

RAPPORT UIT-R RS.2068

**Utilisation de la bande au voisinage de 13,5 GHz
par les capteurs actifs**

(2006)

TABLE DES MATIÈRES

	<i>Page</i>
1 Introduction et considérations générales	2
1.1 Introduction.....	2
1.2 Considérations générales	2
2 Diffusiomètres	2
2.1 Utilisation de la bande au voisinage de 13,5 GHz.....	2
2.2 Largeur de bande nécessaire	3
2.3 Possibilités d'utilisation d'autres bandes	3
2.4 Disponibilité à long terme pour l'exploitation des diffusiomètres au voisinage de 13,5 GHz	4
3 Altimètres	4
3.1 Utilisation de la bande au voisinage de 13,5 GHz par les altimètres.....	4
3.2 Largeur de bande nécessaire	5
3.3 Possibilités d'utilisation d'autres bandes	6
3.4 Nécessité pour les altimètres d'avoir accès en permanence à des fréquences au voisinage de 13,5 GHz.....	7
4 Radars de mesure des précipitations.....	7
4.1 Utilisation de la bande au voisinage de 13,5 GHz.....	7
4.2 Largeurs de bande nécessaires.....	7
4.3 Possibilité d'utilisation d'autres bandes.....	8
4.3.1 Plage de mesure dynamique.....	8
4.3.2 Champ d'observation instantanée (IFOV, <i>instantaneous field of view</i>).....	8
4.3.3 Rapport signal/fouillis (<i>S/C</i>)	9
4.3.4 Fréquences adaptées aux radars bibandes	9
4.4 Maintien des besoins de fréquence au voisinage de 13,5 GHz.....	9
5 Résumé et conclusions	10

1 Introduction et considérations générales

1.1 Introduction

Il s'agit dans le présent Rapport d'examiner les points suivants: la nécessité pour le service d'exploration de la Terre par satellite (SETS) (active) d'avoir accès en permanence aux fréquences voisines de 13,5 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 située au voisinage de 13,5 GHz. Cet examen sera effectué en tenant compte des besoins des trois principaux instruments utilisant cette bande, à savoir les diffusiomètres, les altimètres et les radars de mesure des précipitations.

1.2 Considérations générales

La Conférence mondiale des radiocommunications de 2003 (CMR-03) a apporté de nombreuses modifications aux attributions dans la bande 13,75-14 GHz. Avant la CMR-97, plusieurs bandes, parmi lesquelles figurait la bande 13,4-14 GHz étaient attribuées à titre secondaire aux services SETS et de recherche spatiale, en vue d'être utilisées par les stations de radiolocalisation (c'est-à-dire les capteurs actifs spatioportés) placées à bord d'un engin spatial. La CMR-97 a décidé d'attribuer la bande 13,25-13,75 GHz au service SETS (active) et au service de recherche spatiale (active) à titre primaire, par suite des différentes décisions prises par la Conférence en matière d'attributions aux capteurs actifs. Toutefois, la CMR-97 a également jugé nécessaire de maintenir la partie de la bande 13,75-14 GHz attribuée précédemment à titre secondaire, en vue de son utilisation par plusieurs instruments de télédétection active qui étaient à l'époque sur orbite ou qui étaient en projet et en cours de réalisation, car leurs caractéristiques ne pouvaient pas être modifiées. Ces dispositions ont été énoncées dans le Règlement des radiocommunications, avec comme dates d'expiration le 1er janvier 2000 et le 1er janvier 2001 pour plusieurs instruments de télédétection.

2 Diffusiomètres

2.1 Utilisation de la bande au voisinage de 13,5 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 de régimes météorologiques complexes, des courants marins et des systèmes climatiques dans le monde.

Deux diffusiomètres ont été mis au point aux Etats-Unis d'Amérique. Le premier, le diffusiomètre NSCAT (diffusiomètre de la NASA, *NASA scatterometer*) a été lancé en 1996 à bord du satellite japonais ADEOS (satellite perfectionné d'observation de la Terre, (ADEOS, *Advanced Earth Observing Satellite*)). Le second, le diffusiomètre SeaWinds, qui a été en 1999 à bord du satellite QuickScat de la NASA et en 2002 à bord du satellite japonais ADEOS-II, a été intégré au système d'observation de la Terre (EOS, *Earth Observing System*). Le diffusiomètre NSCAT a été conçu pour fonctionner à une fréquence centrale de 13,995 GHz. Le diffusiomètre SeaWinds est inspiré du diffusiomètre NSCAT et utilise bon nombre des mêmes composantes, mais sa fréquence centrale a été ramenée à 13,4 GHz.

2.2 Largeur de bande nécessaire

Les diffusiomètres actuels utilisent une impulsion à onde continue et à fréquence fixe au voisinage de 13,5 GHz 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 supérieure à 1 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 au voisinage de 13,5 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 au voisinage de 13,5 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 au voisinage de 13,5 GHz ont été examinées. Les deux bandes les plus proches de la bande des 13,5 GHz et actuellement attribuées au service d'exploration de la Terre par satellite (active), 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 au voisinage de 13,5 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 13,5 GHz, fréquence de fonctionnement du diffusiomètre Seasat et 5,3 GHz, fréquence de fonctionnement 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 six 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. Les diffusiomètres fonctionnant au voisinage de 13,5 GHz présentent une plus grande sensibilité aux vents faibles que ceux fonctionnant au voisinage de 5,3 GHz. Les vecteurs vent de faible vitesse sont importants pour l'étude de la variabilité des courants océaniques. Aux fréquences supérieures à 13,5 GHz, l'affaiblissement atmosphérique dû à la teneur en eau (par exemple, 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 au voisinage de 13,5 GHz. C'est à cette fréquence, en effet, qu'un volume important de données a été recueilli au cours des 15 à 20 dernières années. Le diffusiomètre Seasat tout comme le diffusiomètre de la NASA fonctionnaient à cette fréquence, de même que le NSCAT. La poursuite de l'utilisation de cette bande par les futurs diffusiomètres 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 13,5 GHz

Il est indispensable de pouvoir continuer à exploiter les diffusiomètres spatiaux dans la bande au voisinage de 13,5 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 au voisinage de 13,5 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 à 20 ans, qui puisse corroborer l'interprétation des données futures des diffusiomètres.

Le diffusiomètre NSCAT était conçu pour fonctionner à 13,995 GHz. La protection de l'exploitation du diffusiomètre NSCAT jusqu'à l'an 2000 a été assurée par une disposition réglementaire, qui a été supprimée par la CMR-03. Par ailleurs, le diffusiomètre SeaWinds n'était encore qu'au stade du développement lors de la CMR-97 et sa fréquence a été 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. Compte tenu des résultats de la CMR-03, on peut continuer d'exploiter les diffusiomètres dans la bande 13,75-14 GHz à titre secondaire, mais cette exploitation ne bénéficierait d'aucune protection contre les brouillages causés par les services ayant des attributions primaires dans cette bande.

3 Altimètres

3.1 Utilisation de la bande au voisinage de 13,5 GHz par les altimètres

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 s'intéressent à ces données de mesure provenant de n'importe quel système opérationnel.

Plusieurs altimètres radars spatiaux fonctionnent actuellement dans la bande au voisinage de 13,5 GHz qui leur a été attribuée (JASON, ERS et ENVISAT). 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.

Le choix de la bande au voisinage de 13,5 GHz, fait il y a longtemps, a été dicté par plusieurs considérations: attribution d'une bande aux radars embarqués à bord d'un engin spatial, 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, JASON, ERS-1, ERS-2 et ENVISAT). 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 au voisinage de 13,5 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 l'altimètre JASON est le seul qui utilisera plusieurs satellites et cela jusqu'à 2018.

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 (pour JASON) à 330 MHz (pour 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 JASON utilise la compression des impulsions (*chirp full de-ramp stretch*) pour obtenir une grande précision. Les 320 MHz de largeur de bande de l'altimètre JASON 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 au voisinage de 13,5 GHz est de moins de 3 cm.

L'UIT-R a fait plusieurs études 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 de 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 les missions envisagées actuellement.

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.

Compte tenu des résultats de la CMR-97, on dispose à présent d'une largeur de bande attribuée de 500 MHz puisque la limite inférieure de la bande attribuée aux capteurs actifs a été déplacée vers le bas et ramenée de 13,4 GHz à 13,25 GHz. On peut en conclure que cette bande pourrait satisfaire les besoins actuels et futurs des altimètres spatiaux au voisinage de 13,5 GHz.

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 au voisinage de 13,5 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 JASON dispose d'une fréquence secondaire (5,3 GHz) pour déterminer les effets ionosphériques. 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 minimum 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 Nécessité pour les altimètres d'avoir accès en permanence à des fréquences au voisinage de 13,5 GHz

La seule bande attribuée adaptée aux exigences des missions altimétriques est la bande au voisinage de 13,5 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. D'autres modèles pourront être exploités dans l'avenir étant donné que la limite inférieure de la bande attribuée actuellement au voisinage de 13,5 GHz a été ramenée de 13,4 GHz à 13,25 GHz.

4 Radars de mesure des précipitations

4.1 Utilisation de la bande au voisinage de 13,5 GHz

Plusieurs fréquences ont été attribuées aux radars spatiaux (par exemple, 10 GHz, 13,5 GHz, 17 GHz et 35 GHz) mais la bande des 13,5 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, *tropical rain measuring mission*). Le choix de la fréquence est essentiellement dicté par les considérations suivantes:

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

On peut en conclure qu'en utilisant des fréquences supérieures à 13,5 GHz, on ne peut satisfaire comme il se doit aux exigences du a) et que, à des fréquences inférieures à 13,5 GHz, il est difficile de satisfaire aux exigences du b) et du c).

Le radar TRMM, le seul radar spatial de ce type qui a vu le jour avant l'an 2000, a été mis au point par la NASDA au Japon. La mission Mesure mondiale des précipitations (GPM, *global precipitation measurement*) a par ailleurs été envisagée pour des études hydrologiques à l'échelle mondiale (GEWEX, *global energy and water cycle experiment*, par exemple). Pour cette mission, la bande des 13,5 GHz est vitale et le meilleur choix du point de vue du coût, du calendrier et de la continuité des données serait d'utiliser la même fréquence que celle du radar TRMM.

4.2 Largeurs de bande nécessaires

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 utilisait deux fréquences espacées de 6 MHz et chaque canal de fréquence avait 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

sera donc 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 des techniques de compression des impulsions pour obtenir une meilleure résolution, une grande sensibilité 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 devra être plusieurs fois celle d'un radar sans compression d'impulsions, mais bien inférieure à celle des altimètres spatiaux.
- *Largeur de bande RF*: 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 à 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.

4.3 Possibilité d'utilisation d'autres bandes

Il s'agit dans le présent paragraphe de rechercher les fréquences adaptées 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 pour les éventuelles missions de suivi.

4.3.1 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 dans l'ensemble de la couche des précipitations, qui est établie à partir d'une étude statistique des précipitations tropicales océaniques. La bande des 35 GHz est une bonne solution si la mission est axée sur la mesure des précipitations à des latitudes élevées, dans des zones de faibles neiges et précipitations, c'est-à-dire pour la mesure de taux de précipitation d'au moins 0,1 mm/h environ, mais cette fréquence est trop élevée pour obtenir une plage de mesure dynamique suffisante pour les pluies tropicales dans l'ensemble de la couche des précipitations en raison de l'affaiblissement dans cette couche à 35 GHz.

4.3.2 Champ d'observation instantané (IFOV, *instantaneous field of view*)

Pour obtenir un champ 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 ($\sim 0,6^\circ$), c'est-à-dire que la taille de l'antenne devrait être d'au moins 100λ ou plus. Dans le cas du radar de mesure des précipitations TRMM, l'antenne est d'environ $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}^2$ ($\sim -92 \lambda$). 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 imposerait une plus grande antenne et de ce fait, la fabrication de l'antenne et les interfaces avec l'engin spatial et la fusée seraient plus complexes. Il ressort d'une étude de faisabilité sur le radar de mesure des précipitations 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.

4.3.3 Rapport signal/fouillis (S/C)

Le rapport 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 de mesure des précipitations TRMM est fondée sur la pondération de Taylor avec $SL = -35$ 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 de mesure des précipitations pose des problèmes du point de vue du rapport S/C .

4.3.4 Fréquences adaptées aux radars bibandes

Dans le cas des radars bibandes, 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, 13,5 et 35 GHz et 13,5 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, avec 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 13,5 GHz resteront vitales pour les radars bibandes (ou multibandes) de demain, étant donné qu'un radar fonctionnant à 13,5 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 la résolution spatiale et du rapport S/C .

4.4 Maintien des besoins de fréquence au voisinage de 13,5 GHz

La bande des 13,5 GHz est essentielle pour les radars monobande (radars tels que les radars de mesure des précipitations TRMM) utilisés pour la mesure des précipitations tropicales dans le monde entier pour plusieurs raisons:

- du point de vue de la plage de mesure dynamique, une fréquence égale ou supérieure à 17 GHz est exposée à des affaiblissements trop importants pour extraire les taux de précipitations dans l'ensemble de la couche des précipitations pour les taux plus élevés;
- le passage d'une fréquence voisine de 13,5 GHz à une fréquence de 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 certaines missions futures.

L'importance des fréquences proches des 13,5 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 utilisait la bande au voisinage de 13,5 GHz, de nombreux algorithmes ont été élaborés pour cette fréquence et ne sont valables qu'au voisinage de 13,5 GHz. Le Jet Propulsion Laboratory de la NASA a mis au point un radar aéroporté et le Communications Research Laboratory (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 13,5 GHz restent disponibles pour les radars spatiaux actuels ou futurs de mesure des précipitations.

5 Résumé et conclusions

Plusieurs sujets ont été examinés dans le présent Rapport: l'utilisation de la bande au voisinage de 13,5 GHz, la largeur de bande nécessaire et les possibilités d'utilisation de bandes autres que celle au voisinage de 13,5 GHz pour répondre aux besoins des missions. Il a également été question dans ce Rapport de la nécessité pour les diffusiomètres, les altimètres et les radars de mesure des précipitations actuels et futurs de pouvoir avoir accès à long terme au spectre au voisinage de la bande 13,5 GHz, du point de vue de trois applications principales de détection active fonctionnant actuellement dans cette bande. Compte tenu de ces études préliminaires, on peut formuler les conclusions suivantes:

– *Diffusiomètres:*

- à la fin des années 90, les diffusiomètres fonctionnaient à une fréquence centrale de 13,995 GHz; les diffusiomètres actuels ont été modifiés pour fonctionner à 13,402 GHz;
- les diffusiomètres des générations actuelles ont besoin de largeurs de bande ne dépassant pas la bande au voisinage des 13,5 GHz;
- l'utilisation des bandes au-dessus et en dessous de la bande au voisinage de 13,5 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 qualifiés «espace» et compte tenu de l'optimalité de la bande de fréquences pour les phénomènes physiques observés;
- il a fallu jusqu'à l'an 2000 utiliser et protéger l'exploitation de la bande centrée sur 13,995 GHz attribuée aux diffusiomètres. Après cette date, on a mis en œuvre des diffusiomètres fonctionnant en dessous de 13,75 GHz.

– *Altimètres:*

- les altimètres de la première génération utilisaient 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 au voisinage de 13,5 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 était nécessaire jusqu'en 1997 pour TOPEX-POSEIDON et jusqu'en 2000 pour l'ERS. Les altimètres utilisés pour les missions JASON et ENVISAT ont été abaissés en fréquence, de sorte qu'ils n'ont pas besoin d'avoir accès à la bande 13,75-14 GHz; et
 - si la largeur de bande maximale requise est de 330 MHz, les altimètres de demain fonctionneront dans la bande 13,25-13,75 GHz. Si l'on identifie de nouvelles missions qui nécessitent des largeurs de bande plus importantes, elles pourront être réalisées dans une bande 13,25-13,75 GHz.
 - *Radars de mesure des précipitations:*
 - les radars de mesure des précipitations de la dernière génération ont été embarqués à bord du radar TRMM à 13,796 GHz et 13,802 GHz (agilité en fréquence bicanal) avec une largeur de bande de 0,6 MHz pour le récepteur et nécessitent une largeur de bande de 12 MHz (13,793-13,805 GHz);
 - 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 des générations futures;
 - l'utilisation des bandes au-dessus et en dessous de la bande au voisinage de 13,5 GHz qui sont attribuées aux détecteurs actifs spatioportés fonctionnant dans le SETS (active) n'est pas une solution acceptable compte tenu des contraintes liées à la plage dynamique de mesure (pour les précipitations tropicales), 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 13,5 GHz pour les radars spatiaux de mesure des précipitations actuels et futurs.
-