

RECOMMANDATION UIT-R SA.1071*

UTILISATION DE LA BANDE 13,75-14,0 GHz PAR LES SERVICES SCIENTIFIQUES SPATIAUX ET LE SERVICE FIXE PAR SATELLITE**

(Résolution N° 112 de la CAMR-92)

(1994)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que la Conférence administrative mondiale des radiocommunications chargée d'étudier les attributions de fréquences dans certaines parties du spectre (Malaga-Torremolinos, 1992) (CAMR-92) a attribué à titre primaire la bande de fréquences 13,75-14,0 GHz au service fixe par satellite (SFS);
- b) que cette bande est également attribuée à titre secondaire au service de recherche spatiale et que les services d'exploration de la Terre par satellite et de recherche spatiale peuvent eux aussi utiliser cette bande à titre secondaire pour des stations de radiolocalisation installées à bord d'engins spatiaux (voir le numéro 713 du Règlement des radiocommunications (RR));
- c) qu'aux termes du renvoi 855A du RR l'utilisation en partage de cette bande par les services fixe par satellite, de radiolocalisation et de radionavigation est soumise à certaines restrictions;
- d) qu'aux termes du renvoi 855B du RR les stations spatiales géostationnaires du service de recherche spatiale pour lesquelles l'ex-IFRB a reçu des renseignements aux fins de publication anticipée avant le 31 janvier 1992, doivent être exploitées sur la base de l'égalité des droits avec les stations du SFS;
- e) que les procédures de l'Article 11 du RR s'appliquent aux cas de brouillage entre satellites du SFS et satellites relais de données géostationnaires (SDR) pour lesquels l'ex-IFRB a reçu des informations aux fins de publication anticipée avant le 31 janvier 1992;
- f) qu'il est possible de prévoir sur l'orbite des satellites géostationnaires (OSG), des espacements orbitaux de 0,1° seulement entre les stations spatiales de réception du SFS et les stations spatiales SRD d'émission dans les conditions décrites au § 8 du *recommande* de la présente Recommandation;
- g) que, lorsqu'une station terrienne du SFS risque de brouiller une station terrienne SRD exploitée avec un SRD géostationnaire, les contours de coordination peuvent être déterminés conformément à la Recommandation UIT-R IS.848, et que l'on considère que la distance de séparation exigible est un problème très localisé qui peut être traité par les parties concernées;
- h) que le renvoi 855B du RR prévoit que jusqu'au 1^{er} janvier 2000 les stations du SFS ne doivent pas causer de brouillage préjudiciable aux stations spatiales non géostationnaires des services de recherche spatiale et d'exploration de la Terre par satellite mais qu'après cette date ces stations spatiales fonctionneront à titre secondaire par rapport au SFS;
- j) qu'il faudra poursuivre l'exploitation des SRD autour de 14 GHz, en particulier dans la bande de fréquences 13,772-13,778 GHz bien au-delà de l'an 2000 pour assurer des missions de recherche spatiale et d'exploration de la Terre par satellite qui ne peuvent être assurées par d'autres moyens;
- k) qu'il sera nécessaire de poursuivre l'exploitation d'un radar de mesure des précipitations en projet tout en le protégeant contre les brouillages pendant un an après la date du 1^{er} janvier 2000 spécifiée dans le numéro 855B du RR;
- l) que le SFS a besoin de critères pour mettre en œuvre des liaisons montantes dans la bande 13,75-14,0 GHz avant l'an 2000 sans causer de brouillage inacceptable aux stations spatiales des services scientifiques;

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

** Dans la présente Recommandation, l'expression «services scientifiques spatiaux» regroupe les services d'exploration de la Terre par satellite et de recherche spatiale.

- m) que les services scientifiques spatiaux ont besoin de critères pour mettre en œuvre des stations spatiales dans la bande 13,75-14,0 GHz de manière à ce qu'après l'an 2000, elles puissent fonctionner sans causer de brouillage préjudiciable aux stations du SFS ni avoir besoin d'en être protégées, et ceci compte tenu des dispositions des § j) et k);
- n) que la Résolution N° 112 de la CAMR-92 a invité le CCIR à procéder aux études nécessaires en ce qui concerne la compatibilité technique entre, d'une part, les attributions à titre primaire au SFS (Terre-espace) et, d'autre part, les attributions à titre secondaire au service de recherche spatiale et au service d'exploration de la Terre par satellite dans la bande 13,75-14,0 GHz;
- o) que les niveaux probables de puissance surfacique produits au niveau de l'OSG par les stations spatiales des services scientifiques spatiaux sont ceux indiqués dans le Tableau 4;
- p) qu'il serait souhaitable que les futurs réseaux à satellites relais de données exploités dans le cadre des services scientifiques spatiaux soient conçus pour fonctionner en dehors de la bande 13,75-14,0 GHz;
- q) que les brouillages subis par les services scientifiques spatiaux continuant à être exploités dans la bande précitée risquent d'être très importants,

reconnaisant

1. que la Commission d'études 4 des radiocommunications (Groupe d'action 4/4) a également étudié la question de compatibilité radiofréquence entre le SFS et les services scientifiques spatiaux dans la bande 13,75-14,0 GHz et que les résultats de ces études (voir la Recommandation UIT-R S.1069) ont été pris en considération pour l'élaboration de la présente Recommandation,

notant

1. que les systèmes des services scientifiques spatiaux doivent continuer d'être exploités au voisinage de 14 GHz (voir l'Annexe 1) avec des largeurs de bande pouvant atteindre 500 MHz et que beaucoup de ces systèmes ne peuvent pas facilement utiliser en partage des bandes de fréquences avec des systèmes du SFS (Terre-espace),

recommande

1. d'appliquer, pendant les périodes de temps indiquées dans les paragraphes suivants, les niveaux de brouillage admissibles spécifiés à l'Annexe 2 aux services scientifiques spatiaux existants lors de l'examen de situations de brouillage particulières;
2. de considérer, pendant les périodes de temps indiquées dans les paragraphes suivants, les informations figurant dans l'Annexe 3 comme des directives propres à éviter des brouillages inacceptables aux services scientifiques spatiaux;
3. que, pour protéger les altimètres spatiaux contre des brouillages inacceptables jusqu'au 1^{er} janvier 2000, on suive la procédure de consultation suivante:
- 3.1 après publication des renseignements visés à l'Appendice 4 du RR, relatifs à un réseau du SFS pour lequel on envisage d'utiliser la bande 13,75-14,0 GHz, l'administration exploitant un altimètre spatial dans cette bande doit informer l'administration notificatrice des contraintes géographiques susceptibles d'influer sur l'emplacement des stations terriennes du réseau du SFS;
- 3.2 l'exploitant du réseau du SFS doit examiner les renseignements susmentionnés et informer l'exploitant du système spatial des emplacements des stations terriennes proposés du réseau qui ne respecteraient pas les contraintes géographiques;
- 3.3 la consultation sera ensuite axée sur ces stations terriennes en vue d'assurer la protection requise de l'altimètre spatial;
4. que, pour protéger les diffusiomètres spatiaux à faisceaux en éventail contre des brouillages inacceptables, jusqu'au 1^{er} janvier 2000, la densité de p.i.r.e. des stations terriennes du SFS rayonnée en direction de l'orbite du diffusiomètre au-dessus des océans ne soit pas supérieure à 25 dBW dans une bande quelconque de 2 kHz située entre 13,99356 GHz et 13,99644 GHz. Pour respecter cette condition, il serait judicieux d'éviter d'utiliser cette bande. A titre exceptionnel, et cas par cas, on pourra éviter les brouillages inacceptables en recourant au processus de consultation;
5. que, pour protéger les radars spatiaux de mesure des précipitations contre des brouillages inacceptables;
- 5.1 jusqu'au 1^{er} janvier 2001;

5.1.1 la densité de p.i.r.e. d'une station terrienne du SFS située à une latitude comprise entre $\pm 55^\circ$ ne dépasse pas 61 dBW dans une bande quelconque de 600 kHz située entre 13,793 et 13,805 GHz;

5.1.2 l'angle d'élévation d'une station du SFS utilisant la bande 13,75-14,0 GHz ne soit pas supérieur à 71° ;

5.2 jusqu'au 1^{er} janvier 2000, dans le cas de la mise en œuvre de stations terriennes du SFS pour lesquelles on prévoit d'utiliser la bande 13,75-13,86 GHz à des latitudes comprises entre $\pm 40^\circ$, on procédera à une consultation cas par cas, pour s'assurer que le critère de protection donné est valable (voir la Note 1);

5.3 le processus de consultation (§ 5.2) soit prolongé jusqu'au 1^{er} janvier 2001 afin de s'assurer que, chaque fois que cela est possible, le critère de protection donné est valable (voir la Note 1);

Note 1 – Le processus de consultation du § 3 s'applique aussi au processus de consultation visé aux § 5.2 et 5.3 pour protéger les radars spatiaux de mesure des précipitations contre des brouillages inacceptables. Une administration qui envisage d'exploiter un réseau du SFS doit fournir des renseignements détaillés concernant les émissions dans la bande 13,793-13,805 GHz dans le cadre des données fournies au titre de l'Appendice 4 du RR.

6. que pour protéger les liaisons des satellites relais de données – satellites LEO des services scientifiques spatiaux – jusqu'au moment où tous les SRD sur l'OSG, pour lesquels l'ex-IFRB a reçu les renseignements concernant la publication anticipée avant le 31 janvier 1992, cesseront d'être exploités dans la bande 13,772-13,778 GHz, la densité de p.i.r.e. des émissions d'une station terrienne du SFS dans cette bande ne soit pas supérieure à 71 dBW/6 MHz;

7. que les administrations qui continuent d'exploiter des réseaux à SRD dans les services scientifiques spatiaux après le 1^{er} janvier 2000 soient instamment priées de mettre en œuvre dès que possible ces réseaux dans d'autres bandes que la bande 13,75-14,0 GHz;

8. que, après les délais indiqués dans les paragraphes précédents, les exploitants de stations spatiales des services de recherche spatiale ou d'exploration de la Terre par satellite qui continuent de fonctionner dans la bande 13,75-14,0 GHz tiennent compte des directives suivantes pour éviter de causer des brouillages inacceptables aux stations spatiales du SFS;

8.1 une émission d'une station spatiale non géostationnaire des services scientifiques spatiaux pourrait causer un brouillage inacceptable aux satellites du SFS si sa puissance surfacique rayonnée sur l'OSG dépassait -130 dBW/m² dans une portion quelconque de 40 MHz de la bande de fréquences 13,75-14,0 GHz;

8.2 la valeur ci-dessus pourrait probablement être augmentée de 7 dB pendant de courtes périodes ne dépassant pas au total 0,02% d'un mois quelconque;

8.3 une émission d'une station spatiale géostationnaire des services scientifiques spatiaux pourrait causer un brouillage inacceptable aux satellites du SFS si sa puissance surfacique rayonnée sur l'orbite géostationnaire dépassait -127 dBW/m² dans une portion quelconque de 40 MHz de la bande 13,75-14,0 GHz, avec un angle de $\pm 10^\circ$ sous-tendu sur l'OSG et dans le plan de l'OSG par rapport à une droite entre l'orbite géostationnaire et le centre de la Terre (voir la Note 1);

8.4 pour des angles d'incidence situés en dehors de la plage angulaire spécifiée au § 8.3 ci-dessus les niveaux de puissance surfacique brouilleuse de -97 dBW/m² au maximum, dans une portion quelconque de 20 MHz de la bande 13,75-14,0 GHz pourraient être probablement tolérés (voir la Note 1);

Note 1 – Les § 8.3 et 8.4 se réfèrent à des positions antipodales d'une station spatiale géostationnaire des services scientifiques spatiaux et d'un satellite du SFS.

9. que, après les délais indiqués dans les paragraphes précédents, les stations de radiolocalisation installées à bord d'engins spatiaux (voir le § b)) soient exploitées dans la mesure du possible, en dehors de la bande 13,75-14 GHz (voir la Résolution N° 712 (CAMR-92)) afin d'éviter les brouillages inacceptables causés ou subis par les réseaux du SFS et que les études nécessaires soient menées pour déterminer les modalités réglementaires répondant aux conditions spécifiées à l'Annexe 1.

ANNEXE 1

Utilisation actuelle et future de la bande 13,75-14,0 GHz par les services scientifiques spatiaux**1. Introduction**

Il s'agit dans la présente Annexe d'examiner les points suivants: la nécessité pour les services de recherche spatiale et d'exploration de la Terre par satellite d'avoir accès en permanence aux fréquences voisines de 14 GHz; la largeur de bande nécessaire; la possibilité d'un point de vue scientifique d'effectuer les mêmes mesures dans des bandes autres que celle des 13,4-14,0 GHz. Cet examen sera fait en tenant compte des besoins des quatre principaux utilisateurs de cette bande, à savoir les diffusiomètres, les altimètres, les satellites relais de données et les radars de mesure des précipitations.

2. Diffusiomètres**2.1 Utilisation de la bande 13,75-14,0 GHz**

Les diffusiomètres sont une classe de radars qui mesurent les vecteurs vent à proximité de la surface au-dessus des océans. Les données relatives aux vents sont essentielles dans la détermination des régimes météorologiques régionaux et du climat mondial. Aucun autre instrument ne peut fournir toutes les mesures météorologiques des vecteurs vent à l'échelle de la planète.

A l'heure actuelle, l'acquisition de données météorologiques sur les terres se fait dans de bonnes conditions alors que pour les océans, les seules connaissances dont on dispose au sujet des vents de surface proviennent de quelques rapports, parfois imprécis, de navires. Etant donné que les océans couvrent près des deux tiers du globe terrestre, les données fournies par les diffusiomètres joueront un rôle capital dans la compréhension et la prévision des régimes météorologiques, des courants marins et des systèmes climatiques dans le monde.

Deux diffusiomètres sont actuellement en cours de réalisation aux Etats-Unis d'Amérique. Le premier, le diffusiomètre NSCAT (diffusiomètre de la NASA) sera lancé en 1996 à bord du satellite japonais ADEOS (satellite perfectionné d'observation de la Terre). Le second, le diffusiomètre NEXSCAT, qui sera lancé aux environs de 1999, sera intégré au système d'observation de la Terre EOS. Le diffusiomètre NSCAT a été conçu pour fonctionner à une fréquence centrale de 13,995 GHz. Réalisé, il est actuellement testé et étalonné. Il n'est pas possible d'en modifier la fréquence. Le diffusiomètre NEXSCAT, encore à l'état de projet, est inspiré du diffusiomètre NSCAT et devrait utiliser bon nombre des mêmes composantes. Toutefois, il est possible d'amener la fréquence de fonctionnement dans la bande 13,4-13,75 GHz.

2.2 Largeur de bande nécessaire

Les diffusiomètres actuels utilisent une impulsion à onde continue et à fréquence fixe pour explorer la surface de la mer. Le spectre de fréquences émis est étroit car la fréquence de récurrence des impulsions est faible (62 Hz) et la largeur des impulsions est grande (5 ms). Si l'on intègre la stabilité de fréquence de l'émetteur et les déplacements Doppler de fréquence, la largeur de bande requise pour les diffusiomètres actuels est de 1 MHz.

Les diffusiomètres de demain utiliseront peut-être la modulation par étalement de spectre pour obtenir une définition plus précise de la cellule en surface où sont faites toutes les mesures relatives aux vents. Ces instruments pourraient avoir besoin d'une largeur de bande de 100 MHz.

2.3 Possibilités d'utilisation d'autres bandes

Les mesures par diffusiomètres et les connaissances qui en résultent concernant les vecteurs vent sont basées sur les effets de diffusion hyperfréquences sur les ondes capillaires à la surface de l'eau. Il est nécessaire de faire des mesures à des longueurs d'onde comparables à celles des ondes capillaires engendrées par l'interaction des vents à la surface de l'eau afin d'obtenir la sensibilité nécessaire pour mesurer la vitesse et la direction des vents pour des vents ayant une vitesse aussi faible que 3 m/s. Il est indispensable de mesurer des vents ayant cette vitesse pour déterminer les variations météorologiques et climatiques. La longueur d'onde doit être située dans la bande 13,4-14,0 GHz compte tenu des dimensions des ondes capillaires engendrées par des vents faibles. Il en résulte que le diffusiomètre est très sensible aux vents locaux, en particulier aux vents faibles. Dans le même temps, un diffusiomètre fonctionnant dans la bande 13,4-14,0 GHz présente une faible sensibilité aux phénomènes non liés au vent comme la houle et la tension superficielle.

D'autres bandes susceptibles de remplacer la bande 13,4-14,0 GHz ont été examinées. Les deux bandes les plus proches de la bande des 14 GHz et actuellement attribuées au service d'exploration de la Terre par satellite, sont les bandes 9,5-9,8 GHz et 17,2-17,3 GHz. Ni l'une ni l'autre ne sont aussi bien adaptées aux besoins des diffusiomètres que la bande 13,4-14,0 GHz. Cela tient au fait qu'on ne dispose pas d'un corpus de données important sur la diffusion radar par la surface des océans à des fréquences autres que 14 GHz (fréquence de fonctionnement du diffusiomètre Seasat) et 5,3 GHz (fréquence du diffusiomètre ERS-1). Le passage à une nouvelle bande supposerait que l'on redéfinisse l'algorithme qui lie l'écho radar à la vitesse et à la direction du vent. L'élaboration de l'algorithme pour la bande des 5,3 GHz a nécessité un certain nombre d'expériences sur aéronefs et sur pylônes avant le lancement de ERS-1 et plus de 6 mois de mise au point après celui-ci. L'élaboration d'un nouvel algorithme entraînerait une interruption du flux des données destinées aux scientifiques durant la période nécessaire à sa vérification. Pour la même raison, une modification de la fréquence engendrerait une certaine discontinuité dans le flux de données à long terme. Il ressort de l'expérience faite avec le diffusiomètre ERS-1 qu'il n'est pas possible de mesurer la direction des vents à des vitesses inférieures à 5 m/s (ce qui est demandé aux diffusiomètres NSCAT ou NEXSCAT) avec un diffusiomètre fonctionnant dans la bande des 5,3 GHz. Les vecteurs vent de faible vitesse sont importants pour l'étude de la variabilité des courants océaniques. Aux fréquences supérieures à 14 GHz, l'affaiblissement atmosphérique dû à la teneur en eau (couverture nuageuse et pluie) est plus variable. Il est vraisemblablement possible d'exploiter un diffusiomètre de mesure des vents à 17,2 GHz mais à cette fréquence ou à une fréquence supérieure, on observera une dégradation de la qualité de fonctionnement car le diffusiomètre sera plus sensible à la teneur en eau dans l'atmosphère et aux effets liés à la tension superficielle. Aux fréquences supérieures à 20 GHz, la variabilité de l'affaiblissement atmosphérique rendrait l'instrument inutilisable sans d'autres moyens de mesure de la variabilité atmosphérique.

Un autre facteur explique pourquoi il est important que les diffusiomètres puissent avoir accès en permanence à la bande 13,4-14,0 GHz. C'est à cette fréquence, en effet, qu'un volume important de données a été recueilli au cours des 15 dernières années. Le diffusiomètre Seasat tout comme le diffusiomètre de la NASA fonctionnaient à cette fréquence et il en ira de même pour le NSCAT. La poursuite de l'utilisation de cette bande par les futurs diffusiomètres EOS permettra d'effectuer des comparaisons plus intéressantes entre les données acquises dans le passé et celles de demain. On peut espérer que grâce à l'enrichissement de la base de données constituée à l'aide d'instruments fonctionnant avec des paramètres similaires, on pourra établir un modèle scientifique plus précis.

2.4 *Disponibilité à long terme pour l'exploitation des diffusiomètres au voisinage de 14 GHz*

Il est indispensable de pouvoir continuer à exploiter les diffusiomètres spatiaux dans la bande 13,4-14 GHz. Les mesures effectuées à l'aide de ces instruments seront utilisées dans les systèmes opérationnels pour obtenir des données sur la vitesse et la direction des vents. Ces données permettront de mesurer et de prévoir le temps, les courants océaniques et le climat, éléments essentiels dans la gestion de l'environnement. Comme cela a été dit plus haut, la sensibilité de mesure requise ne peut être obtenue que dans la bande 13,4-14,0 GHz. De plus, ce n'est que dans cette bande que l'on dispose d'une base de données, constituée sur une période de 15 ans, qui puisse corroborer l'interprétation des données futures des diffusiomètres.

Le diffusiomètre NSCAT a été conçu pour fonctionner à 13,995 GHz et il est impossible de changer sa fréquence. Il est essentiel de protéger l'exploitation du diffusiomètre NSCAT jusqu'à l'an 2000. Par ailleurs, le diffusiomètre NEXSCAT est encore au stade du développement et sa fréquence sera portée à 13,4 GHz pour s'affranchir des contraintes de partage des fréquences avec le service fixe par satellite. Les nouveaux diffusiomètres conçus pour fonctionner dans cette gamme de fréquences devront eux aussi être exploités en dessous de 13,75 GHz. On estime que les diffusiomètres de demain auront besoin d'une largeur de bande de 100 MHz afin d'améliorer les mesures grâce à l'emploi d'autres techniques de modulation.

3. Altimètres

3.1 *Utilisation de la bande 13,75-14,0 GHz*

Un altimètre radar spatial est un radar à impulsions à visée vers le bas embarqué à bord d'un engin spatial en orbite. Il s'agit essentiellement d'instruments de télédétection des océans même si les données qu'ils recueillent tout au long de leur trajectoire sur les zones émergées et les étendues de glace présentent un certain intérêt (voir les altimètres ERS). Les missions des altimètres radars en cours ou en projet sont axées sur les données océanographiques; les données de poursuite sur les zones émergées et les nappes de glace sont secondaires.

Les altimètres servent à mesurer la distance entre un satellite et la surface de l'océan. Cette mesure très précise de l'altitude, lorsqu'elle est conjuguée à une détermination très précise de l'orbite et à des corrections pour tenir compte d'autres phénomènes environnementaux, permet d'établir des cartes mondiales très précises de la topographie des océans. On peut à partir de ces données topographiques calculer l'emplacement, la vitesse et la direction des courants océaniques dans le monde entier. Cela permet de mieux connaître les courants marins dont la variabilité dans le temps est déterminante pour comprendre les changements climatiques sur terre. Les données des altimètres peuvent par ailleurs fournir des mesures de la hauteur des vagues suffisamment grosses (vagues des océans) et de la rétrodiffusion au nadir à partir de laquelle on peut déterminer la vitesse du vent (mais pas le vecteur vent). Les spécialistes des prévisions météorologiques envisagent d'intégrer ces données de mesure dans un système opérationnel dans le cadre du prochain projet prévu d'altimètre NASA/CNES.

Plusieurs altimètres radars spatiaux fonctionnent actuellement dans la bande 13,4-14 GHz qui leur a été attribuée. Plusieurs autres missions en projet – TOPEX Follow on, GEOSAT Follow on, EOS et ENVISAT-1 – exploiteront elles aussi des altimètres dans cette bande. Les altimètres radars sont aujourd'hui un outil opérationnel pour les sciences de la Terre, l'océanographie et les sciences de l'atmosphère et, à ce titre, ils continueront d'être lancés et utilisés encore longtemps. Les altimètres de type TOPEX-POSEIDON, centrés sur des fréquences de 13,6 et 13,65 GHz, émettent dans les bandes 13,44-13,76 GHz et 13,49-13,81 GHz respectivement. Les altimètres ERS-1, centrés sur 13,80 GHz, émettent entre 13,635-13,965 GHz.

Le choix de la bande 13,4-14 GHz, fait il y a longtemps, a été dicté par plusieurs considérations: attribution d'une bande aux radars embarqués, attribution d'une largeur de bande importante, objectifs scientifiques, disponibilité de matériels et compatibilité avec le service de radiolocalisation. Le premier altimètre spatial à utiliser cette bande a été l'altimètre Skylab S-193 au début des années 70; depuis beaucoup d'autres altimètres utilisent cette bande (GEOS-C, Skylab, GEOSAT, TOPEX-POSEIDON et ERS-1). Cela représente des investissements considérables qu'il s'agisse de la conception et de la mise au point des matériels, des opérations liées aux missions, de la réduction des données, de la conception des logiciels, des analyses scientifiques, de la modélisation et de la création d'une base de données.

Ces altimètres ont permis de constituer une base de données très riche. Il est ainsi possible d'interpréter correctement les données actuelles et futures des altimètres. Ces données sont très sensibles aux fréquences d'émission des matériels. Une modification de la fréquence de fonctionnement pourrait rendre inutilisable une quantité importante des données de la base. Par ailleurs, bon nombre de matériels ont été réalisés pour des utilisations au sol et en vol, par les Etats-Unis d'Amérique et par l'Europe et fourniront un appui aux missions futures. La plupart de ces matériels sont conçus pour fonctionner dans la bande 13,4-14 GHz. Compte tenu de ce qui précède, on aura encore besoin dans l'avenir d'altimètres fonctionnant à cette fréquence. Il convient de noter que la mission TOPEX Follow on, prévue pour 1998, est la seule prévue qui utilisera plusieurs satellites et cela pour au moins 20 ans.

3.2 *Largeur de bande nécessaire*

Les largeurs de bandes utilisées par les altimètres existants ou qui seront utilisées par les altimètres de demain vont de 320 MHz (TOPEX-POSEIDON) à 330 MHz (ERS). Comme dans tout radar, la précision de la mesure de l'altitude de l'altimètre (distance) dépend de la largeur de bande utilisée. L'altimètre TOPEX utilise la compression des impulsions (Chirp Full Deramp Stretch) pour obtenir une grande précision. Les 320 MHz de largeur de bande de l'altimètre TOPEX permettent d'obtenir une largeur effective des impulsions comprimées de 3,125 ns (résolution de base de 46,5 cm) avant le traitement ultérieur et la pondération. En fin de compte, la précision dans le canal de la bande Ku est de moins de 3 cm.

Aux Etats-Unis d'Amérique, plusieurs études ont été faites pour savoir s'il était nécessaire de porter à 600 MHz la largeur de bande attribuée aux altimètres. Ces études ont analysé d'autres phénomènes qui influent sur la précision de la mesure de l'altitude, notamment le biais électromagnétique, le biais de l'état de la mer, l'effet ionosphérique, l'effet troposphérique et la détermination de l'orbite. La conclusion est que ces phénomènes sont actuellement assez importants et prédominant dans l'ensemble des erreurs liées à la mesure de l'altitude. Une incertitude de mesure de l'altitude plus faible que celle obtenue avec l'altimètre TOPEX (2 à 3 cm) ne modifierait pas de façon significative l'erreur totale. Par conséquent, la largeur de bande actuelle de 320-330 MHz utilisée par les altimètres suffira pour des missions au stade de la planification ou de la conception.

Dans l'avenir, si la modélisation ou de nouveaux instruments permettent de réduire de façon significative les erreurs systématiques, il sera peut-être intéressant de porter la largeur de bande à 600 MHz. De plus, les composants d'altimètres utilisant des largeurs de bande aussi importantes seront davantage commercialisés et plus abordables.

D'éventuelles modifications de la conception de base des altimètres pourraient imposer des largeurs de bande plus importantes: les altimètres multifaisceaux, les altimètres à balayage et les altimètres à synthèse d'ouverture relèvent de cette catégorie. Un altimètre qui décorrélerait les mesures faites le long de sa trajectoire en utilisant l'agilité en fréquence ou les sauts de fréquence aurait besoin, lui aussi, d'une plus grande largeur de bande. Plusieurs modèles de ce type ont été examinés sur le papier mais ne sont pas intégrés actuellement dans des projets de vol.

Il faudra aussi des largeurs de bande supérieures à 320-330 MHz pour pouvoir «emporter» un altimètre et un diffusiomètre dans un même engin spatial.

On disposerait d'une largeur de bande de 500 MHz exempte de brouillage si la limite inférieure de la bande actuellement attribuée aux capteurs actifs pouvait être déplacée vers le bas et ramenée de 13,4-13,25 GHz. On peut en conclure que cette bande pourrait satisfaire les besoins actuels et futurs des altimètres spatiaux.

3.3 Possibilités d'utilisation d'autres bandes

Il n'y a aucun intérêt à exploiter les altimètres dans d'autres bandes. Le volume de données fournies par les altimètres fonctionnant dans la bande 13,4-14 GHz est très important. Cette base de données a permis d'établir de nombreux éléments nécessaires à l'altimétrie: biais électromagnétique de la surface de la mer à 13,6 GHz, modèle exact de l'interaction des caractéristiques de surface et de l'impulsion radiofréquence, incidence de l'atmosphère sur l'affaiblissement RF et le temps de propagation et incidence de l'altitude de l'engin spatial sur l'onde de retour, pour n'en citer que quelques uns. Recalculer toutes ces données pour une autre fréquence représenterait un travail considérable, à supposer que cela puisse être fait sans données de vol réelles. A l'heure actuelle, l'altimètre TOPEX dispose d'une fréquence secondaire (5,3 GHz) pour déterminer les effets ionosphériques. On commence tout juste à comprendre aujourd'hui certaines subtilités du fonctionnement dans cette nouvelle bande.

Le choix d'une nouvelle fréquence serait dicté par les considérations suivantes:

- quelle que soit la fréquence de fonctionnement de l'altimètre, il aura besoin d'une largeur de bande de 320 MHz pour satisfaire les exigences actuelles en matière de précision. L'utilisation d'une largeur de bande moins importante entraînerait une dégradation de la qualité de fonctionnement inacceptable pour la communauté scientifique;
- un altimètre est censé être un instrument tout temps. Cela est nécessaire pour recueillir des données sur la surface des océans pendant 90 à 95% du temps. A des fréquences supérieures à 20 GHz, les nuages et la pluie nuiraient aux mesures de l'altimètre. A 13,6 GHz, il est possible de pallier ces inconvénients sauf en cas de précipitations très fortes. A 35 GHz, le fonctionnement de l'altimètre serait perturbé. Il ne serait pas possible de remédier efficacement aux modifications engendrées par l'affaiblissement et le temps de propagation et les objectifs de la mission seraient compromis;
- aux fréquences plus faibles (en dessous de 5,0 GHz) les matériels seraient beaucoup plus gros et plus lourds. Il faudrait des antennes plus grandes pour obtenir les rapports signal/bruit requis pour la poursuite de précision. Etant donné que la tendance est à l'utilisation de matériels plus petits, moins chers et plus légers pour les missions futures, cela serait impossible. D'autres problèmes se posent dans toutes les bandes de fréquences moins élevées, par exemple l'insuffisance de la largeur de bande attribuée.

3.4 Disponibilité de la bande 13,75-14 GHz

La seule bande attribuée adaptée aux exigences des missions altimétriques est la bande 13,4-14 GHz pour laquelle il existe des bases de données importantes et des simulateurs, des modèles et des matériels qualifiés «espace» ont été mis au point. L'altimètre TOPEX-POSEIDON continuera de fonctionner dans la bande 13,75-14 GHz jusqu'en 1997.

D'autres modèles pourraient être exploités dans l'avenir si la limite inférieure de la bande attribuée pouvait être ramenée de 13,4-13,25 GHz. Cela dépendra des résultats des études qui ont été faites pour définir les conditions de partage entre les altimètres embarqués à bord de satellites et les systèmes de navigation aéronautique auxquels la bande est actuellement attribuée.

4. Réseaux à satellites relais de données

4.1 *Utilisation de la bande 13,75-14 GHz*

En 1983, les Etats-Unis d'Amérique ont lancé le premier satellite du réseau à satellites relais de données de leur système TDRSS. Le système TDRSS assure la retransmission des commandes, des données scientifiques et des informations sur la santé et la sécurité des engins spatiaux pour un certain nombre de satellites en orbite basse (LEO) de la NASA, comme la navette spatiale, Landsat et d'autres missions spatiales ne relevant pas de la NASA. On s'est par ailleurs mis d'accord sur l'utilisation du système TDRSS pour des missions en orbite basse internationales ou conjointes.

Il est prévu que ce système assurera les missions spatiales au moins jusqu'en 2000 en utilisant les satellites opérationnels TDRS situés à 41°, 46°, 171° et 174° de longitude ouest sur l'orbite géostationnaire. Des satellites TDRS de réserve en orbite sont placés à 62° et 79° de longitude ouest sur l'orbite géostationnaire. Un satellite TDRS sera également placé à 85°E. Il est prévu de développer ce réseau à satellites relais de données par adjonction et/ou remplacement des satellites TDRS actuels par des satellites «de remplacement TDRS» équivalents au plan fonctionnel et par d'autres satellites TDRS 8, 9, 10 également équivalents au plan fonctionnel, ce dès 1988. Ces satellites pourront par la suite être remplacés par des satellites TDRS de la prochaine génération après l'an 2000.

La fréquence centrale de la liaison aller satellite TDRS-satellite LEO qui assure la transmission des données cruciales de commande, de surveillance et de télémétrie est de 13,775 GHz située dans la partie inférieure de la bande 13,75-14 GHz. La bande 13,75-14 GHz est une tranche des attributions au service de recherche spatiale entre 13,4 GHz et 15,35 GHz qui sont largement utilisées d'une part pour les liaisons aller et retour des satellites en orbite basse et d'autre part pour les liaisons de connexion des satellites TDRS avec leurs stations terriennes. L'utilisation intensive de ces bandes apparaît clairement dans le plan de fréquences du réseau à satellites relais de données TDRSS (voir la Fig. 1), en particulier entre 13,4-14,05 GHz et entre 14,6-15,225 GHz. Cela résulte des investissements importants qui ont été faits dans plusieurs domaines: études approfondies des avantages et inconvénients des systèmes, mise au point et homologation des matériels spatiaux, mise au point et mise en œuvre des systèmes à satellites et des stations terriennes, y compris le réseau à satellites relais de données TDRSS.

4.2 *Largeur de bande nécessaire*

La largeur de bande nécessaire est indiquée à la Fig. 1. Il ressort de cette Figure que deux liaisons sont mises en œuvre dans la bande 13,75-14 GHz. La première est la liaison aller satellite TDRS-satellites en orbite basse utilisée pour la commande/surveillance et la télémétrie ainsi que pour la transmission de données et de signaux vidéo. La fréquence centrale est de 13,775 GHz.

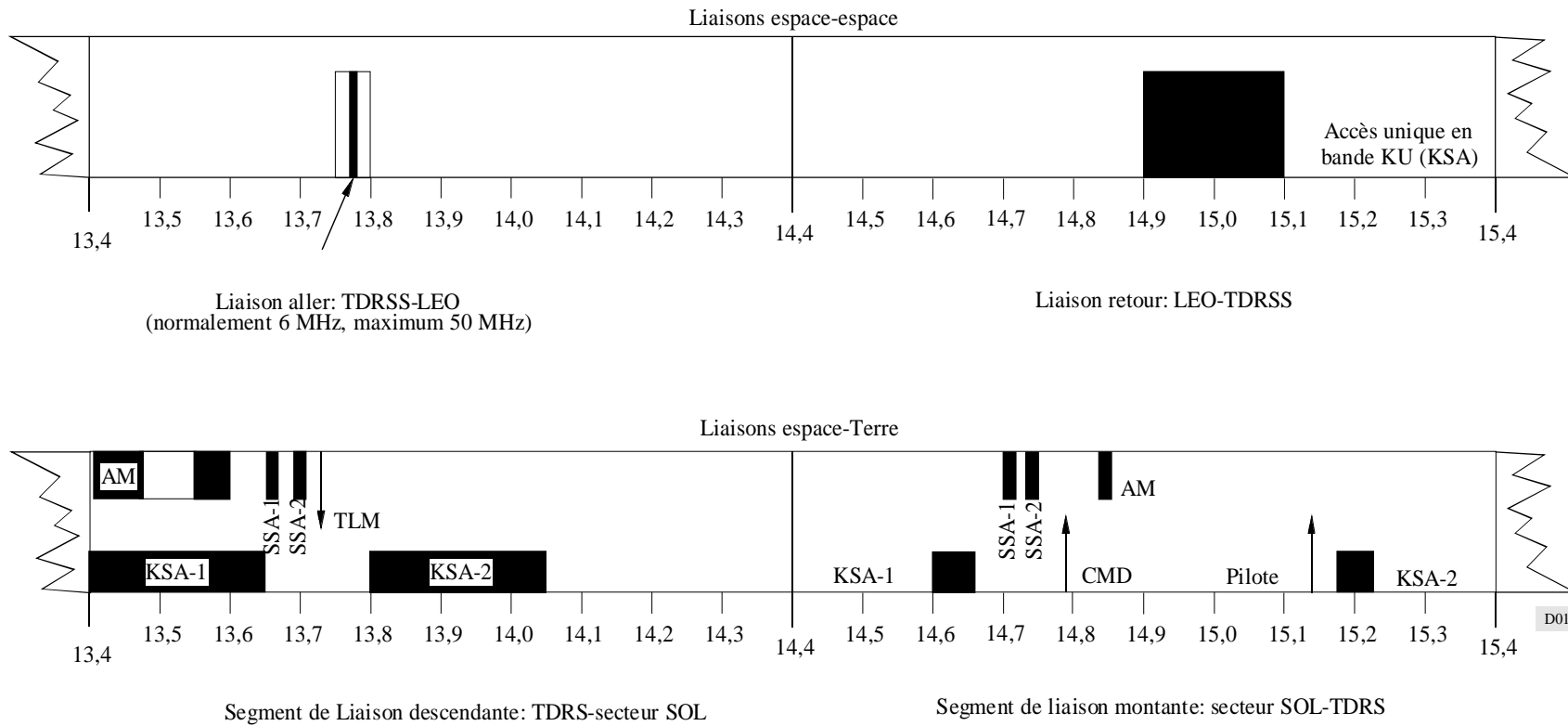
La largeur de bande est en principe de 6 MHz pour des données de commande et de surveillance; presque toujours les données d'information à faible débit sont étalées par un code de bruit pseudo-aléatoire à 3 mégaséquences par seconde. On a besoin d'une largeur de bande de 50 MHz pour transmettre des données à un débit plus élevé vers un engin spatial ou des informations vidéo à une station spatiale. La transmission des données de commande dans une bande de 6 MHz centrée sur 13,775 GHz doit impérativement être fiable. Cette largeur de bande ne devrait pas diminuer dans un avenir prévisible.

La seconde liaison est une liaison descendante qui sert à transmettre les signaux large bande, que le satellite TDRS reçoit en provenance des satellites en orbite basse, vers la station terrienne du réseau TDRSS. Les signaux acheminent essentiellement des données scientifiques et des données de télémétrie de l'engin spatial. La largeur de bande nécessaire pour cette liaison peut atteindre 225 MHz centrée au voisinage de 13,9 GHz. Cette largeur de bande elle aussi ne devrait pas diminuer, compte tenu notamment de l'arrivée dans les prochaines années de nouveaux satellites d'observation de la Terre à haute résolution.

4.3 *Possibilités d'utilisation d'autres bandes*

Le réseau TDRSS utilise actuellement des fréquences voisines des 2 GHz et des 13/15 GHz pour son exploitation et pour la réception des données en provenance des satellites en orbite basse. La bande des 13/15 GHz est par ailleurs utilisée pour les liaisons de connexion du réseau TDRSS géostationnaire. Les satellites TDRS de remplacement et les satellites TDRS 8, 9 et 10 utiliseront le même plan de fréquences que les satellites TDRS actuels. A l'époque de la CAMR-92, on estimait que les satellites relais de données de la prochaine génération exploités par les Etats-Unis d'Amérique auraient en plus des liaisons dans les bandes 23/26 GHz qui seraient utilisées avec les satellites LEO dans les deux sens. Les bandes supérieures permettraient d'assurer une transmission de données des débits qu'il est plus difficile d'obtenir dans les bandes 13/15 GHz. Aucune décision définitive n'a été prise pour les satellites de la génération future. Il est clair que les réseaux TDRS auront besoin d'utiliser la bande 13,75-14 GHz pendant encore longtemps, en toute fiabilité.

FIGURE 1
Tranche 13,4-15,3 GHz du plan de fréquences pour le réseau à satellite relais de données TDRSS des États-Unis d'Amérique



- AM: accès multiple
- KSA: accès unique en bande Ku
- SSA: accès unique en bande S
- CMD: liaison de contrôle
- TLM: liaison de télémétrie

4.4 *Disponibilité de la bande 13,75-14 GHz*

Les composants du réseau à satellites relais de données américain TDRS doivent pouvoir avoir accès à la bande 13,75-14 GHz au-delà de l'an 2000. La partie inférieure de cette bande sera notamment utilisée par la liaison aller de relais des commandes vers des engins spatiaux comme la navette spatiale et pour le système d'observation de la Terre de la mission «Planet Earth». Les satellites qui sont actuellement exploités ou qu'il est prévu d'exploiter dans cette bande ont ou auront vraisemblablement une durée de vie utile de plus de 20 ans. L'expérience a montré que des satellites lancés il y a près de trente ans continuent d'envoyer des données utiles. On aura la possibilité de continuer à exploiter des satellites au-delà de leur durée de vie nominale mais la nécessité de pouvoir avoir accès en permanence à la bande 13,75-14,0 GHz est avant tout d'ordre économique. Les investissements qui ont été consentis pour concevoir, mettre en œuvre et exploiter tous les éléments spatiaux et de Terre du réseau à satellites relais de données TDRSS, y compris les éléments qui utilisent les bandes des 13/15 GHz, dépassent plusieurs dizaines de milliards de dollars et il sera difficile d'engager des sommes du même ordre dans les prochaines décennies.

5. **Radars de mesure des précipitations**

5.1 *Utilisation de la bande 13,75-14 GHz*

Plusieurs fréquences ont été attribuées aux radars spatiaux (10 GHz, 14 GHz, 17 GHz et 35 GHz, par exemple) mais la bande des 14 GHz est la mieux adaptée aux radars de mesure des précipitations, en particulier les radars monobande comme le radar de mesure des précipitations de la mission TRMM. Le choix de la fréquence est dicté par les considérations suivantes:

- a) gamme dynamique et sensibilité pour la mesure des précipitations,
- b) champ d'observation instantanée (IFOV)/dimensions de l'antenne, et
- c) rapport signal/fouillis au sol.

On peut en conclure qu'en utilisant des fréquences supérieures à 14 GHz, on ne peut satisfaire aux exigences du a) et que, à des fréquences inférieures à 14 GHz, il est difficile de satisfaire aux exigences du b) et du c).

Le radar de mesure des précipitations TRMM, le seul radar spatial de ce type qui verra le jour avant l'an 2000, est en cours de développement à la NASDA au Japon. Il est impossible d'en modifier la fréquence. Une mission TRMM follow-on a par ailleurs été envisagée pour des études hydrologiques à l'échelle mondiale (GEWEX, par exemple). Elle devrait débiter aux environs de l'an 2000. Pour cette mission, la bande des 14 GHz est vitale et le meilleur choix du point de vue du coût du calendrier et de la continuité des données seront d'utiliser la même fréquence que celle du radar TRMM.

5.2 *Largeur de bande nécessaire*

Etant donné que les impératifs de résolution de distance ne sont pas aussi stricts pour un radar de mesure des précipitations que pour d'autres radars spatiaux – radars à synthèse d'ouverture et altimètres – la largeur de bande du récepteur du radar de mesure des précipitations devrait être assez étroite (au plus de l'ordre de quelques mégahertz). Toutefois, il faut prendre en considération les éléments suivants:

- *Agilité en fréquence:* pour réaliser des estimations très précises de la puissance de l'écho par la pluie dans un bref laps de temps, on aura recours à la technique d'agilité en fréquence qui utilise plusieurs fréquences porteuses espacées les unes des autres de plusieurs mégahertz et qui émet des impulsions séquentiellement ou en alternance. Ce système aura besoin d'une largeur de bande beaucoup plus grande, même si la largeur de bande de chaque fréquence est la même que celle d'un radar non agile en fréquence. Par exemple, le radar TRMM adopte deux fréquences espacées de 6 MHz et chaque canal de fréquence a une largeur de bande de 0,6 MHz à ± 3 dB. Pour obtenir un affaiblissement suffisant de 60 dB, une largeur de bande totale de 12 MHz est nécessaire qui est utilisée pour l'étude des brouillages station terrienne du SFS – radar de mesure des précipitations. En général, le nombre de canaux de fréquences sera limité à 3 ou 4. La largeur de bande totale requise peut donc être comprise entre 20 et 40 MHz selon le nombre de canaux et l'espacement en fréquence.
- *Radar à compression d'impulsions:* pour les missions futures, on utilisera la technique de la compression des impulsions pour obtenir une meilleure résolution, une grande sensibilité et/ou une grande précision pour les estimations de la puissance de l'écho par la pluie. La largeur de bande d'un radar de ce type devrait être plusieurs fois celle d'un radar sans compression d'impulsions mais bien inférieure à celles des altimètres spatiaux.

- Bien que la largeur de bande totale d'un récepteur radar soit déterminée par un filtre passe-bande étroit, il faut évaluer la réaction de ce radar aux signaux brouilleurs hors-bande, car la largeur de bande des étages d'entrée du récepteur jusqu'à la section Fi dans laquelle le filtrage passe-bande étroit est réalisé est en général bien plus grande. Il en résulte une saturation des étages d'entrée du récepteur. Le signal de brouillage hors-bande peut aussi être présent dans le signal vidéo radar en raison de l'affaiblissement fini des filtres passe-bande.

En résumé, la largeur de bande nécessaire pour les futurs radars spatiaux de mesure des précipitations serait d'au plus 30-40 MHz. Il faudra également tenir compte de la largeur de bande RF du récepteur qui est en général bien plus grande que celle du dernier filtre passe-bande.

5.3 Possibilités d'utilisation d'autres bandes

Il s'agit dans le présent paragraphe de rechercher la fréquence adaptée à la mission TRMM et aux futures missions spatiales de mesure des précipitations (compte tenu de la discussion générale ci-dessus). Nous nous attacherons ici au cas d'un radar monobande puis nous examinerons brièvement le cas d'un radar bibandes. Le radar monobande, utilisé pour le TRMM, est en effet considéré comme un instrument fondamental de la mission TRMM follow-on.

5.3.1 Plage de mesure dynamique

Les fréquences supérieures à 17 GHz ne permettent pas de réaliser des mesures des précipitations avec une gamme dynamique comprise entre 1 et 50 mm/h établie à partir d'une étude statistique des précipitations tropicales océaniques. La bande des 17 GHz peut être une bonne solution si la mission est axée sur la mesure des précipitations à des latitudes élevées, dans des zones de faibles précipitations mais cette fréquence est trop élevée pour obtenir une plage de mesure dynamique suffisante pour les pluies tropicales. La mission TRMM et les missions futures de type TRMM devraient donc utiliser des fréquences inférieures à 17 GHz.

5.3.2 IFOV

Pour obtenir un champ d'observation instantanée (IFOV) de l'ordre de 5 km depuis un satellite en orbite basse (altitude de 500 km), il faudrait une ouverture de faisceau d'environ 0,01 rad (environ 0,6°), c'est-à-dire que la taille de l'antenne devrait être d'au moins 100λ ou plus. Dans le cas du radar TRMM, l'antenne est d'environ $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}^2$ (environ -92λ). Ces dimensions ont été fixées en tenant compte des impératifs scientifiques liés à l'IFOV, des limites de précision dans la fabrication des antennes et des dimensions de la coiffe des lanceurs.

L'utilisation d'une fréquence moins élevée impose une plus grande antenne et de ce fait les interfaces avec l'engin spatial et la fusée sont plus complexes. Il ressort d'une étude de faisabilité sur le radar TRMM que l'utilisation de fréquences dans la bande des 10 GHz ou de fréquences moins élevées pose des problèmes techniques. La situation peut varier dans une certaine mesure selon les capacités de l'engin spatial et de la fusée mais l'utilisation de fréquences inférieures à 10 GHz, qui suppose une antenne de 5 m ou plus, est exclue dans le cas d'un radar de mesure des précipitations embarqué à bord d'un engin spatial.

5.3.3 Rapport signal/fouillis

Le rapport signal/fouillis (S/C) requis dépend de l'intensité minimale des précipitations à mesurer. Deux types de fouillis de sol doivent être pris en compte: le fouillis imputable aux lobes latéraux de l'antenne et le fouillis causé par des lobes latéraux parasites apparaissant dans l'impulsion de sortie du filtre du récepteur. Ce dernier type de fouillis peut être particulièrement grave dans le cas de radars à compression d'impulsions. Le fouillis de sol maximal peut atteindre une valeur d'environ 60 dB plus élevée que celle de l'écho par la pluie correspondant à des précipitations de 1 mm/h, ce qui impose des niveaux de lobes latéraux de l'antenne très bas. La pondération de l'ouverture d'antenne du radar TRMM est fondée sur la pondération de Taylor avec $SL = -35 \text{ dB}$ pour obtenir de faibles niveaux de lobes latéraux. Une analyse de la qualité de fonctionnement a prouvé que le radar pouvait présenter le rapport S/C minimal d'environ 4 dB pour une intensité de pluie de 0,7 mm/h. Si la fréquence est ramenée à 10 GHz, l'intensité de l'écho par la pluie par rapport au fouillis de sol chutera d'environ 6 dB, ce qui ne permettra pas de détecter les faibles taux de précipitations.

En résumé, l'utilisation de fréquences inférieures à 10 GHz pour des radars spatiaux pose des problèmes du point de vue du rapport S/C .

5.3.4 *Fréquences adaptées aux radars bibandes*

Dans le cas des radars bibandes qui seront peut-être mis en œuvre après l'an 2000 pour obtenir une plage dynamique de mesure plus large et des données plus précises sur les précipitations, le choix des fréquences est plus complexe. Lorsque le principal objectif est la mesure des précipitations, plusieurs combinaisons seraient souhaitables: 10 et 24 GHz, 14 et 35 GHz et 14 et 24 GHz. S'il s'agit d'effectuer des mesures sur les nuages et la pluie, la sélection des fréquences s'opérera de manière indépendante, une fréquence pour le radar de mesure des nuages et une fréquence pour le radar de mesure des précipitations.

Quoi qu'il en soit, les fréquences voisines des 14 GHz sont elles aussi vitales pour les radars bibandes (ou multibandes) de demain étant donné qu'un radar fonctionnant à 14 GHz peut assurer une couverture complète (pluies tropicales et pluies à des latitudes élevées) du point de vue de la plage de mesure dynamique et qu'il n'y a pas d'obstacle technique du point de vue de l'IFOV et du rapport S/C.

5.4 *Maintien des besoins de fréquence au voisinage de 14 GHz*

La bande des 14 GHz est essentielle pour les radars monobande (radar TRMM et peut-être radar TRMM follow-on) de mesure des précipitations dans le monde entier pour plusieurs raisons:

- du point de vue de la plage de mesure dynamique, une fréquence de 17 GHz est trop élevée;
- le passage de 14 à 10 GHz imposerait des modifications de conception importantes du radar pour obtenir la même résolution et la même sensibilité. Les progrès de la technologie des antennes permettront peut-être d'utiliser des fréquences inférieures pour les missions au-delà de l'an 2000 mais toute augmentation des dimensions et du poids de l'antenne pourrait exiger de revoir la conception de l'engin spatial et d'utiliser un autre lanceur.

L'importance des fréquences proches des 14 GHz vaut aussi pour les futurs radars bifréquence. Cette bande a été utilisée pour plusieurs diffusiomètres et altimètres spatiaux. L'expérience acquise, les bases de données concernant les matériels radar et les données sur la diffusion sont très précieuses pour la mise au point de radars de mesure des précipitations fonctionnant dans cette bande. Etant donné que le radar TRMM utilise une fréquence de 13,8 GHz, de nombreux algorithmes ont été élaborés pour cette fréquence et ne sont valables qu'au voisinage de 14 GHz. Le JPL de la NASA a mis au point un radar aéroporté et CRL au Japon est en train de mettre au point un autre radar aéroporté en vue de tester et de valider les algorithmes du radar TRMM.

Au vu de l'expérience acquise, des bases de données et des initiatives actuelles, il est essentiel que les fréquences voisines des 14 GHz restent disponibles pour les radars spatiaux actuels ou futurs de mesure des précipitations.

6. **Résumé et conclusions**

Plusieurs sujets ont été examinés dans la présente Annexe: l'utilisation de la bande 13,75-14 GHz, la largeur de bande nécessaire, les possibilités d'utilisation de bandes autres que celle des 13,75-14 GHz pour répondre aux besoins des missions, la nécessité pour les diffusiomètres, les altimètres, les radars de mesure des précipitations actuels et futurs et les réseaux à satellites relais de données de pouvoir avoir accès à long terme au spectre de la bande 13,75-14 GHz. Compte tenu de ces études préliminaires, on peut formuler les conclusions suivantes:

- *Diffusiomètres:*
 - les diffusiomètres de la génération actuelle (NSCAT), qui seront embarqués à bord d'ADEOS en 1996, fonctionnent à une fréquence centrale de 13,995 GHz; un autre diffusiomètre (NEXSCAT) sera modifié pour fonctionner à 13,402 GHz; son lancement est prévu aux environs de 1999;
 - les diffusiomètres de la génération actuelle ont besoin d'une largeur de bande de 2,88 MHz;
 - les diffusiomètres des générations futures auront peut-être besoin de largeurs de bande pouvant atteindre 100 MHz au voisinage de la bande des 14 GHz;
 - l'utilisation des bandes au-dessus et en dessous de la bande 13,4-14 GHz attribuées aux radars embarqués à bord de satellites n'est pas une solution acceptable compte tenu des investissements qui ont été faits pour créer des bases de données, mettre au point des algorithmes de réduction de données et construire des équipements au sol et qualités «espace» et compte tenu de l'optimalité de la bande de fréquences pour les phénomènes physiques observés;
 - il faudra jusqu'à l'an 2000 utiliser et protéger la largeur de bande de 2,88 MHz centrée sur 13,995 GHz, attribuée aux diffusiomètres. Après cette date, on disposera de diffusiomètres fonctionnant en dessous de 13,75 GHz.

- *Altimètres:*
 - les altimètres de la génération actuelle utilisent une largeur de bande d'environ 320 MHz centrée sur 13,60, 13,65 et 13,80 GHz;
 - on aura peut-être besoin d'une largeur de bande de 600 MHz pour emporter un altimètre et un diffusiomètre dans un même engin spatial;
 - l'utilisation des bandes au-dessus et en dessous de la bande 13,4-14 GHz attribuées aux radars embarqués à bord de satellites n'est pas une solution acceptable compte tenu des investissements faits pour créer des bases de données, mettre au point des algorithmes de réduction de données et construire des équipements au sol et qualifiés «espace» et compte tenu de l'optimalité de la bande de fréquences pour les phénomènes physiques observés;
 - l'accès à la bande 13,75-14 GHz est nécessaire jusqu'en 1997 pour TOPEX-POSEIDON et jusqu'en 2000 pour l'ERS. Les altimètres français et américain qui seront utilisés pour la mission TOPEX follow-on ainsi que les altimètres de la mission ERS follow-on sur ENVISAT peuvent être abaissés en fréquence, de sorte qu'ils n'aient pas besoin d'avoir accès à la bande 13,75-14 GHz;
 - si la largeur de bande maximale requise est de 330 MHz, les altimètres de demain fonctionneront dans la bande 13,40-13,75 GHz. Si de nouveaux modèles sont mis au point qui nécessitent des largeurs de bande plus importantes, ils pourront être exploités dans une bande en dessous de 13,75 GHz si la limite inférieure de la bande attribuée peut être ramenée de 13,4 à 13,25 GHz. Il est proposé de procéder à de nouvelles études afin de définir les conditions de partage entre les altimètres embarqués à bord de satellites et les systèmes de radionavigation aéronautique auxquels la bande est actuellement attribuée.
- *Radars de mesure des précipitations:*
 - les radars de mesure des précipitations de la génération actuelle, qui seront embarqués à bord du radar TRMM en 1997, fonctionneront pendant plus de trois ans et demi à 13,796 GHz et 13,802 GHz (agilité en fréquence bicanal) avec une largeur de bande de 0,8 MHz pour le récepteur et nécessitent une largeur de bande de 12 MHz (13,793-13,805 GHz) exempte de brouillages;
 - on aura peut-être besoin d'une largeur de bande de plusieurs dizaines de MHz pour satisfaire les besoins des radars de mesure des précipitations de la prochaine génération;
 - l'utilisation des bandes au-dessus et en dessous de la bande 13,4-14 GHz qui sont attribuées aux radars embarqués à bord de satellites n'est pas une solution acceptable compte tenu des contraintes liées à la plage dynamique de mesure, à l'IFOV et à la conception de l'engin spatial;
 - compte tenu de l'expérience acquise, des bases de données et des travaux en cours, il est essentiel de maintenir la disponibilité des fréquences au voisinage de 14 GHz pour les radars spatiaux de mesure des précipitations actuels et futurs;
 - l'utilisation d'une largeur de bande de 12 MHz centrée sur 13,799 GHz environ pour le récepteur se prolongera au-delà de l'an 2000;
 - des radars de mesure des précipitations embarqués à bord du satellite follow-on TRMM pourraient fonctionner à une fréquence centrale inférieure à 13,75 GHz. Toutefois, il faudra peut-être examiner la question de la compatibilité entre les services de radiolocalisation et de recherche spatiale dans la bande 13,4-13,75 GHz.
- *Réseaux à satellites relais de données:*
 - un plan de fréquences détaillé délimite les tranches de spectre comprises entre 13,4 GHz et 15,225 GHz qui sont utilisées pour les liaisons de service vers les satellites en orbite basse et les liaisons de connexion vers les stations terriennes;
 - ce plan résulte des investissements de plusieurs dizaines de milliards de dollars EU qui ont été consacrés aux études approfondies des avantages et des inconvénients des systèmes, à la mise au point et à l'homologation de matériels spatiaux, à la mise au point et à la mise en œuvre de systèmes à satellites et de stations terriennes, y compris le réseau à satellites relais de données TDRSS;
 - une liaison aller importante vers les satellites en orbite basse est exploitée à une fréquence centrale de 13,775 GHz avec une largeur de bande comprise entre 6 et 50 MHz selon l'application;
 - les satellites relais de données de la prochaine génération devraient mettre en œuvre des liaisons dans les bandes des 23/26 GHz à utiliser avec les satellites en orbite basse;
 - certains éléments du réseau à satellite relais de données américain TDRSS ont besoin d'avoir accès à la bande 13,75-14 GHz jusqu'au delà de l'an 2012.

ANNEXE 2

**Niveaux admissibles de brouillage causé aux systèmes des
services scientifiques spatiaux qui utilisent
la bande 13,75-14 GHz**

1. Introduction

La présente Annexe décrit les critères applicables à la protection des systèmes scientifiques spatiaux fonctionnant dans la bande 13,75-14 GHz contre les brouillages causés par les liaisons Terre-espace du service fixe par satellite. Ces critères correspondent au niveau admissible de puissance brouilleuse, mesuré dans une largeur de bande de référence à la sortie de l'antenne de réception, à ne pas dépasser pendant un pourcentage de temps et pour un nombre d'emplacements donnés. Les largeurs de bande de référence spécifiées sont les plus grandes possible afin de tirer le meilleur parti, au niveau du partage, de l'étalement de la puissance du signal brouilleur sur la largeur de bande. Ces critères sont basés sur les systèmes scientifiques spatiaux actuellement exploités ou en projet et sur les impératifs d'exploitation qui leur sont associés, mais on espère pouvoir, dans l'avenir, concevoir des systèmes scientifiques spatiaux qui tolèrent au moins les mêmes niveaux de brouillage et respectent les conditions spatiales et temporelles correspondantes.

2. Altimètres

On a calculé, pour deux familles d'altimètres, le seuil de puissance du signal brouilleur au-delà duquel la détérioration des données est inacceptable. Dans le cas de l'altimètre TOPEX-POSEIDON (13,44-13,76 GHz), pour un rapport nominal signal/puissance de bruit S/N de 13 dB (en bande de base) et une relation constante entre le rapport S/N et le bruit de mesure d'altitude, un signal brouilleur composite de plus de -117 dB(W/320 MHz) engendrerait une augmentation inacceptable du bruit de mesure d'altitude (de plus de 4%). Dans le cas d'un autre altimètre TOPEX-POSEIDON (13,490-13,810 GHz), le niveau de brouillage admissible est de -130 dB(W/320 MHz). Les brouillages que subit l'altimètre TOPEX-POSEIDON ne sont gênants que pour les observations faites au-dessus des océans et de grandes étendues d'eau. Pour les altimètres ERS-1/2 (13,635-13,965 GHz pour l'altimètre ERS-1), des mesures effectuées par l'Agence spatiale européenne font apparaître que les données seront très altérées si la puissance du signal brouilleur composite est supérieure à -120 dB(W/330 MHz) pendant les observations des zones émergées, des étendues de glace et des océans.

Le taux de disponibilité des données altimétriques doit être de 95% en supposant que les interruptions sont brèves et présentent une distribution aléatoire sur l'ensemble des périodes et des emplacements d'observation (la plupart des interruptions durent 2 s ou moins). Les seuils de brouillage susmentionnés pourraient être dépassés par les liaisons Terre-espace du SFS. En outre, il peut y avoir des interruptions dues à des causes extérieures (précipitations intenses, par exemple). Etant donné que la perte de données imputable aux stations terriennes brouilleuses se produira systématiquement (c'est-à-dire de façon non aléatoire) aux mêmes endroits et que les observations (et les opérations d'étalonnage des altimètres) dans certaines zones revêtent une grande importance, il faut examiner cas par cas les brouillages causés par les stations terriennes du SFS qu'il est prévu d'exploiter. Plus précisément, il faut déterminer la portion de l'orbite/des orbites de l'altimètre et les zones d'observation correspondantes pour lesquelles on risque de perdre des données lorsque le brouillage causé par une station terrienne donnée est supérieur au niveau admissible.

3. Diffusiomètres

Le niveau admissible de brouillage diffère selon qu'il s'agit de diffusiomètres utilisant des antennes à faisceaux en éventail (systèmes actuels) ou à faisceaux étroits (modèles envisagés pour les systèmes de demain). De plus, il dépend de la vitesse des vents observés (lorsque les vents observés sont des vents de vitesse relativement faible, le risque de perte de données en raison de brouillage est plus grand). Le diffusiomètre NSCAT fonctionne avec une largeur de bande de 2,88 MHz centrée sur 13,995 GHz. Pour des diffusiomètres à faisceaux en éventail, un brouillage composite de plus de -174 dB(W/2 kHz) entraîne une erreur de mesure inacceptable pour des vents de faible vitesse. De même, pour des diffusiomètres à faisceaux étroits, ce seuil de brouillage se situe à -155 dB(W/10 kHz).

Les impératifs globaux de disponibilité applicables aux diffusiomètres sont semblables à ceux définis pour les altimètres à ceci près que, dans le cas de diffusiomètres, les interruptions internes sont plus nombreuses, les observations ne sont faites qu'au-dessus des océans et de grandes étendues d'eau et les pertes de données systématiques dans les mêmes emplacements ont moins d'importance. Par conséquent, si les liaisons Terre-espace du SFS dépassent le seuil de brouillage on observe, pour les données une perte systématique correspondant à 1% de la zone océanique et une perte aléatoire correspondant à 5% de cette même zone.

4. Radars de mesure des précipitations

L'objectif scientifique du radar TRMM de mesure des précipitations est d'obtenir, après traitement des données, une mesure des taux de précipitations $\geq 0,7$ mm/h et par conséquent une augmentation de 0,75 mm/h du taux de précipitation mesurable n'affectera pas les données et sera acceptable. Cette augmentation correspond à une dégradation de 10% du niveau de bruit du système due à un brouillage de type bruit. Par conséquent le brouillage doit être inférieur de 10 dB au niveau de bruit du système. Comme le niveau de bruit du système est de -140 dBW et que la largeur de bande totale du radar de mesure des précipitations est de 600 kHz, le seuil de brouillage préjudiciable est de -150 dB(W/600 kHz). En dehors de la bande de 12 MHz délimitée par 13,793 GHz et 13,805 GHz, le niveau admissible de brouillage est bien supérieur à la valeur précitée compte tenu de la présence d'un filtre passe-bande dans le récepteur: -115 dBW pour 13,790-13,793 GHz et 13,805-13,808 GHz, -90 dBW pour 13,75-13,79 GHz et 13,808-13,850 GHz et -70 dBW pour 13,85-13,86 GHz.

Les scientifiques du projet TRMM ont constaté que la disponibilité requise des données relatives aux précipitations dépendait du lieu de ces précipitations. Pour la plupart des zones situées dans la zone d'observation du radar TRMM entre $\geq 38^\circ$ de latitude, une perte de données de 0,2% par brouillage est acceptable.

En plus des critères susmentionnés, les zones où les mesures des précipitations revêtent une importance particulière doivent être prises en considération. Ces zones doivent, dans la mesure du possible, être protégées des brouillages pour éviter une perte et une dégradation des données. Ces zones peuvent être classées en deux catégories:

- les zones tropicales où les précipitations sont fortes et très variables doivent être protégées contre les brouillages: en effet la variabilité et le taux de précipitations influent beaucoup sur la circulation atmosphérique à grande échelle et donc le climat mondial. Parmi ces régions, la ceinture est-ouest située au nord de l'équateur (appelée zone de convergence intertropicale) et la grande ceinture comprise entre le continent maritime et le Pacifique Sud (appelée zone de convergence du Pacifique Sud et creux barométrique de la mousson en Australie) sont des zones particulièrement importantes. Elles sont généralement délimitées par $0-10^\circ$ de latitude nord et $50-180^\circ$ de longitude est et par $0-10^\circ$ de latitude sud (voir la Fig. 2);
- pour s'assurer de la précision des mesures il faut disposer de moyens de vérité terrain au sol pour la plupart des recherches TRMM. Pour TRMM, on a placé plusieurs installations de vérité terrain en des endroits clés de la zone d'observation du radar TRMM. Au Japon, on construira également au moins un site d'étalonnage pour le radar de mesure des précipitations.

Pour certaines stations terriennes du SFS, il faudra procéder à des consultations pour déterminer le lieu, l'importance et les conséquences des pertes de données dans ces zones limitées afin de vérifier si l'utilisation de certaines fréquences entre 13,75 et 14 GHz par le SFS est compatible avec les exigences de la mission TRMM.

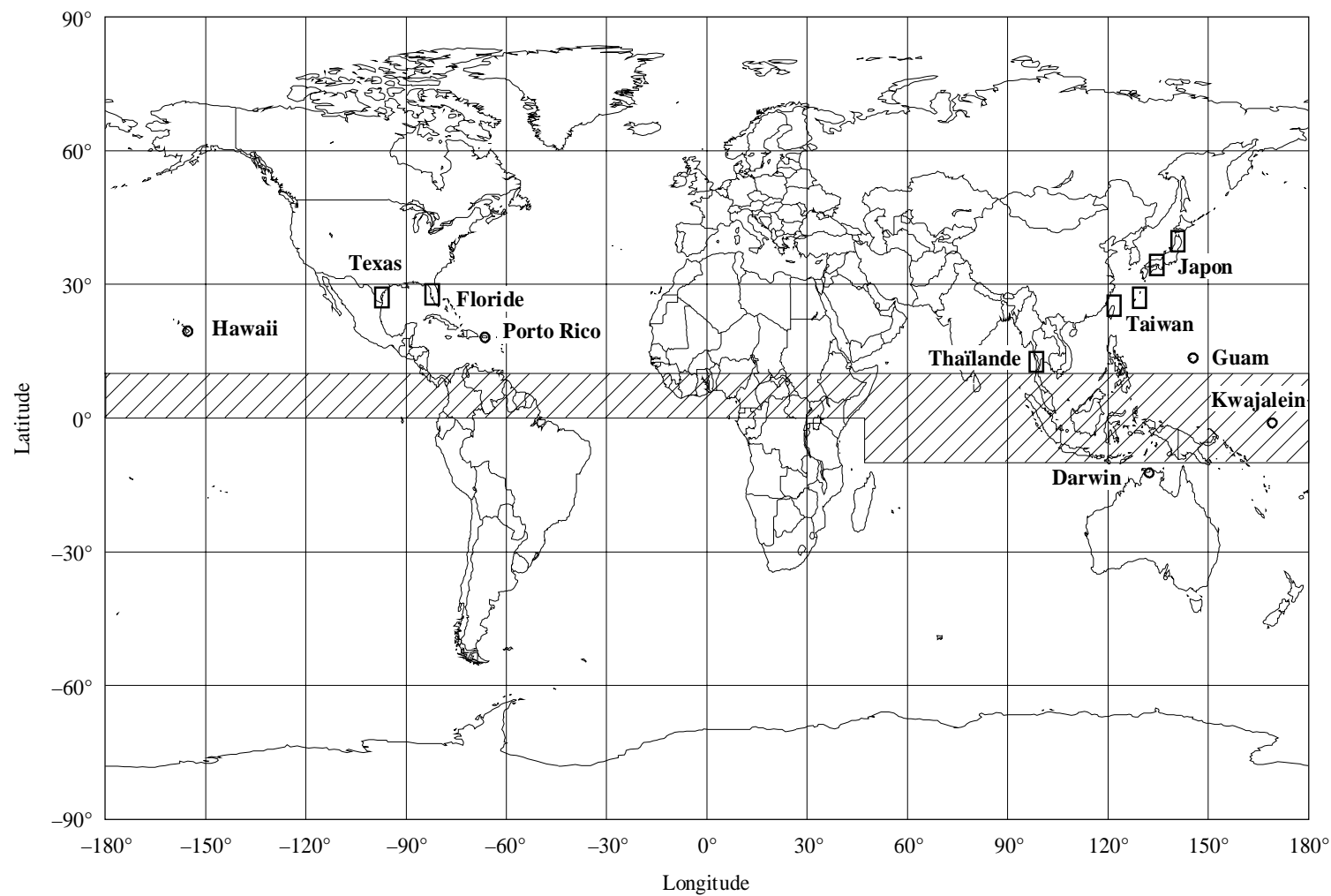
Les coordonnées des zones à fort taux de précipitations et de première importance précitées et des installations de vérité terrain au sol sont données à la Fig. 2. Les dix sites retenus relèvent de deux catégories: sites multiradar et sites monoradar. Les sites multiradar détectent toutes les précipitations dans un volume de 500×500 km aux fins de validation des moyennes climatiques mensuelles. Les sites monoradar opèrent dans un rayon de 120 à 150 km. Les coordonnées de ces sites radar sont données dans le Tableau 1. Il n'est actuellement pas prévu d'ajouter de nouveaux sites de vérité terrain mais il est possible d'en ajouter un ou plusieurs qui devront être pris en compte pour la planification des sites des stations terriennes.

5. Systèmes à satellites relais de données

Le niveau admissible de dégradation d'une liaison d'un satellite relais de données correspond à une réduction de 0,4 dB de la marge de puissance de la liaison ce qui se produit pour un rapport I/N de -10 dB. Une valeur de -178 dB(W/kHz) pourrait être utilisée pour le critère de protection composite pendant moins de 0,1% du temps sur la liaison interorbite aller d'un satellite LEO exploité dans un réseau à satellite relais de données. Cela correspond à -140 dB(W/6 MHz). La valeur de -10 dB pour le rapport I/N s'applique sur une largeur de bande de 50 MHz centrée sur 13,775 GHz, bien qu'on puisse utiliser une largeur de bande de 50 MHz au maximum centrée sur la même fréquence. Pour obtenir les disponibilités de liaisons souhaitées, les liaisons Terre-espace du SFS ne doivent pas dépasser le seuil de brouillage pendant plus de 0,1% du temps.

FIGURE 2

Emplacement des zones à fort taux de précipitations et de première importance et des sites de vérité terrain



- Sites multiradar
- Sites monoradar
- ▨ Zones à fort taux de précipitations et de première importance pour TRMM

D02

TABLEAU 1

Coordonnées des sites de contre-vérification au sol du radar TRMM

| Lieu/Type | Nom | Latitude | Longitude |
|----------------------------------|---|-----------|------------|
| 1. Floride Site multiradar | Melbourne, FL | 28° 06' N | 080° 39' W |
| | Miami, FL | 25° 36' N | 080° 24' W |
| | Jacksonville, FL | 30° 30' N | 080° 39' W |
| | Tampa, FL | 27° 42' N | 082° 24' W |
| | Key West, FL | 24° 33' N | 081° 45' W |
| | Tallahassee, FL | 30° 24' N | 084° 21' W |
| 2. Australie Site monoradar | Darwin, AUS | 12° 27' S | 130° 55' E |
| 3. Kwajalein Site monoradar | Kwajalein Atoll | 08° 43' N | 167° 43' E |
| 4. Texas Site multiradar | Houston, TX | 29° 28' N | 095° 05' W |
| | Texas A&M, TX | 30° 35' N | 096° 30' W |
| | Brownsville, TX | 25° 54' N | 097° 36' W |
| | Corpus Christi, TX | 27° 46' N | 097° 30' W |
| | San Antonio, TX | 29° 42' N | 098° 03' W |
| 5. Mariannes Site monoradar | Guam | 13° 39' N | 145° 47' E |
| 6. Japon Site multiradar | Combinaison de pluviomètres et de radars météorologiques répartis sur les îles japonaises | | |
| 7. Thaïlande Site multiradar | Phuket, THA | 08° 00' N | 098° 30' E |
| | Om Koi, THA | 17° 48' N | 098° 25' E |
| | Bangkok, THA | 14° 10' N | 100° 30' E |
| 8. Hawaii Site monoradar | Hawaii, HA | 19° 00' N | 156° 00' W |
| 9. Taiwan Site multiradar | Taipei, | 25° 10' N | 121° 45' E |
| | Kuanshan, | 25° 05' N | 121° 35' E |
| 10. Porto Rico Site monoradar | Humacao, PR | 18° 10' N | 066° 21' W |

**Possibilités d'exploitation des systèmes scientifiques spatiaux
et de mise en œuvre des liaisons montantes du SFS
dans la bande 13,75-14 GHz**

1. Introduction

Il s'agit dans la présente Annexe d'examiner les possibilités de partage de la bande 13,75-14 GHz entre divers types de systèmes scientifiques spatiaux et les liaisons Terre-espace du SFS. Les niveaux potentiels et les caractéristiques temporelles et spatiales des brouillages causés à des systèmes scientifiques spatiaux opérationnels existants ou en projet sont évalués. Les résultats sont comparés aux critères spécifiés dans l'Annexe 2 afin de déterminer si les limites de p.i.r.e. et de diamètre minimal des antennes (numéro 855A du RR) assurent une protection suffisante pour chaque type de système scientifique spatial. Lorsque le niveau admissible de brouillage risque d'être dépassé, des mesures sont prises pour éviter des brouillages inacceptables. Dans tous les cas, les prolongements des résultats des analyses sont interprétés au regard des dispositions du numéro 855B du RR.

2. Brouillage causé à des capteurs actifs

Plusieurs des analyses suivantes font apparaître que les critères de brouillage composite spécifiés à l'Annexe 2 ne seront pas toujours respectés c'est-à-dire pour tous les capteurs actifs à l'exception des diffusiomètres à faisceaux étroits. Dans ce cas, compte tenu des dispositions du numéro 855B du RR, il convient d'appliquer les mesures suivantes pour protéger les capteurs actifs jusqu'à l'an 2000:

- il faut procéder à une consultation cas par cas si les assignations de fréquence aux stations terriennes et aux capteurs actifs se recoupent, dans les cas où le niveau de crête du signal brouilleur, à la sortie de l'antenne du récepteur, dépasserait le niveau admissible précisé à l'Annexe 2;
- pour faciliter la consultation, les emplacements et les caractéristiques de toutes les stations terriennes susceptibles de causer des brouillages doivent être communiqués aux administrations exploitant des capteurs actifs. Cela permettra à ces exploitants de savoir si des pertes de données sont acceptables dans ces zones;
- il convient de consulter les Recommandations UIT-R actuelles et futures ainsi que les paragraphes suivants en tant que guide pour la conception et les règles opératives des systèmes du SFS et des services scientifiques spatiaux et pour les considérations qui permettront de maintenir les brouillages à des niveaux acceptables.

2.1 Altimètres

On a évalué les brouillages que des stations terriennes pouvaient causer aux altimètres ERS-1/2 et TOPEX-POSEIDON. En général, on a constaté qu'une station terrienne conforme aux dispositions du numéro 855A du RR pouvait causer un brouillage dans le même canal supérieur au niveau admissible. Les dispositions du numéro 855A du RR portent sur la protection des systèmes de radiolocalisation de Terre contre les émissions des stations de Terre mais elles peuvent néanmoins faciliter le partage avec les services scientifiques spatiaux. Toutefois, il faut généralement procéder à un examen cas par cas des situations de brouillage dans le même canal afin d'évaluer les risques de perturbation du fonctionnement des altimètres des systèmes actuels et de déterminer les corrections appropriées. Dans certains cas, il est prévu de conserver, pour l'engin spatial à bord duquel est embarqué l'altimètre, des orbites qui peuvent empêcher l'illumination de l'engin spatial par le faisceau principal et l'apparition de brouillages supérieurs au niveau admissible; dans ces cas, le brouillage peut être évité intrinsèquement ou en limitant le choix des emplacements des stations terriennes. Ce principe est illustré à la Fig. 3 pour l'altimètre TOPEX-POSEIDON: la Figure fait apparaître que la zone de la sphère orbitale de l'altimètre dans laquelle le niveau admissible de brouillage peut être dépassé est beaucoup plus petite que la zone située entre les emplacements prévus pour le satellite (les «zones de brouillage» au-dessus du sol peuvent être négligées car, en l'occurrence, les observations ne portent que sur les océans). On a par ailleurs constaté qu'à long terme (c'est-à-dire, si la station terrienne utilise la bande de façon intensive), les impératifs de qualité de fonctionnement des altimètres des systèmes actuels ne pourront pas vraisemblablement être respectés dans la bande utilisée en partage en raison de la dégradation systématique qui risque de se produire dans les zones d'observation relativement importantes.

FIGURE 3a
Orbite de l'altimètre TOPEX-POSEIDON en fonction
de la zone de brouillage potentielle

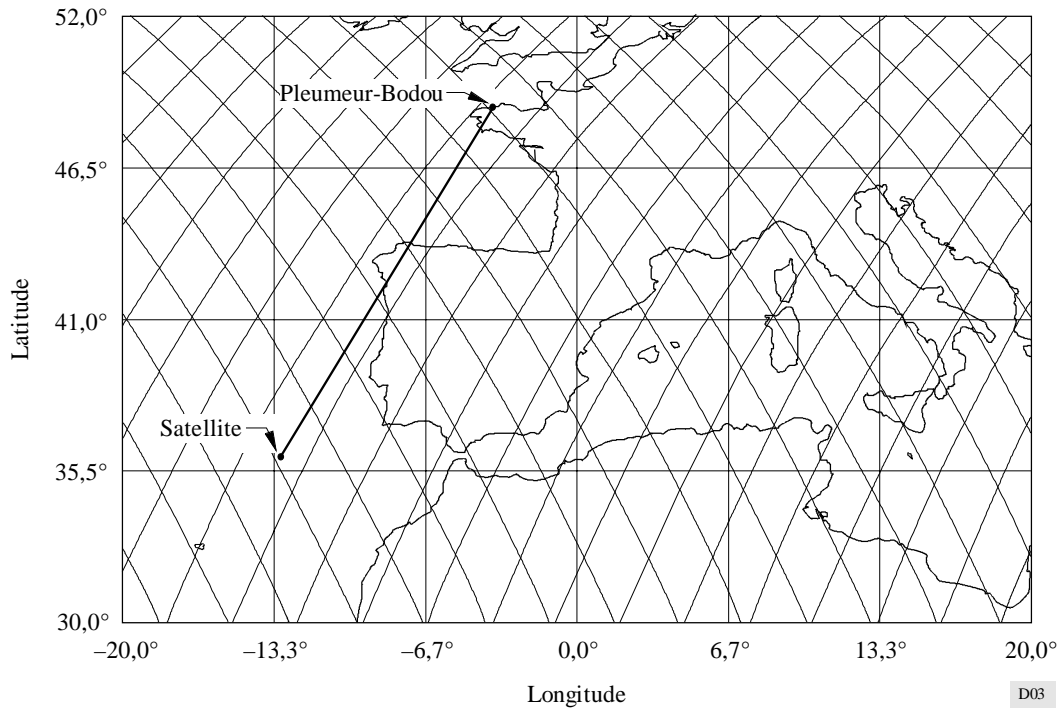
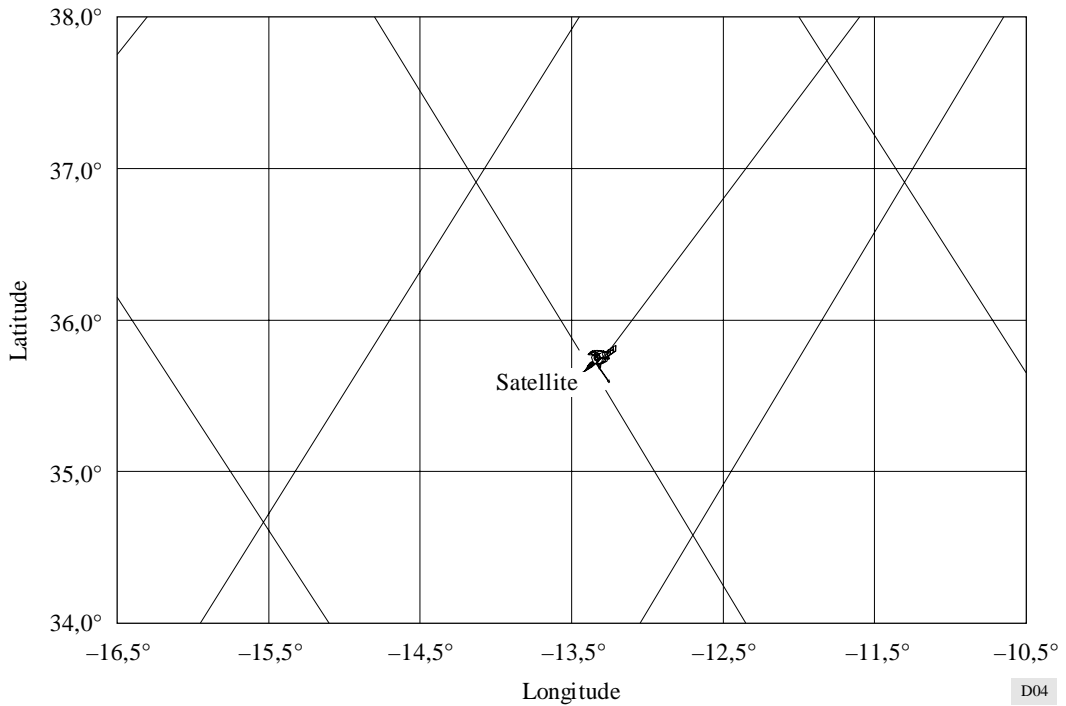
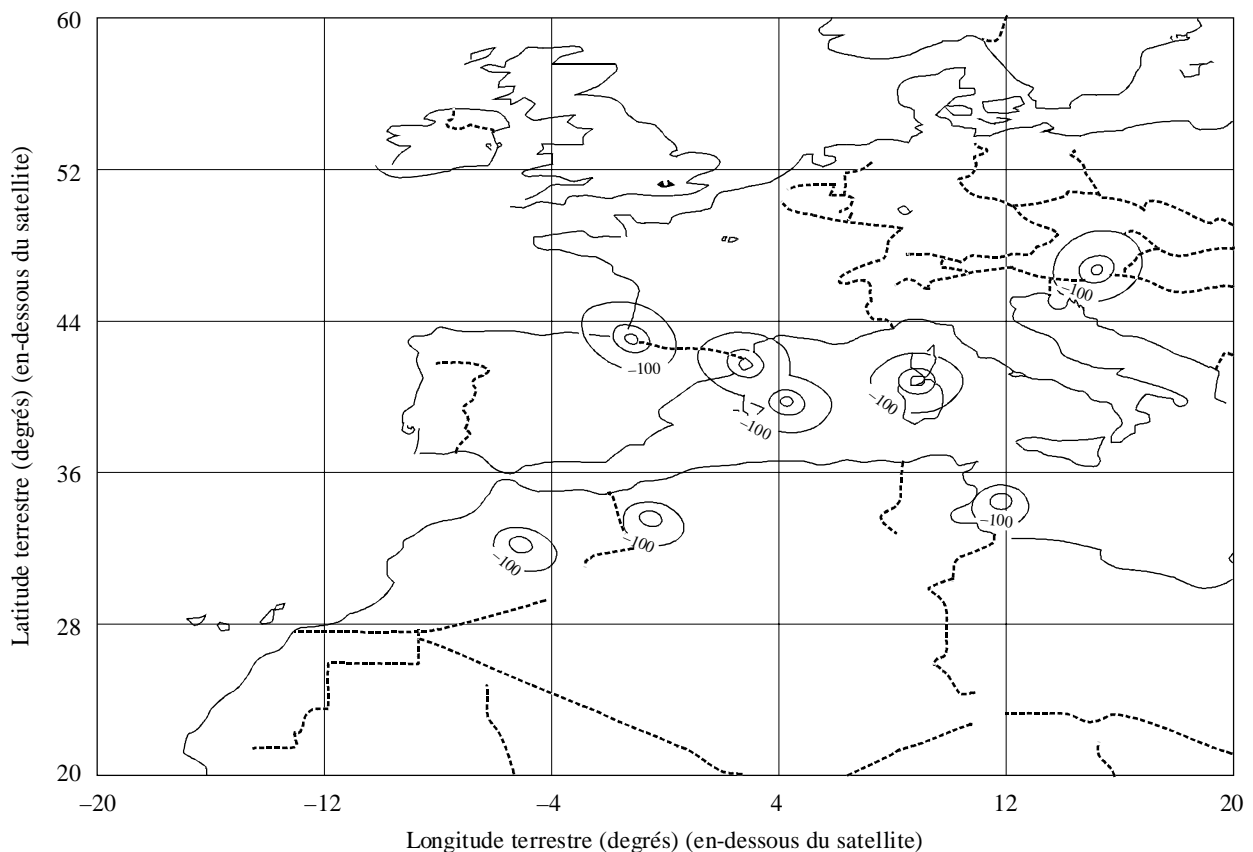


FIGURE 3b
Figure 3a agrandie



La Fig. 4 illustre les zones dans lesquelles le seuil de brouillage propre aux altimètres ERS-1/2 serait dépassé si plusieurs stations terriennes, équipées d'antennes de 4,5 m de diamètre, étaient exploitées dans le même canal. La discrimination de polarisation est négligée et on suppose que le diagramme de rayonnement de l'antenne de la station terrienne est conforme à l'Appendice 28 du RR. La Figure montre que, pour chaque station terrienne, le seuil de brouillage serait dépassé dans la zone située autour de l'emplacement de la station terrienne et dans une zone plus importante correspondant à l'illumination de l'altimètre par le faisceau principal de l'antenne de la station. Les dimensions de ces zones et leur variation en fonction du diamètre de l'antenne de la station terrienne et de la p.i.r.e. totale dans la partie de la largeur de bande de l'altimètre qui recoupe la bande utilisée en partage (13,75-13,965 GHz) sont indiquées dans les Tableaux 2 et 3.

FIGURE 4
Niveau de brouillage en-dessous du satellite (dBm)



Vue d'ensemble des zones de brouillage engendrées par les émissions de stations terriennes à Stockholm, Londres, Dublin, Paris, Francfort, Rome, Madrid et Lisbonne.

Diamètre des antennes de stations terriennes: 4,5 m; satellite géostationnaire à 10° E.

Courbes tracées par pas de 10 dB. Courbes correspondant à une dégradation inacceptable des données: la courbe «-100» correspond à une p.i.r.e. de station terrienne de 95 dBW dans la largeur de bande de l'altimètre; les courbes concentriques plus petites correspondent à des niveaux de p.i.r.e. pour la station terrienne de 85 et 75 dBW dans la largeur de bande de l'altimètre.

D05

La Fig. 5 indique la puissance du signal brouilleur que reçoit un altimètre du type TOPEX-POSEIDON dans l'intervalle de temps de 10 min pendant lequel il traverse le faisceau principal de l'antenne de la station terrienne (pas de discrimination de polarisation et par hypothèse fonctionnement dans le même canal) si on suppose que la station terrienne utilise une p.i.r.e. de 85 dBW et une antenne de 4,5 m de diamètre dont le diagramme de rayonnement est conforme à l'Appendice 28 du RR. La Figure fait apparaître que même si on utilisait la p.i.r.e. minimale de la station terrienne (68 dBW), le niveau admissible de brouillage pourrait être dépassé. La Fig. 6 illustre la distribution cumulative dans le temps de la puissance des signaux brouilleurs de 32 stations terriennes implantées en Europe, en Afrique, dans les régions orientales de l'Amérique du Nord et de l'Amérique du Sud et fonctionnant avec des satellites qui assurent une couverture régionale transatlantique et européenne. Ces stations peuvent représenter un tiers de l'ensemble des stations terriennes qui seront déployées à long terme dans le monde et qui fonctionneront avec un altimètre dans le même canal.

On suppose que les stations terriennes ont une p.i.r.e. totale de 80 dBW dans la largeur de bande de l'altimètre et sont équipées d'antennes de 4,5 m de diamètre. Aucune discrimination de polarisation n'est prise en considération. La Fig. 6 fait apparaître qu'à long terme moins de 0,001% des observations risquent d'être affectées par une dégradation en raison du dépassement du seuil de brouillage admissible; toutefois, la perte de données est systématique et peut survenir dans des zones d'observation particulièrement importantes.

TABLEAU 2
Zone de brouillage potentiel autour d'une station terrienne en fonction de la p.i.r.e dans la largeur de bande de l'altimètre

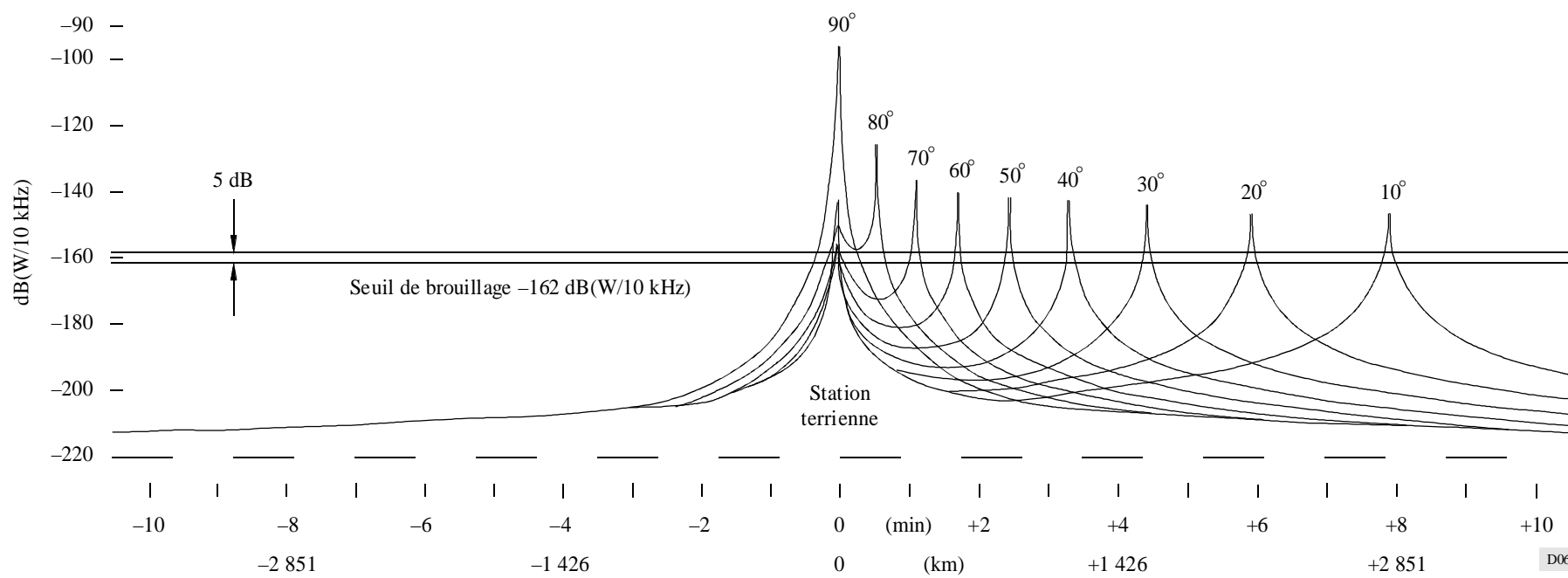
| Station terrienne | | Zone de brouillage potentiel (elliptique) | |
|-------------------|----------------|--|--|
| | | Pleumeur Bodou Satellite 16° E (grand/petit axe) | Pleumeur Bodou Satellite 53° O (grand/petit axe) |
| Diamètre (m) | p.i.r.e. (dBW) | | |
| 4,5 | 75 | Pas de dégradation | Pas de dégradation |
| 4,5 | 85 | 35 km/30 km | 35 km/30 km |
| 4,5 | 95 | 50 km/45 km | 50 km/45 km |
| 11 | 75 | Pas de dégradation | Pas de dégradation |
| 11 | 85 | 15 km/15 km | 15 km/15 km |
| 11 | 95 | 40 km/35 km | 40 km/35 km |

TABLEAU 3
Zone de brouillage potentiel en dessous de l'intersection entre le faisceau principal de l'antenne de la station terrienne et la sphère orbitale de l'altimètre en fonction de la p.i.r.e. de la station terrienne dans la largeur de bande de l'altimètre

| Station terrienne | | Zone de brouillage potentiel (elliptique) | |
|-------------------|----------------|--|--|
| | | Pleumeur Bodou Satellite 16° E (grand/petit axe) | Pleumeur Bodou Satellite 53° O (grand/petit axe) |
| Diamètre (m) | p.i.r.e. (dBW) | | |
| 4,5 | 75 | 55 km/50 km | 40 km/25 km |
| 4,5 | 85 | 140 km/135 km | 160 km/95 km |
| 4,5 | 95 | 320 km/320 km | 415 km/245 km |
| 11 | 75 | 30 km/25 km | 15 km/10 km |
| 11 | 85 | 70 km/70 km | 80 km/50 km |
| 11 | 95 | 180 km/175 km | 210 km/125 km |

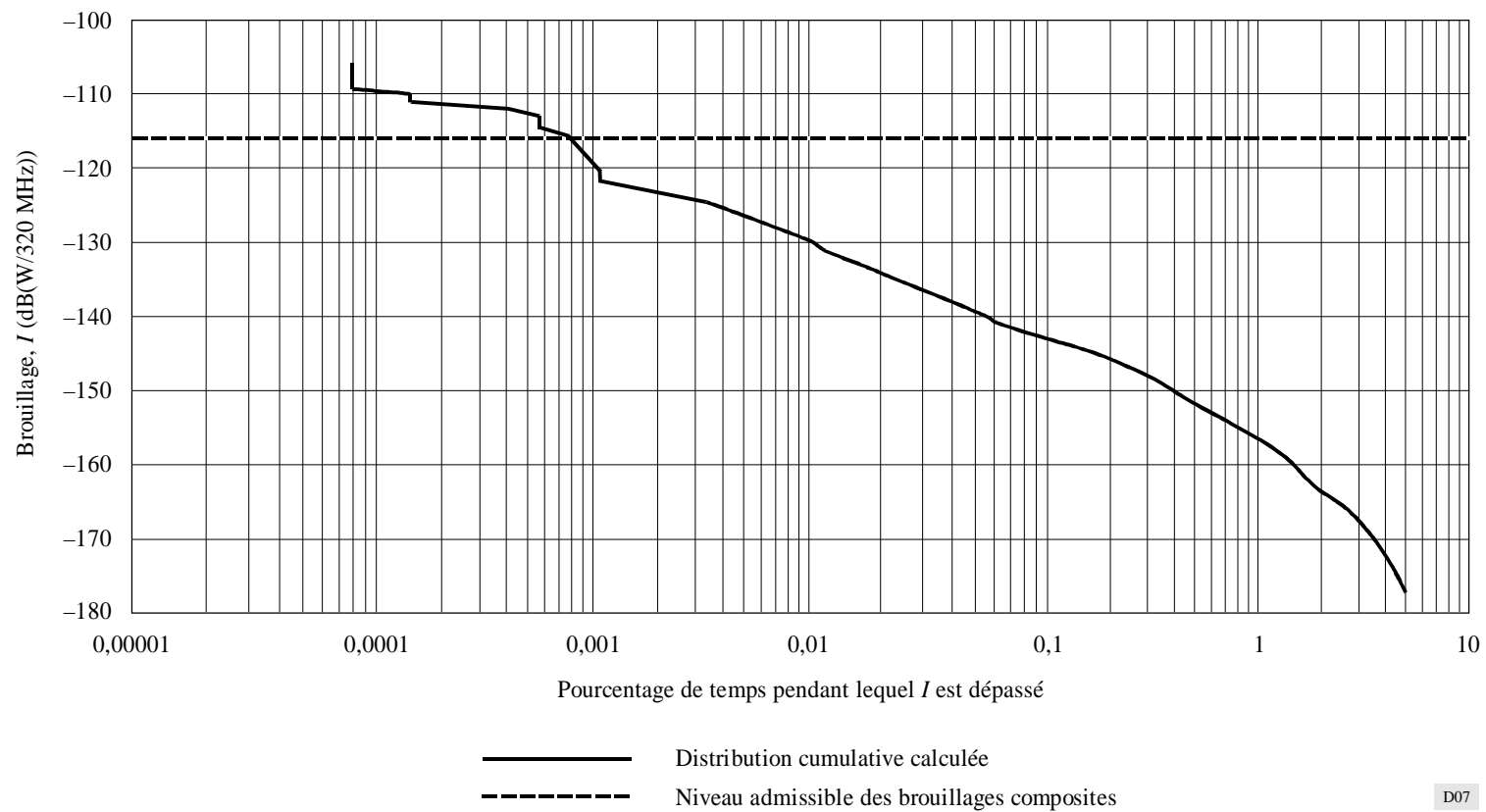
FIGURE 5

Brouillage en fonction de la position du satellite TOPEX pour différents angles d'élévation du faisceau de l'antenne de la station terrienne du SFS



D06

FIGURE 6
 Brouillage causé aux altimètres par 32 stations terriennes du SFS avec une p.i.r.e. de 80 dBW



D07

2.2 Diffusiomètres

On a constaté que pour un diffusiomètre NSCAT utilisant une antenne à faisceaux en éventail, 0,5% des données seraient systématiquement perdues en raison des brouillages causés par une station terrienne dotée d'une antenne de 4,5 m de diamètre conforme à l'Appendice 28 du RR et fonctionnant dans le même canal avec une p.i.r.e. de 85 dBW. Le brouillage dépasserait les niveaux admissibles si la p.i.r.e. des stations terriennes rayonnée en direction de l'orbite du diffusiomètre au-dessus des océans dépassait 25 dBW dans une tranche quelconque de 2 kHz de la largeur de bande utilisée par les diffusiomètres à faisceaux en éventail, ce qui est inférieur à la densité de p.i.r.e. des émissions de stations terriennes types fonctionnant à la p.i.r.e. minimale autorisée aux termes du numéro 855A du RR. Etant donné que les diffusiomètres utilisent de petites largeurs de bande (13,99356-13,99644 GHz ou 2,88 MHz pour le diffusiomètre NSCAT), éviter tout fonctionnement dans le même canal est un moyen facile de protéger les diffusiomètres à faisceaux en éventail.

La Fig. 7 présente la distribution cumulative dans le temps des brouillages que subit un diffusiomètre à faisceaux étroits avec le même réseau de 32 stations terriennes que dans le paragraphe précédent, la densité de p.i.r.e. totale par station terrienne étant par hypothèse de 77 dB(W/2 MHz). Les brouillages observés au-dessus du sol sont pris en compte même si seules les observations au-dessus des océans comptent; les risques de brouillage sont donc exagérés. Néanmoins, la Figure fait apparaître que, si les stations terriennes sont exploitées conformément au numéro 855A du RR, le brouillage causé à un diffusiomètre à faisceaux étroits sera inférieur au niveau de brouillage admissible et aucun examen cas par cas ne sera nécessaire.

2.3 Radars de mesure des précipitations

Les brouillages causés par les émissions des stations terriennes du SFS peuvent atteindre le récepteur du radar de mesure des précipitations par couplage faisceau principal-faisceau principal, par couplage faisceau principal du SFS-lobe latéral du radar, par couplage lobe latéral du SFS-faisceau principal du radar et par couplage lobe latéral du SFS-lobe latéral du radar. La gamme des latitudes où ces modes de brouillage sont possibles est déterminée par des considérations géométriques. Le couplage faisceau principal-faisceau principal ne peut se produire que si l'angle d'élévation de l'antenne du SFS est supérieur à 71°. Le couplage faisceau principal du SFS-faisceau latéral du radar ne peut pas avoir lieu si la station terrienne est située à des latitudes supérieures à 40° et si son angle d'élévation est supérieur à 5°. Le couplage lobe latéral du SFS-faisceau principal du radar est possible aux latitudes inférieures à 36°. Le couplage lobe latéral-lobe latéral peut se produire en tout lieu où le radar et la station terrienne sont en visibilité directe, ce qui pour l'orbite du radar TRMM est possible à des latitudes de 55° au maximum.

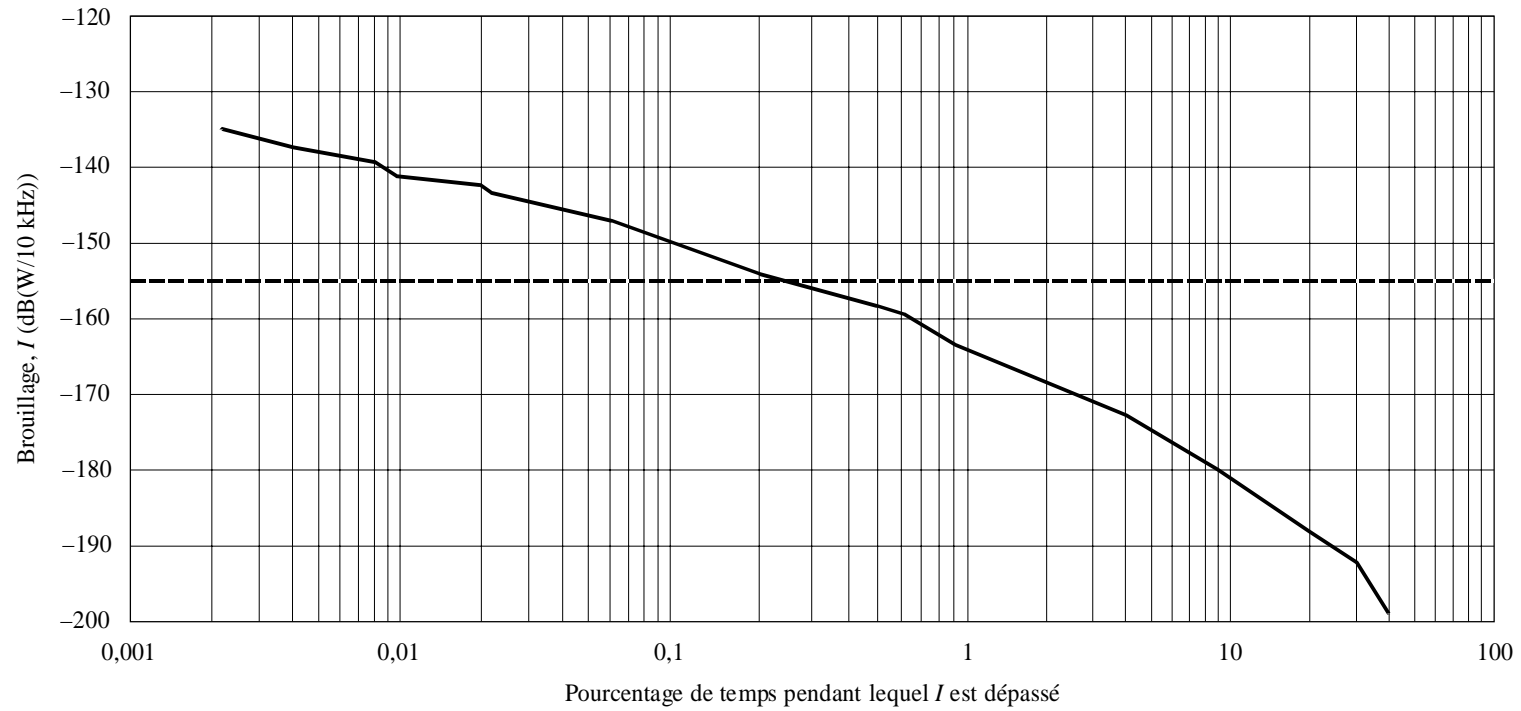
Un signal brouilleur émis dans la bande par une station terrienne du SFS peut dégrader la précision des observations du radar de deux façons: d'une part par dégradation du rapport signal/bruit et d'autre part par une erreur de biais causée par un signal brouilleur de type onde entretenue et par la non-linéarité du récepteur. On conclut donc que le niveau de brouillage admissible I_{max} , qui dépend essentiellement du premier mode de dégradation, correspond à un rapport des puissances signal brouilleur/bruit du système de -10 dB ou -150 dBW pour 0,60 MHz. Cette valeur doit être appliquée pour la fréquence $13,799 \pm 0,006$ GHz. Il convient de noter que le brouillage peut également être dû aux signaux du SFS situés en dehors de la largeur de bande de 12 MHz autour de 13,8 GHz; le brouillage «par fuite» est imputable à l'affaiblissement fini des filtres passe-bande du récepteur ou à la saturation des amplificateurs du récepteur radar. I_{max} est déterminé par l'un de ces deux phénomènes. Tout comme le brouillage par fuite, I_{max} peut être supérieur d'au moins 60 dB compte tenu de l'affaiblissement des filtres passe-bande du récepteur radar. Etant donné que ces amplificateurs, sensibles à la saturation causée par les brouillages, sont placés devant les filtres passe-bande à bande étroite, la bande de fréquences à prendre en considération est supérieure à celle considérée pour ces filtres. On montre que I_{max} dépend fortement du brouillage par fuite pour les fréquences comprises entre 13,7 et 13,9 GHz et de la saturation aux autres fréquences.

On a analysé les scénarios de brouillage avec une station terrienne du SFS de 82 dBW de p.i.r.e. pour donner une idée de la gravité des brouillages que peut subir un radar de mesure des précipitations. Les niveaux de brouillage en présence d'un couplage faisceau principal-faisceau principal dépasseraient largement le seuil de -150 dBW si ce brouillage se trouvait dans la largeur de bande du dernier filtre passe-bande du récepteur radar. Il convient de noter que ce couplage provoquerait des brouillages sur la bande 13,75-14 GHz et qu'il faut donc l'éviter.

Le brouillage par couplage faisceau principal SFS-lobes latéraux proches du radar ou par couplage lobes latéraux proches du SFS-faisceau principal du radar dépasserait également de 84 dB le seuil de brouillage du radar. Les émissions du SFS dans les fréquences comprises entre 13,75 et 13,86 GHz pourraient causer des brouillages. Il importe donc d'effectuer une coordination de chaque station terrienne située à des latitudes inférieures à 40° pour que les brouillages par couplage lobes principaux-lobes latéraux ne faussent pas les mesures en des points géographiques critiques à la surface de la Terre.

FIGURE 7

Brouillage causé à des diffusionmètres à faisceau étroit par 32 stations du SFS rayonnant chacune une densité de p.i.r.e. de 77 dB(W/2 MHz)



— Distribution cumulative calculée
- - - Niveau admissible des brouillages composites

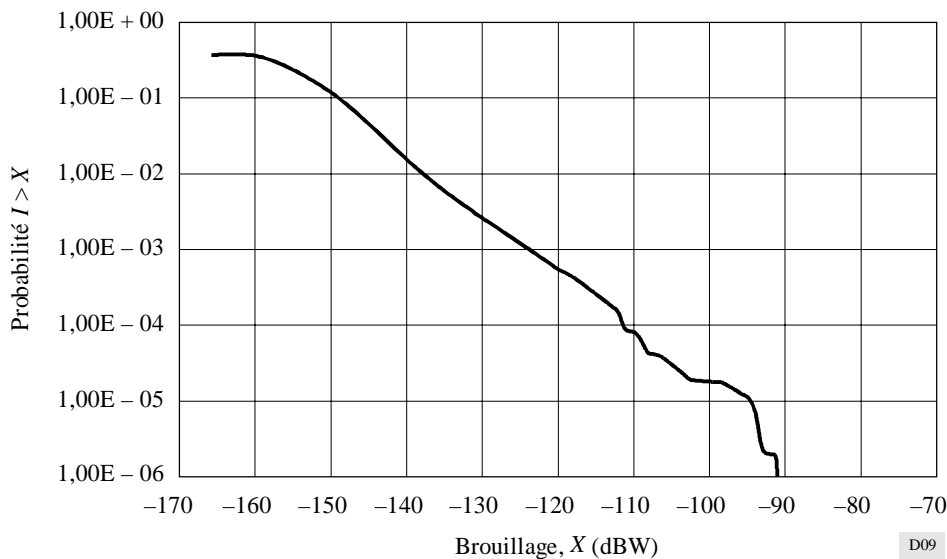
D08

Même en cas de brouillage par couplage lobes latéraux proches du SFS-lobes latéraux proches du radar la puissance reçue serait supérieure au seuil de brouillage si les signaux émis par le SFS venaient à se trouver à l'intérieur de la bande passante du filtre passe-bande du récepteur radar. La puissance reçue ne suffirait pas à saturer ce dernier.

On a procédé à une analyse statistique des brouillages causés à un radar par les émissions d'une station terrienne du SFS en prenant pour hypothèse de départ 32 stations terriennes du SFS exploitées dans la région de l'Océan atlantique. Chaque station était équipée d'une antenne de 4,5 m de diamètre et rayonnait une p.i.r.e. de 82 dBW (du même modèle de station terrienne que celui utilisé pour l'analyse des brouillages causés aux altimètres, diffusiomètres et satellites relais de données). Les résultats sont consignés à la Fig. 8 où l'on constate que le seuil de brouillage (-150 dBW) serait dépassé pendant environ 20% du temps.

FIGURE 8

Probabilité de brouillage causé au radar de mesures des précipitations TRMM par 32 stations terriennes du SFS réparties dans la région de l'Océan atlantique, rayonnant chacune une p.i.r.e. de 82 dBW



L'extrapolation de l'analyse statistique pour la région de l'Océan atlantique à un parc mondial de stations terriennes du SFS a été effectuée en supposant que le nombre de stations potentiellement brouilleuses dans le monde en l'an 2000 serait d'environ 25. Dans ce cas, en supposant que la plupart de ces stations seraient dotées d'antennes à diagramme de rayonnement des lobes latéraux amélioré ($29 - 25 \log \phi$) le critère de disponibilité du radar de mesure des précipitations pourrait être respecté si la densité de p.i.r.e. dans la bande 13,793-13,805 GHz était limitée à 61 dBW pour les stations terriennes en visibilité directe du radar. Cependant les emplacements devraient encore faire l'objet d'un examen cas par cas.

Les hypothèses ont été révisées sur la base des informations fournies par le Groupe d'action 4/4 en ce qui concerne le programme de mise en service prévu et le diagramme de rayonnement des lobes latéraux des stations terriennes dans la bande 13,75-14 GHz.

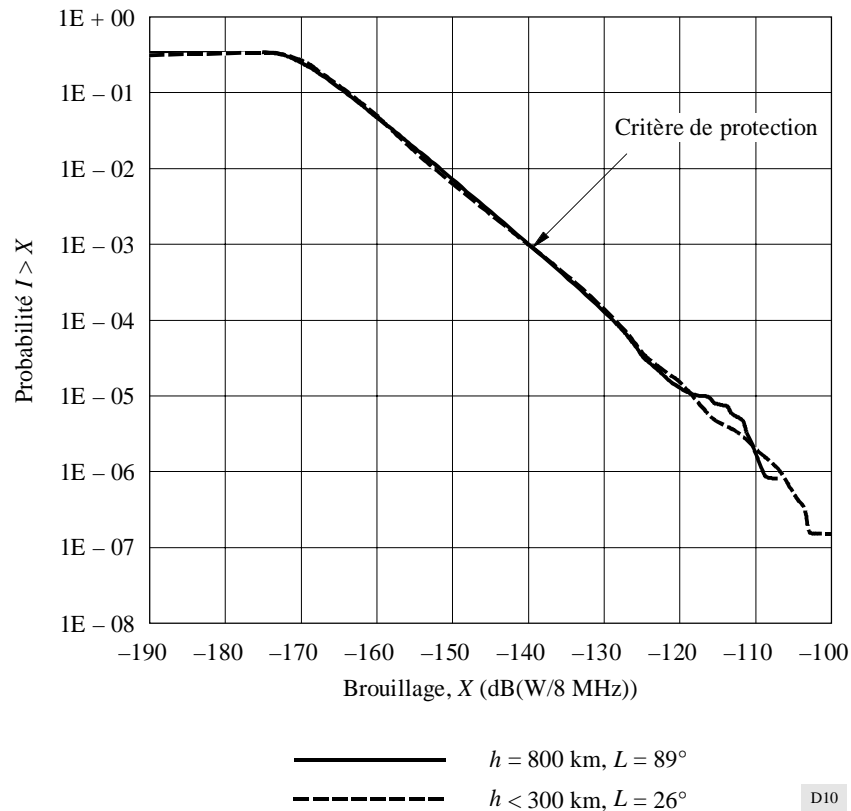
3. Brouillage causé à des systèmes à satellites relais de données

On a effectué une analyse statistique du brouillage causé d'une part, à un récepteur embarqué à bord d'un satellite sur orbite basse fortement inclinée (altitude de 800 km) et d'autre part, à un récepteur embarqué à bord d'un satellite sur une orbite modérément inclinée (altitude de 300 km). Ces satellites font partie d'un réseau à satellite relais de données et subissent les brouillages des émissions des stations terriennes du SFS. On a supposé qu'il y avait au total 32 stations terriennes du SFS implantées dans la région de l'Océan atlantique comme précédemment décrit. Les stations terriennes, équipées d'antennes de 4,5 m de diamètre, émettaient à un niveau de p.i.r.e. de 68 ou 85 dBW dans une largeur de bande de 6 MHz.

Les résultats de l'analyse statistique sont présentés à la Fig. 9. On constate, qu'en appliquant le critère de protection de -140,2 dB(W/6 MHz) pendant moins de 0,1% du temps, qu'une limite de densité de p.i.r.e. de 71 dB(W/6 MHz) autorise la présence de 32 stations terriennes du SFS avec émissions centrées sur 13,775 GHz.

FIGURE 9

Probabilité de brouillage causé à la liaison aller du satellite
relais de données par 32 stations terriennes du SFS
fonctionnant dans la zone de l'Océan atlantique:
densité de p.i.r.e. 71 dB (W/6 MHz)



On conclut de ces résultats que pour 32 stations terriennes du SFS émettant à un niveau de p.i.r.e. de 71 dBW dans une largeur de bande de 6 MHz centrée sur 13,775 GHz, la dégradation de la marge de liaison observée ne serait pas supérieure à 0,4 dB pendant plus de 0,1% du temps. Une valeur légèrement inférieure à 71 dB(W/6 MHz) pour la p.i.r.e. serait appropriée si les stations terriennes d'émission étaient plus nombreuses.

On a, par ailleurs, évalué dans quelle mesure le diamètre de l'antenne de la station terrienne du SFS avait une incidence sur la possibilité d'exploiter la liaison d'un satellite relais de données vers un satellite en orbite basse centrée sur 13,775 GHz. Par hypothèse, les paramètres du satellite sont les suivants:

- altitude: 800 km,
- inclinaison de l'orbite: 89° ,
- gain de l'antenne de réception en direction du signal brouilleur: 0 dBi.

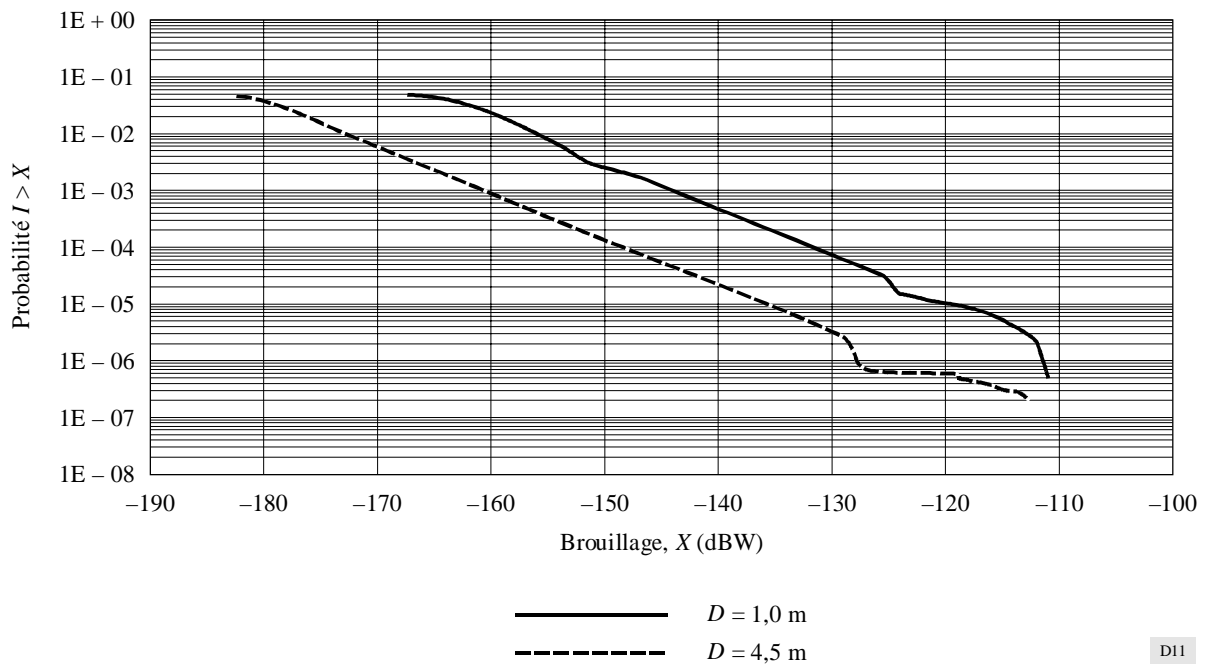
Par hypothèse, les paramètres de la station terrienne du SFS sont les suivants:

- latitude de la station: 38° ,
- angle d'élévation de l'antenne d'émission: 15° ,
- angle d'azimut de l'antenne d'émission par rapport au plein sud: $70,2^\circ$ (valeur calculée à partir de la latitude et de l'angle d'élévation de la station),
- diamètre des antennes d'émission: 1 m et 4,5 m,
- p.i.r.e. des antennes d'émission (1 m ou 4,5 m de diamètre): 68 dBW,
- diagramme de rayonnement de référence de l'antenne d'émission conforme à celui donné dans l'Appendice 29 du RR.

Les résultats de l'analyse sont donnés à la Fig. 10. Les statistiques pour une antenne de 1 m de diamètre correspondent à la ligne en traits pleins et celles pour une antenne de 4,5 m de diamètre à la ligne en pointillé. La Figure fait apparaître que l'antenne de 1 m de diamètre cause un brouillage de 16 dB supérieur à celui imputable à une antenne de 4,5 m de diamètre. Il faudrait donc un groupe de 40 stations terriennes du SFS équipées d'antennes de 4,5 m de diamètre pour causer autant de brouillage à long terme qu'une seule station terrienne du SFS équipée d'une antenne de 1 m de diamètre. On en conclut que l'assouplissement des valeurs indiquées au numéro 855A du RR pour le diamètre minimal de l'antenne augmenterait sensiblement les risques de brouillages que pourraient subir des satellites en orbite basse fonctionnant dans des réseaux à satellites relais de données.

FIGURE 10

Statistiques du brouillage causé à la liaison aller d'un satellite relais de données: comparaison entre une antenne d'émission de station terrienne du SFS de 1 m de diamètre et une antenne d'émission de station terrienne du SFS de 4,5 m de diamètre



D11

4. Brouillage causé à des satellites géostationnaires du SFS

4.1 *Espacement orbital pour le satellite de poursuite et de relais de données (TDRS) des Etats-Unis d'Amérique*

On a procédé à une analyse pour déterminer le rapport de puissance porteuse/brouillage (C/I) sur les liaisons montantes d'un satellite adjacent du SFS résultant du brouillage causé par les émissions d'un satellite TDRS géostationnaire. On a constaté que pour la liaison aller inter-orbite le rapport C/I était supérieur à 53 dB pour un espacement angulaire de $0,1^\circ$ sur l'orbite. Dans le cas de liaisons de connexion espace-Terre, le rapport C/I sera supérieur à 64 dB avec le même espacement angulaire. Dans les deux cas, on a supposé que la p.i.r.e. rayonnée par la station terrienne du SFS était de 68 dBW.

4.2 *Niveaux de puissance surfacique au niveau de l'orbite géostationnaire*

Les niveaux maximaux de puissance surfacique produite par les systèmes scientifiques spatiaux sur un point de l'orbite des satellites géostationnaires, sont indiqués dans le Tableau 4. Ce niveau est maximal lorsque la station scientifique spatiale se trouve quasiment à l'antipode du point considéré sur l'orbite géostationnaire (c'est-à-dire lorsque le trajet du signal entre les satellites est tangent à la surface de la Terre) ou lorsque la distance entre les deux satellites est minimale. Si les différentes applications des services scientifiques spatiaux étaient mises en œuvre comme indiqué à la présente Annexe et à l'Annexe 1, les densités de puissance surfacique produite par ces systèmes au niveau de l'orbite géostationnaire seraient celles indiquées dans le Tableau 4.

TABLEAU 4

Niveaux maximaux de puissance surfacique produite au niveau de l'orbite géostationnaire par des stations spatiales des services scientifiques spatiaux

| Type d'émetteur de station spatiale | Densité de puissance maximale à l'entrée de l'antenne | Satellite en position quasiantipodale | | | | Espaceur minimal entre les satellites | | | |
|---|---|---|---|--------|--------|---|---|--------|--------|
| | | Gain d'antenne de l'engin spatial (dBi) | Puissance surfacique sur l'orbite géostationnaire (dB(W/m ²)) dans la largeur de bande de référence | | | Gain d'antenne de l'engin spatial (dBi) | Puissance surfacique sur l'orbite géostationnaire (dB(W/m ²)) dans la largeur de bande de référence | | |
| | | | Total | 1 MHz | 4 kHz | | Total | 1 MHz | 4 kHz |
| Altimètre | 17 dBW/320 MHz | 0 | -147,2 | -172,2 | -196,2 | 0 | -144,7 | -169,8 | -193,7 |
| Diffusiomètre à faisceau étroit | 19 dBW/180 Hz | 10 | -135,0 | -135,0 | -135,0 | 0 | -142,9 | -142,9 | -142,9 |
| Diffusiomètre à faisceau en éventail | 19 dBW/180 Hz | 28 | -117,0 | -117,0 | -117,0 | -14 | -156,9 | -156,9 | -156,9 |
| Radar de mesure des précipitations | 28 dBW/800 kHz | 0 | -135,8 | -135,8 | -158,8 | 0 | -134,0 | -134,0 | -157,0 |
| Satellite relais de données-engin spatial utilisateur | -5 dBW (Note 4) | 53 | -121,4 | -121,6 | 140,2 | 0 | -133,3 | -133,5 | -152,1 |

Note 1 – On suppose que l'altimètre est à une altitude de 800 km et qu'il rayonne une densité spectrale de puissance uniforme dans toute la largeur de bande d'émission.

Note 2 – On suppose que les diffusiomètres se trouvent à 800 km d'altitude et on utilise la puissance de crête.

Note 3 – On suppose que le radar de mesure des précipitations est à une altitude de 350 km et on utilise la puissance de crête.

Note 4 – On suppose que pour le cas de l'espaceur minimal, le satellite DRS (relais de données) se trouve à 1° du satellite du SFS. On ne tient pas compte de la réduction de puissance à l'entrée de l'antenne du satellite DRS due à l'action de la commande de puissance. Les niveaux de puissance surfacique spécifiés pour les satellites relais de données sont établis à partir de l'intégration de la densité de puissance dans une distribution spatiale de puissance en $\sin^2 x/x^2$ sur la largeur de bande de référence. On suppose dans le Tableau ci-dessus un débit de données de 300 kbit/s pour le satellite DRS sans étalement par un code de bruit pseudoaléatoire, ce qui correspondait au cas le plus défavorable pour les niveaux de puissance surfacique en considérant tous les débits de données possibles.