (active) et le SRA dans les bandes à 94 GHz et à 130 GHz

Dans le cas du service SETS (active)

- Il convient de concevoir un système radar actif conformément aux meilleures pratiques d'ingénierie afin de minimiser les rayonnements non désirés ainsi que les rayonnements hors axe occasionnés par les antennes radar aux lobes latéraux.
- Il convient, dans la mesure du possible, de concevoir et d'exploiter un système SETS (active) de telle façon à éviter qu'il émette, par son faisceau principal, directement en direction de stations du SRA.
- Les opérateurs d'un système SETS (active) devraient veiller à ce que toute l'aide opérationnelle possible soit fournie aux stations SRA (par exemple, la fourniture en temps utile d'informations sur l'orbite du radar satellite).

Dans le cas du service SRA

- Il convient de concevoir des stations SRA de telle façon que leurs antennes ne puissent pas pointer directement vers le radar en orbite grâce, notamment, à une planification dynamique et souple des observations.
- Les stations SRA devraient fournir le moyen de protéger leurs récepteurs de dommages physiques au cas où il serait impossible d'éviter complètement un couplage entre lobes principaux.
- Il convient, dans toute la mesure du possible, sans amoindrir les capacités de la station SRA, de concevoir des systèmes de récepteurs SRA présentant une forte résistance aux dommages résultant des émissions de puissance élevée reçues ainsi qu'une gamme dynamique aussi élevée que possible.
- Il convient de concevoir des antennes SRA présentant des niveaux dans les lobes latéraux les plus faibles possibles de façon à pouvoir poursuivre des observations lorsque le radar satellite se situe au-dessus de l'horizon local, sans que ce radar soit orienté vers la station SRA.
- Il convient de concevoir des systèmes d'acquisition de données SRA qui puissent enregistrer ou signaler des cas de brouillages susceptibles d'être causés par le radar en orbite, sur la base des paramètres opérationnels connus relatifs au SRA et au satellite.
- Le SRA devrait continuer à consacrer des ressources au perfectionnement de techniques de réduction des brouillages radioélectriques en temps réel ou après observation.

Annexe 2

Exemple de considérations relatives au partage à prendre en considération dans la conception et l'exploitation de systèmes du SRA et du SETS (active) dans la bande à 94 GHz

Le satellite CloudSat et son incidence sur le grand réseau millimétrique de l'Atacama (Atacama Large Millimeter Array – ALMA)

Résumé

L'observatoire ALMA, en cours de construction au nord du Chili, deviendra le premier observatoire mondial aux longueurs d'ondes millimétriques et submillimétriques. CloudSat est un radar placé à bord d'un satellite, qui est orienté vers le bas et qui fonctionne à 94 GHz; sa mise en service était prévue en 2005. La puissance isotrope rayonnée équivalente (p.i.r.e.) de crête du faisceau radar est d'environ 4×10^9 W, ce qui suffit pour endommager les récepteurs ALMA au sol dans le cas où les antennes d'ALMA seraient pointées directement en direction du radar en orbite. Même si la probabilité que cela se produise est très faible, l'observatoire ALMA doit prendre certaines précautions d'ordre opérationnel pour éviter que ses récepteurs soient endommagés et pour signaler les données qui seront contaminées par les brouillages radar.

Station de radioastronomie ALMA

ALMA est un projet international qui vise à concevoir un télescope fonctionnant dans les domaines millimétriques et submillimétriques. Il repose sur un partenariat égal entre l'Europe, l'Amérique du Nord et le Japon, en coopération avec la République du Chili.

Les principales caractéristiques du télescope ALMA sont les suivantes:

- 64 antennes de 12 m de diamètre situées à une altitude de 5 000 m, sur le site de Llano de Chajnantor (Chili).
- Instrument d'imagerie dans toutes les fenêtres atmosphériques entre 10 mm et 350 microns (31,3 GHz à 950 GHz).
- Configurations de réseau entre 150 m et 10 km environ.
- Résolution spatiale de 10 milliarcsecondes (10 fois supérieure à celle du télescope spatial Hubble).
- Possibilité de convertir des arcminutes de sources en degrés pour une résolution de l'ordre d'une arcsec.
- Résolution de vitesse inférieure à 0,05 km/s.
- Instrument d'imagerie rapide et souple.
- Instrument le plus grand et le plus sensible au monde aux longueurs d'ondes millimétriques et submillimétriques.

Mission du radar de cartographie des nuages

CloudSat est le premier radar spatial fonctionnant à 94 GHz. Il fait partie de la constellation «A-Train», composée de cinq satellites, dont la plupart (à l'exception de CloudSat) sont des satellites de détection passifs. De droite à gauche sur l'orbite, on trouve les satellites suivants: Aqua, Cloud Mapping, Radar, Calipso, Parasol et Aura. Parasol, Aqua et Aura sont déjà en orbite; le lancement de CloudSat était prévu en 2005. Tous les satellites auront une orbite analogue, disposée de façon à

présenter des trajectoires au sol identiques, séparées les unes des autres de quelques secondes seulement. La mission scientifique de CloudSat est décrite en détail dans les paragraphes qui suivent:

CloudSat est un satellite destiné à mesurer la structure verticale des nuages depuis l'espace. Une fois lancé, CloudSat sera en orbite parmi une constellation de satellites (A-Train) comprenant les satellites Aqua et Aura de la NASA, Calipso, un satellite lidar faisant l'objet d'une coopération entre la NASA et le CNES, et Parasol, un satellite du CNES transportant un polarimètre. La spécificité de CloudSat réside dans sa capacité à suivre une orbite précise, ce qui permet à l'empreinte du lidar de Calipso de chevaucher les champs de vision du radar de Cloudsat et ce qui permet par ailleurs d'effectuer les autres mesures de la constellation. La précision et la quasi-simultanéité de ce chevauchement font de cette constellation un système unique d'observation multisatellites pour l'étude des processus atmosphériques essentiels au cycle hydrologique.

Les profils verticaux des propriétés des nuages fournis par le satellite CloudSat à l'échelle mondiale permettent de combler une lacune importante dans l'étude des mécanismes de rétroaction liant les nuages au climat. Pour mesurer ces profils, on devra combiner les données radar de CloudSat aux données obtenues par d'autres capteurs actifs et passifs de la constellation.

Caractéristiques techniques de CloudSat

Le radar CloudSat fonctionne à la fréquence de 94,05 GHz et est placé sur une orbite polaire héliosynchrone à une altitude de 705 km; les trajectoires au sol de l'orbite (voir ci-dessous) se répètent précisément tous les 16 jours. La puissance d'émission de crête du radar est de 1 800 W (passant à 1 500 W à la fin de sa durée de vie) dans une antenne présentant un gain de 63 dBi, ce qui donne une p.i.r.e. de 4×10^9 W environ. La polarisation est linéaire. Le radar pointe en direction du nadir géodésique avec une précision de $0,07^\circ$. L'empreinte nominale du faisceau radar au sol est de 1,4 km de diamètre environ, mais l'extension de l'empreinte aux premiers zéros du diagramme est de 3 km. La précision d'observation est de $0,053^\circ$ et la précision de visée est de l'ordre de 1 km. Le télescope ALMA, qui présente un diamètre de 14 km, sous-tend un angle de $1,14^\circ$ tel qu'observé depuis le satellite. La trajectoire au sol réelle peut présenter une erreur latérale de ± 10 km, due à la présence d'un élément imprévisible de traînée atmosphérique perturbant l'orbite. La durée d'impulsion radar est approximativement de 3,3 μ s et la fréquence de répétition des impulsions varie entre 3 700 et 4 300 Hz, ce qui donne une puissance d'émission radar moyenne de 25 W environ.

L'antenne de CloudSat est une parabole excentrée présentant une largeur de faisceau de $0,108^\circ$ et un gain dans l'axe de visée de 63 dBi. La distance jusqu'au premier zéro du diagramme est de $\pm 0,125^\circ$. Le premier lobe latéral principal, à $0,2^\circ$ de l'axe de visée, présente un gain de 47 dBi. Le gain d'antenne atteint 0 dBi à $\pm 6,4^\circ$ environ, et au-delà de $\pm 11^\circ$, la réponse de l'antenne ne dépasse pas -12 dBi environ.

Etant donné que le faisceau radar est toujours orienté vers le bas, le long du vecteur gravitationnel local, les antennes d'ALMA ne peuvent être orientées directement vers le faisceau radar que si elles sont pointées vers le zénith, lorsque le radar survole le site. Cette situation est improbable. Le faisceau de CloudSat sera certes parfois dirigé loin du nadir, à des fins d'étalonnage, mais ces mesures seront toujours effectuées au-dessus de l'océan, ce qui ne devrait pas poser de problème à la station ALMA.

Orbite décrite par le satellite CloudSat

Etant donné que le faisceau radar est orienté vers le nadir, seul le sol situé juste au-dessous du satellite (le point subsatellite) est directement éclairé. La période orbitale est de 98,8 min, ce qui représente environ 15 orbites par jour, l'inclinaison d'une orbite étant de $98,2^\circ$. Il s'agit d'une orbite héliosynchrone, disposée de telle façon que les trajectoires au sol se répètent exactement tous les 16 jours. Au niveau de la station ALMA, 5 ou 6 orbites par jour s'élèveront au-dessus de l'horizon. Au bout des 16 jours, on aura relevé 233 orbites dont les trajectoires au sol auront couvert

régulièrement la Terre tous les 170 km (à l'équateur), le nombre de passages ascendants et de passages descendants étant évidemment égal.

CloudSat décrira une orbite analogue à celle du premier satellite de la constellation A-Train, à savoir le satellite AQUA, qui est déjà en orbite. Dans l'analyse qui suit, on a utilisé les paramètres orbitaux du satellite AQUA, car on les considère comme étant représentatifs du futur satellite CloudSat. Ces éléments resteront probablement représentatifs, mais peuvent ne pas correspondre à l'orbite précise de CloudSat.

Les éléments orbitaux du satellite AQUA (26 juillet 2004) qui sont utilisés dans les simulations ci-après sont les suivants:

```
1 27424U 02022A 04207,86676596 0,00000493 00000-0 11941-3 0 7961
```

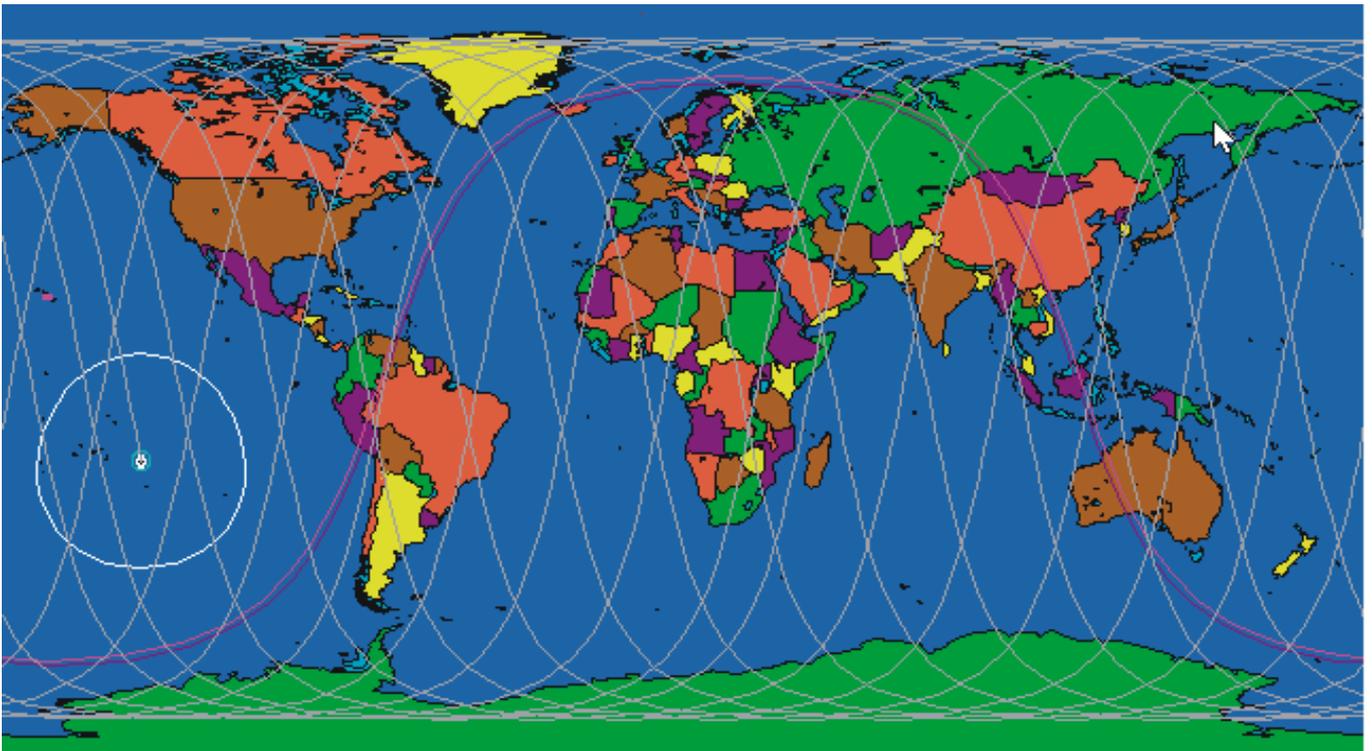
```
2 27424 98,2212 147,2739 0001153 89,3378 270,7995 14,57121862118484
```

La plupart des programmes normalisés de poursuite des satellites prévoient ce format. Sur cette base, la période orbitale du satellite AQUA est actuellement de 98,83 min et l'inclinaison de l'orbite est de 98,221°. L'altitude au-dessus du sol est de 705 km environ.

Les analyses orbitales qui suivent ont été effectuées au moyen d'une série de logiciels différents. La Fig. 1 représente une carte du monde sur laquelle sont tracées les trajectoires au sol du satellite Aqua après une orbite de 24 h. Il convient de noter qu'en raison de l'inclinaison de l'orbite (98,2°), aucune trajectoire au sol ne dépasse des latitudes de $\pm 81,8^\circ$. Sont représentées les trajectoires orbitales ascendantes et descendantes.

FIGURE 1

Trajectoires du satellite Aqua en 24 h

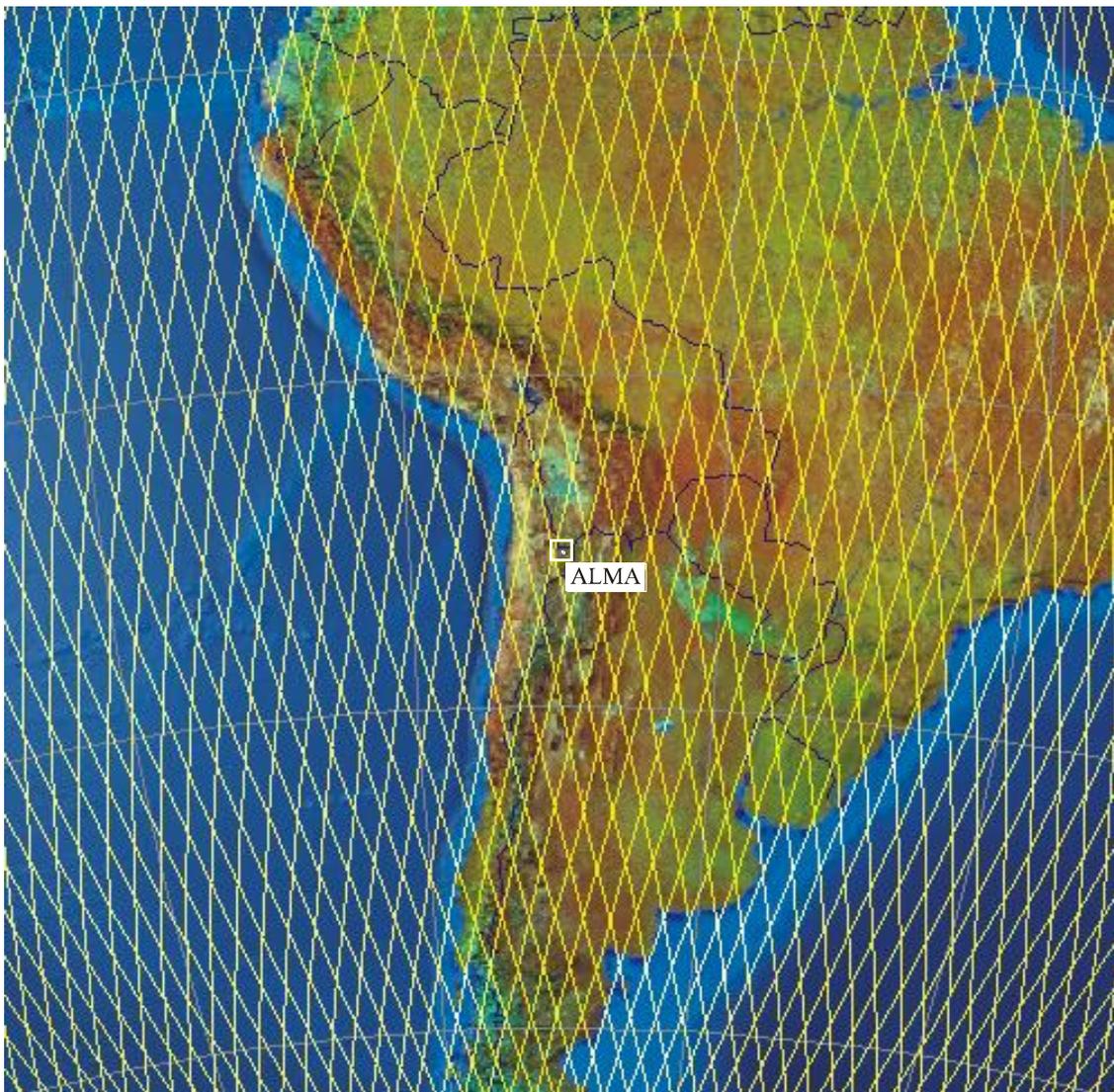


Le cercle lumineux délimite la surface type encerclée par l'horizon terrestre visible depuis le satellite Aqua.

La Fig. 2 représente une carte de l'Amérique du Sud indiquant les coordonnées de la station ALMA ainsi que l'ensemble complet des trajectoires au sol sur 16 jours. Pour ces paramètres orbitaux, sont représentées TOUTES les trajectoires au sol observées depuis le satellite; les trajectoires se répètent précisément tous les 16 jours. Comme dans les Fig. 1 et 3, les orbites ascendantes (S-N) s'inclinent de la droite en bas à la gauche en haut, alors que les orbites descendantes (N-S) s'inclinent de la droite en haut à la gauche en bas.

FIGURE 2

Carte de l'Amérique du Sud représentant les trajectoires au sol du satellite Aqua sur une période entière de 16 jours ainsi que la position de la station ALMA



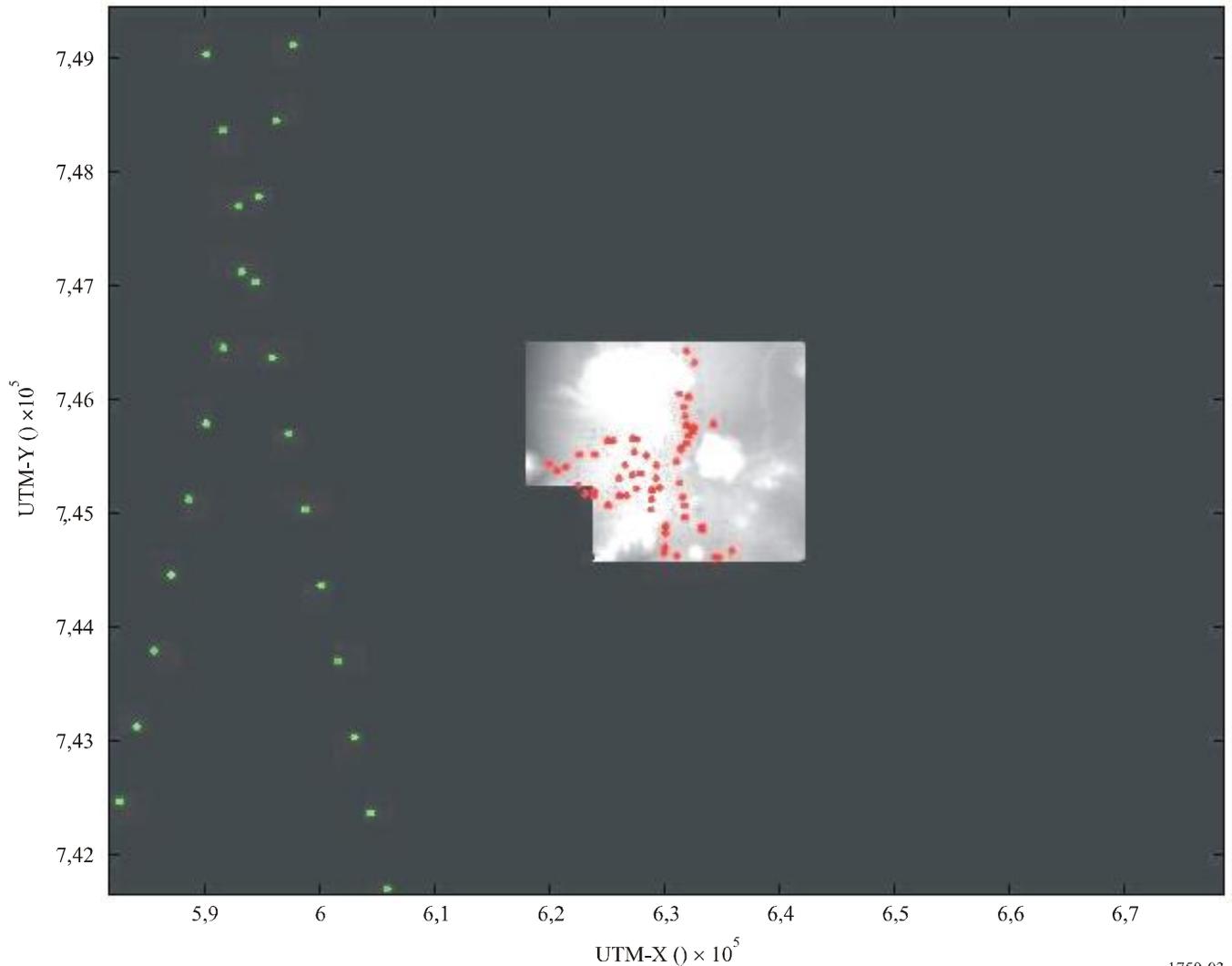
1750-02

Les trajectoires se répètent précisément tous les 16 jours. Les trajectoires au sol définitives du satellite CloudSat seront similaires, mais pas identiques.

La Fig. 3 représente de façon plus détaillée les trajectoires au sol passant à proximité de la station ALMA sur une période quelconque de 16 jours.

FIGURE 3

Trajectoires au sol du satellite Aqua: les points verts sur la gauche indiquent les trajectoires au sol du satellite Aqua les plus proches du réseau ALMA; ces points sont séparés les uns des autres d'une seconde le long de l'orbite d'Aqua, bien que le radar émette évidemment en continu



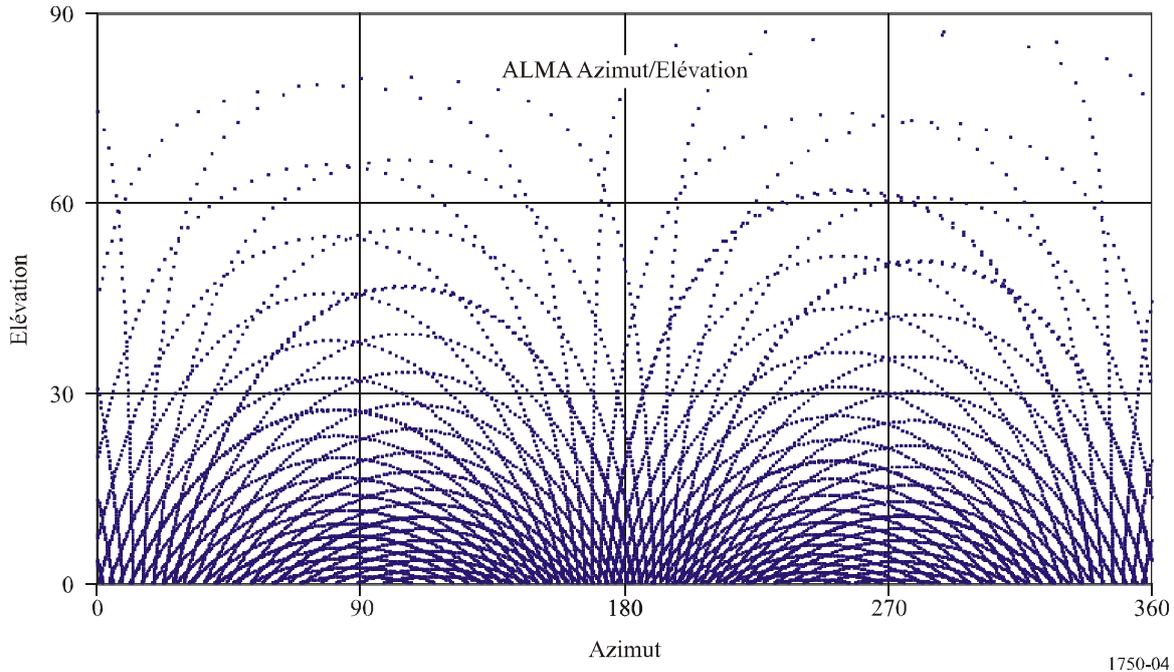
1750-03

Les points rouges au centre indiquent les positions de l'antenne dans la configuration la plus grande de la station ALMA. Les marques de graduation indiquent les coordonnées UTM tous les 10 km. La trajectoire au sol du satellite Aqua s'approche à environ 30 km du centre d'ALMA. Parmi les deux trajectoires au sol représentées, l'une est ascendante (S-N) et l'autre descendante (N-S). Un intervalle de 8 jours environ sépare ces deux trajectoires, mais l'une comme l'autre se répètent tous les 16 jours.

Ces trajectoires orbitales sont considérées comme étant représentatives; la trajectoire orbitale définitive du satellite CloudSat pourrait passer plus près ou plus loin de la station ALMA.

La Fig. 4 représente l'azimut et l'élévation de toutes les trajectoires du satellite observées depuis la station ALMA, sur une période de 16 jours.

FIGURE 4
Trajectoires en termes d'azimut et d'élévation du satellite Aqua, observées depuis la station ALMA sur une période de 16 jours



L'azimut et l'élévation du satellite Aqua sont indiqués pour chaque passage du satellite, toutes les 5 s. L'élévation maximale est inférieure à 3° par rapport à la direction du zénith au centre d'ALMA. Même si l'orbite du satellite AQUA peut ne pas correspondre exactement à l'orbite définitive du satellite CloudSat, les données statistiques des positions du satellite seront très analogues.

Puissance reçue par une antenne ALMA et conséquences pour la survie du récepteur

On distingue quatre catégories de couplage entre le radar CloudSat et les faisceaux d'antenne ALMA.

Catégorie 1: Interaction entre les lobes latéraux lointains. Dans l'hypothèse d'un radar et d'antennes ALMA présentant un gain dans les lobes latéraux de 0 dBi, pour un espacement de 705 km (l'altitude orbitale du satellite CloudSat) et une fréquence de 94 GHz, l'affaiblissement de propagation (entre les antennes isotropes) est de 188,9 dB. Pour une puissance d'émission (de crête) de 1,8 kW = 32,5 dBW, la puissance captée par l'antenne de réception est de 32,5-188,9 = -156,4 dBW. Comparons cette puissance à la puissance de bruit du système dans un récepteur avec une largeur de bande de 4 GHz et $T_{\text{sys}} = 20$ K, soit $k.T.B = 1,38 \times 10^{-23} \times 20 \times 4 \times 10^9 = 1,10 \times 10^{-12}$ W = -119,6 dBW. Le signal de crête dans le cas lobe latéral à lobe latéral est par conséquent de l'ordre de 37 dB inférieur au bruit du système dans une largeur de bande de 4 GHz. Le récepteur n'est donc pas saturé, même pour des lobes latéraux présentant un gain quelque peu supérieur à 0 dBi. Même exactement à la fréquence radar, ALMA détecterait difficilement le signal dans cette largeur de bande.

Catégorie 2: Interaction entre le faisceau principal du radar et les lobes latéraux lointains des antennes d'ALMA. Le gain dans le faisceau principal de l'antenne radar est de 63 dB. La puissance captée par l'antenne de réception est de:

$$(-188,9 + 32,5) + 63 = -93,4 \text{ dBW} = -63,4 \text{ dBm.}$$

Catégorie 3: Interaction entre les lobes latéraux du radar et le faisceau principal d'une antenne ALMA:

Le gain dans le faisceau principal d'une antenne de 12 m, à la fréquence de 94 GHz, dans l'hypothèse d'un rendement d'ouverture de 70%, est de 80 dBi. La puissance captée par cette antenne pointant vers les lobes latéraux à 0 dBi du radar émettant à une puissance de 32,5 dBW est de:

$$(-188,9 + 32,5) + 80 = -76,4 \text{ dBW} = -48,4 \text{ dBm}.$$

Comparons ces valeurs du couplage faisceau principal-lobe latéral et lobe latéral-faisceau principal calculées en Catégorie 2 et en Catégorie 3 avec le bruit thermique équivalent dans une bande du récepteur de 4 GHz, à l'entrée du récepteur, de $-119,6 \text{ dBW}$, calculé en Catégorie 1. Dans les deux cas, la puissance radar reçue est supérieure d'une dizaine de dB à la puissance de bruit du système. Il est quasiment certain que cela entraînera une saturation du récepteur ALMA dans la Bande 3, rendant impossible toute observation utile, mais aucun dommage physique ne sera occasionné. En raison du déplacement du satellite (la vitesse de l'empreinte est d'environ 7 km/s), ces interactions dureraient moins d'une seconde pour toute antenne unique, ou environ 2 s si l'on considère la configuration ALMA la plus grande (14 km).

Catégorie 4: Interaction entre lobes principaux. A partir des valeurs utilisées ci-dessus, la puissance reçue est de (arrondie au décibel le plus proche) $(-188,9 + 32,5) + 63 + 80 = -13 \text{ dBW} = 17 \text{ dBm} = 50 \text{ mW}$. Ce niveau de puissance est nuisible pour le récepteur.

Pour un mélangeur SIS, la valeur de saturation est de 1 mW par micromètre carré de la jonction. Cette valeur est obtenue avec un courant continu, à partir d'essais effectués il y a quelques années. Avec un mélangeur fonctionnant à 90 GHz, on a calculé qu'une puissance d'entrée de 60 mW donnait une puissance de 2 mW par micromètre carré, ce qui représente simplement 2 fois la valeur de saturation. Le niveau de saturation pour la puissance pulsée dépendrait de la constante de temps thermique de la jonction, qui n'est pas connue. Il serait possible de mesurer le niveau correspondant pour des impulsions de 3,3 μs , mais ce calcul serait difficile car il faudrait pour cela réaliser un montage Dewar permettant une injection d'impulsions en courant continu. Il a par ailleurs été constaté qu'au-dessus de 160 GHz environ, la fréquence de coupure du guide d'ondes à l'entrée du cornet d'alimentation devrait être telle qu'elle permette d'assurer la protection contre les signaux à 94 GHz.

Angle d'évitement nécessaire entre le satellite CloudSat et le télescope ALMA

1 Détérioration du récepteur

Les antennes ALMA devraient éviter de pointer en direction du zénith lorsque le satellite CloudSat survole la station ALMA. Du point de vue de la survie du récepteur, quel angle faut-il respecter entre les antennes ALMA et le faisceau d'antenne de CloudSat? Jusqu'à quel angle par rapport à la direction du zénith la sécurité est-elle assurée?

Comme il est indiqué ci-dessus, la puissance reçue par une antenne ALMA avec un couplage parfait entre lobes principaux est environ de deux fois le seuil probable de détérioration du récepteur. Un objectif relativement prudent serait d'éviter de recevoir plus de 10% de ce seuil. Dans le cas hypothétique le plus défavorable dans lequel le satellite CloudSat survolerait directement la station ALMA, les antennes ALMA devraient alors être pointées dans une direction autre que celle du zénith de façon à obtenir un affaiblissement d'au moins 13 dB par rapport au faisceau principal. Le niveau dans les lobes latéraux est censé être inférieur à -13 dB .

– A une fréquence de 94,05 GHz, une parabole de 12 m de diamètre présente une ouverture de faisceau à 3 dB (largeur complète à mi-puissance) d'environ $0,019^\circ$, à savoir, $\pm 0,0093^\circ$. En

prenant pour hypothèse une forme de faisceau de type gaussien, le point à -13 dB se situera à $\pm 0,0193^\circ$.

- L'incertitude de pointage ALMA (définition du «zénith») devrait être inférieure à $0,003^\circ$.
- Une plus grande incertitude réside dans l'erreur potentielle de pointage du satellite CloudSat; le faisceau radar peut dévier du vecteur gravitationnel local jusqu'à $0,07^\circ$, avec une erreur additionnelle possible de pointage de $0,053^\circ$. Cela donne une marge supplémentaire d'évitement du zénith de $0,053 + 0,07 = 0,123^\circ$.
- L'ouverture de faisceau du radar du satellite, jusqu'aux premiers zéros, est de $\pm 0,125^\circ$.
- Réfraction anormale: en principe, dans des conditions atmosphériques anormales, la direction d'arrivée prévue du signal radar à 94 GHz pourrait être déviée de $0,01^\circ$ au maximum.
- Les récepteurs ALMA pour différentes bandes sont tous situés dans le même plan focal, l'angle de pointage dans le champ lointain pouvant varier de $0,4^\circ$ environ.
- Certaines antennes peuvent posséder un réflecteur secondaire rotatif pouvant déplacer le faisceau d'environ $0,05^\circ$ au maximum.
- La longitude et la latitude du radiotélescope ALMA lui-même peuvent varier de $\pm 0,065^\circ$, ce qui donne lieu à une incertitude quant à l'alignement de l'angle de chaque antenne locale par rapport au zénith sur son propre vecteur de gravité local; par sécurité, il convient de prendre en considération cette incertitude dans la marge de sécurité.

En additionnant toutes ces marges (on procède à une addition directe et non à une addition quadratique), on obtient une marge de sécurité globale d'environ $\pm 0,8^\circ$. Par conséquent, dans le cas le plus défavorable où le satellite CloudSat survolerait directement la station ALMA, la sécurité des récepteurs d'ALMA devrait être assurée, pour autant qu'aucune des antennes ne pointe à $0,8^\circ$ de la direction du zénith.

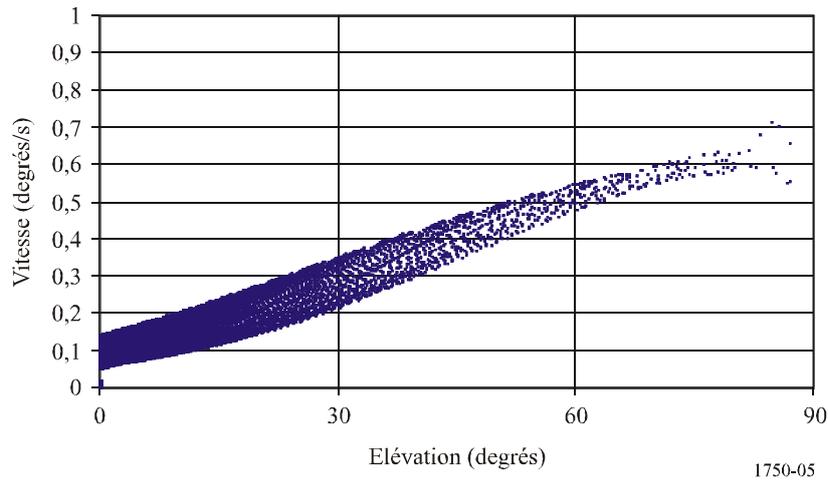
2 Brouillages

Les antennes de la station ALMA devraient éviter de pointer en direction du satellite CloudSat à chaque fois que ce dernier se trouve au-dessus de l'horizon, ceci afin d'éviter des brouillages excessifs. Jusqu'à quel angle les antennes d'ALMA peuvent-elles pointer en direction de CloudSat pour que le brouillage soit limité à des niveaux acceptables?

D'après les calculs ci-dessus, la puissance reçue par une antenne ALMA, lorsque le faisceau principal d'antenne ALMA est orienté en direction des lobes secondaires de CloudSat, est de $-76,4$ dBW, la puissance thermique du récepteur étant de $-119,6$ dBW; autrement dit, le niveau de puissance du satellite CloudSat est de $(119,6 - 76,4) = 43$ dB supérieur au bruit thermique du récepteur dans la largeur de bande prise pour hypothèse. En supposant que les observations ne sont pas effectuées dans la bande de fréquences du radar, par analogie avec les critères de brouillage VLBI de l'UIT, la puissance totale de brouillage dans la bande du récepteur devrait être maintenue au-dessous de 1% du bruit thermique (c'est-à-dire au-dessous de -140 dBW). Il faut par conséquent appliquer un affaiblissement de $43 + 20 = 63$ dB, ou faire passer le gain de l'antenne ALMA de 80 dBi à 17 dBi. D'après le modèle d'enveloppe des lobes latéraux d'antenne décrit dans la Recommandation UIT-R SA.509, cet affaiblissement devrait se produire à environ 4° par rapport au faisceau principal; toutefois, ce modèle d'antenne ne s'applique qu'aux fréquences comprises entre 1 et 30 GHz. D'après des mesures effectuées sur un télescope de 30 m de diamètre à la fréquence de 39 GHz, il est recommandé, pour obtenir un gain de 17 dBi, d'appliquer un décalage de $\pm 10^\circ$. Par conséquent, il convient, pour éviter des brouillages excessifs dans la bande à 90 GHz du télescope ALMA, à une fréquence éloignée de la fréquence du satellite CloudSat, que les antennes d'ALMA respectent un angle de $\pm 10^\circ$ par rapport à la direction du satellite CloudSat à chaque fois que le radar se situe au-dessus de l'horizon.

FIGURE 5

Plage des vitesses angulaires des satellites Aqua/CloudSat depuis la station ALMA, en fonction de l'angle d'élévation du satellite



On peut ainsi calculer la durée possible du brouillage. A un angle d'élévation de 30° , si le satellite passe à proximité du faisceau ALMA, des brouillages devraient se produire pendant une durée d'environ 70 s.

Si l'on procède à des observations dans la bande à 90 GHz lorsque le satellite CloudSat passe à moins de 10° du champ de vision d'ALMA, les données devraient être signalées comme étant suspectes. La Fig. 5 représente la plage de vitesses angulaires du satellite depuis la station ALMA, en degrés/seconde, en fonction de l'angle d'élévation du satellite. On peut ainsi calculer la durée probable de brouillage dans les cas où le satellite passerait à proximité (c'est-à-dire à $\pm 10^\circ$) du faisceau d'ALMA. Pour un passage du satellite à la verticale, cette période de brouillage pourrait atteindre environ 30 s, alors que pour un passage du satellite à proximité du faisceau d'ALMA, à une élévation de 30° , le brouillage pourrait durer environ 70 s, voire plus longtemps pour des élévations encore plus faibles.

3 Harmoniques

Les amplitudes des deuxième et troisième harmoniques (188,1 GHz et 282,15 GHz) de l'émetteur du satellite Cloudsat ne sont pas connues mais devraient raisonnablement être de 50-60 dB au-dessous de l'amplitude de la fréquence fondamentale. La p.i.r.e. dans le faisceau principal est incertaine: en principe, le gain d'antenne dans l'axe de visée, à la deuxième harmonique, pourrait être de 6 dB supérieure et, à la troisième harmonique, de 10 dB supérieure au gain à la fréquence fondamentale, même s'il est peu probable que l'antenne de Cloudsat soit illuminée de façon optimale aux fréquences harmoniques (plus vraisemblablement, l'énergie résiduelle associée aux harmoniques sera dispersée dans les lobes secondaires de l'émetteur). A moins que le satellite Cloudsat ne se trouve à l'intérieur du faisceau principal de l'antenne ALMA (c'est-à-dire à $\pm 0,02^\circ$), il y a peu de risques que le brouillage provenant des harmoniques de Cloudsat pose un problème précisément aux fréquences harmoniques. La probabilité pour que le faisceau ALMA soit orienté aussi près du satellite Cloudsat en mouvement est extrêmement faible, et ce brouillage durerait moins d'une seconde au niveau d'une antenne quelconque lors d'un passage de satellite donné. Néanmoins, le logiciel d'ALMA devrait probablement en signaler l'occurrence.

4 Incidences sur le télescope ALMA

Sont énumérées ci-après les mesures qu'il convient de prendre pour que le télescope ALMA évite, a) d'endommager les récepteurs, et b) de corrompre les données.

- L'antenne du télescope ALMA ne devrait jamais pointer à $\pm 0,8^\circ$ du zénith. Si cela s'avérait nécessaire, par exemple à des fins de maintenance ou de transport, il conviendrait alors de placer un obturateur, ou l'atténuateur solaire, au-dessus des récepteurs. Si l'on devait effectuer des observations à $0,8^\circ$ du zénith, le logiciel de commande devrait alors vérifier la position du satellite Cloudsat avant de permettre la poursuite plus proche de la direction du zénith.
- A chaque fois que les antennes d'ALMA sont pointées à 10° du satellite Cloudsat, toutes données prises au moins dans la bande à 90 GHz devraient alors automatiquement être signalées comme étant incertaines. Un risque de brouillage harmonique est possible si le satellite Cloudsat passe à $0,02^\circ$ du champ de vision d'ALMA.
- Les observations effectuées dans la bande de fréquences 94,0-94,1 GHz devraient de préférence être limitées aux moments où le satellite Cloudsat se situe au-dessous de l'horizon.

Conclusions

Cloudsat est le premier d'une série de radars en ondes millimétriques susceptible d'avoir une incidence sur le télescope ALMA. En effet, un risque limité de détérioration des récepteurs ALMA pourrait exister si le faisceau du radar et une antenne du télescope ALMA étaient orientés directement l'un vers l'autre avec un couplage entre lobes principaux. Toutefois, ce cas de figure serait relativement rare si des précautions simples étaient prises, en particulier si l'on faisait en sorte que les antennes d'ALMA ne soient jamais pointées à $0,8^\circ$ de leur zénith sans que le récepteur ne soit protégé ou sans que le logiciel de commande ne détermine en premier lieu le passage probable d'une trajectoire au sol du satellite Cloudsat à proximité du télescope ALMA.

Les lobes secondaires lointains du faisceau radar subiront des brouillages dans la bande à 90 GHz à chaque fois que le télescope ALMA pointera à 10° du satellite; le logiciel ALMA devrait pouvoir signaler cette situation.

Pendant toute la durée de vie du satellite Cloudsat, l'observatoire ALMA devra disposer d'éléments orbitaux actualisés pour que les logiciels de programmation, de commande et d'acquisition de données du télescope puissent prévoir et utiliser les coordonnées précises du satellite.

A cet égard, il sera nécessaire de mettre en place rapidement et de façon continue une collaboration étroite entre l'agence du satellite et le service SRA, collaboration qui sera essentielle dans le cas où d'autres situations analogues se présentaient dans l'avenir.
