

RECOMMANDATION UIT-R SA.515-3

**BANDES DE FRÉQUENCES ET LARGEURS DE BANDE UTILISÉES
POUR LA TÉLÉDÉTECTION PASSIVE PAR SATELLITE**

(Question UIT-R 140/7)

(1978-1990-1994-1997)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que les données relatives à l'environnement terrestre revêtent une importance croissante;
- b) que les satellites d'exploration de la Terre et les satellites météorologiques utilisent la télédétection passive hyperfréquences dans certaines bandes de fréquences attribuées à cette fin dans le Règlement des radiocommunications;
- c) que certaines de ces bandes sont également attribuées à d'autres services de radiocommunication;
- d) qu'une protection contre les brouillages, sur certaines fréquences, est essentielle pour la télédétection passive et ses applications;
- e) que, pour les mesures de raies spectrales connues, certaines bandes, sur des fréquences spécifiques, ont une importance particulière;
- f) que, pour d'autres types de mesures de télédétection passive, on utilise un certain nombre de bandes de fréquences, dont les positions exactes dans le spectre n'ont pas une importance critique pour autant que les fréquences centrales soient plus ou moins uniformément réparties dans le spectre;
- g) que les fréquences et les largeurs de bandes préférées et essentielles doivent être indiquées;
- h) qu'il sera possible dans l'avenir de déterminer de nouvelles fréquences grâce auxquelles de nouveaux types de mesures pourront être effectués,

recommande

- 1** que, sur la base des Annexes 1 et 2, pour la télédétection passive appliquée au milieu terrestre, au milieu marin et à l'atmosphère, on utilise les bandes de fréquences et les largeurs de bande indiquées dans le Tableau 1;
- 2** que l'utilisation des fréquences indiquées dans le Tableau 1 soit encouragée pour la télédétection passive.

TABLEAU 1

Fréquence (GHz)	Largeur de bande nécessaire (MHz)	Mesures
Au voisinage de 1,4	100	Humidité du sol, salinité, température de la mer, indice de végétation
Au voisinage de 2,7	60	Salinité, humidité du sol
Au voisinage de 4	200	Température à la surface des océans
Au voisinage de 6	400	Température à la surface des océans
Au voisinage de 11	100	Pluie, neige, glace, état de la mer, vent marin
Au voisinage de 15	200	Vapeur d'eau, pluie
Au voisinage de 18	200	Pluie, état de la mer, glace sur les océans, vapeur d'eau
Au voisinage de 21	200	Vapeur d'eau, eau à l'état liquide
22,235	300	Vapeur d'eau, eau à l'état liquide
Au voisinage de 24	400	Vapeur d'eau, eau à l'état liquide
Au voisinage de 31	500	Glace sur les océans, vapeur d'eau, nappes de pétrole répandues, nuages, eau à l'état liquide

TABLEAU 1 (suite)

Fréquence (GHz)	Largeur de bande nécessaire (MHz)	Mesures
Au voisinage de 37	1 000	Pluie, neige, glace sur les océans, vapeur d'eau
50,2-50,4	200	Profil de température
52,6-59,0	6 400 ⁽¹⁾	Profil de température
60,3-61,3	1 000 ⁽¹⁾	Profil de température (atmosphère supérieure)
Au voisinage de 90	6 000	Nuages, nappes de pétrole répandues, glace, neige
100,49	2 000	Protoxyde d'azote
110,80	2 000	Ozone
115-122	7 000 ⁽¹⁾	Température, monoxyde de carbone
125,61	2 000	Protoxyde d'azote
150,74	2 000	Protoxyde d'azote
155,5-158,5	3 000	Paramètres relatifs à la Terre et aux nuages
164-168	4 000	Protoxyde d'azote, nuages, eau et glace, pluie, monoxyde de chlore
175-192	17 000 ⁽¹⁾	Vapeur d'eau, protoxyde d'azote, ozone
200,98	2 000	Oxyde nitreux
217-231	14 000	Nuages, humidité, protoxyde d'azote
230,54	2 000	Monoxyde de carbone
235,71	2 000	Ozone
237,15	2 000	Ozone
251,21	2 000	Protoxyde d'azote
276,33	2 000	Protoxyde d'azote
301,44	2 000	Protoxyde d'azote
325,10	2 000	Vapeur d'eau
345,80	2 000	Monoxyde de carbone
364,32	2 000	Ozone
380,20	2 000	Vapeur d'eau

⁽¹⁾ Cette largeur de bande est occupée par plusieurs canaux.

ANNEXE 1

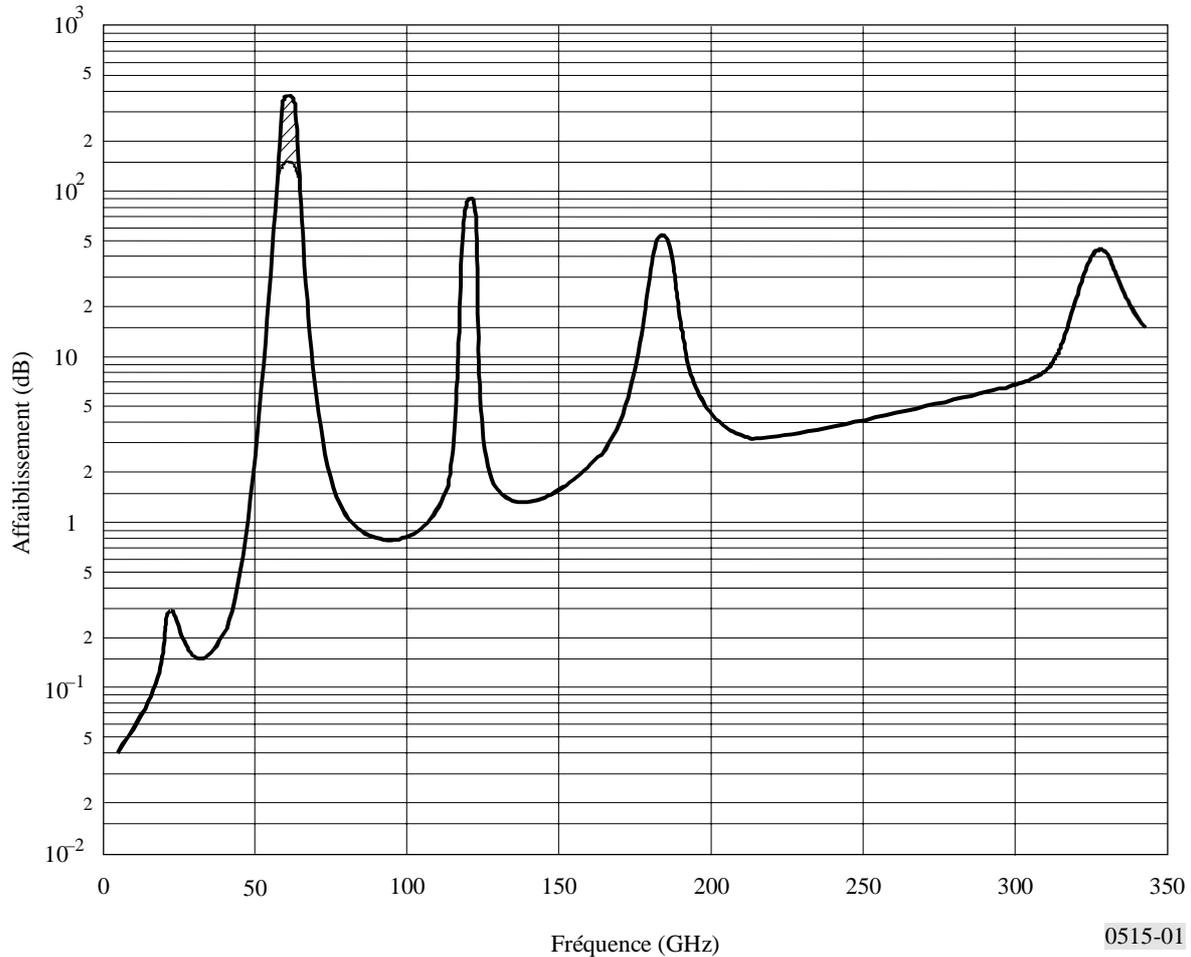
Choix des fréquences de télédétection passive par satellite

1 Introduction

La surface de la Terre et l'atmosphère rayonnent et absorbent de l'énergie hyperfréquences. La propagation dans l'atmosphère absorbante varie en fonction de la fréquence comme le montre la courbe de la Fig. 1. Cette courbe a été établie en reportant les valeurs calculées de l'affaiblissement sur un trajet zénithal Terre-satellite (angle d'élévation de 90°) pour les raies d'absorption de l'oxygène et de la vapeur d'eau. Ces calculs montrent que dans certaines bandes de fréquences, l'atmosphère est opaque et que dans d'autres, elle est presque transparente. Les régions presque transparentes, appelées fenêtres, permettent de détecter des phénomènes qui se déroulent au voisinage de la surface de la Terre; celles qui sont opaques permettent d'étudier les caractéristiques des couches hautes de l'atmosphère.

FIGURE 1

Variation de l'affaiblissement sur un trajet zénithal en fonction de la fréquence
(en janvier, à une latitude moyenne, avec une concentration en vapeur
d'eau de $7,5 \text{ g/m}^3$ à la surface du sol)



La température de brillance de la surface, la température de l'atmosphère en des points le long du trajet et les coefficients d'absorption sont déduits des mesures de la température T_A de l'antenne. Les températures de brillance de la surface et les coefficients d'absorption dépendent eux-mêmes des caractéristiques physiques de la surface ou de l'atmosphère étudiées. On ne peut pas, par simple observation sur une seule fréquence, mesurer une caractéristique physique. Il faut pour cela effectuer simultanément des observations sur plusieurs fréquences et combiner les résultats au moyen de modèles simulant les variations de la température de brillance de la surface et celles du coefficient d'absorption en fonction de la fréquence et des caractéristiques physiques.

Le choix des fréquences de travail des détecteurs passifs hyperfréquences s'effectue essentiellement en fonction du phénomène à étudier. Pour certaines applications, et notamment les mesures des rayonnements hyperfréquences des gaz atmosphériques, le choix des fréquences sera limité; il sera déterminé par les fréquences des raies spectrales de ces gaz. Dans d'autres cas, la gamme de fréquences utilisée pour l'étude de phénomènes sera plus étendue.

2 Mesures des caractéristiques atmosphériques

L'affaiblissement dû à l'atmosphère n'est pas localisé dans une seule couche atmosphérique de température constante. La valeur mesurée de la température d'antenne dépend principalement de la température atmosphérique régnant dans la région traversée lorsque l'affaiblissement total sur le trajet jusqu'au satellite est inférieur à 10 dB, tandis qu'elle dépend peu de la température atmosphérique dans les régions où l'affaiblissement est très petit ou lorsque l'affaiblissement total sur le trajet jusqu'au satellite est grand. On peut mesurer la température à différentes altitudes ou distances le long d'un trajet en choisissant des fréquences, en limite des régions opaques, qui donnent des valeurs d'affaiblissement différentes. On obtient ainsi différentes fonctions de pondération et différents coefficients multiplicateurs de la température atmosphérique $T(s)$ en un point donné.

Afin d'obtenir un ensemble suffisant de fonctions de pondération pour les mesures des profils de température atmosphérique, de teneur en vapeur d'eau, en ozone, en monoxyde de chlore et protoxyde d'azote et en monoxyde de

carbone, on peut choisir plusieurs fréquences. Pour les quatre dernières mesures moléculaires, aucune raie n'a une structure assez fine comme dans la bande de profil de température de O₂, une largeur suffisante comme dans la bande de vapeur d'eau (environ 22,235 GHz) pour que l'on puisse mesurer les profils sur une seule raie, compte tenu des contraintes imposées par le satellite en matière de temps d'intégration. Il faut donc, afin d'obtenir des informations sur le profil de ces constituants, réaliser des mesures sur plusieurs raies.

Les profils de température atmosphérique sont actuellement obtenus à partir des mesures faites par des sondes spatiales dans les régions infrarouge et hyperfréquences (absorption de l'oxygène autour de 60 GHz).

La capacité tout temps (capacité d'un détecteur spatial de «voir» à travers la plupart des nuages) est probablement la caractéristique la plus importante des techniques hyperfréquences, par rapport aux techniques infrarouges. Cette caractéristique est fondamentale pour les prévisions du temps et les applications relatives aux sciences de l'atmosphère, puisque plus de 60% de la surface de la Terre, en moyenne, est entièrement couverte de nuages et que seulement 5% des étendues de 20 × 20 km² (soit la résolution spatiale type des sondes infrarouges spatiales) sont complètement dégagées. Cette situation rend le fonctionnement des sondes infrarouges très difficile; celles-ci n'ayant que peu ou pas d'accès aux régions «météorologiquement» actives.

La vaste région opaque comprise entre 50 et 66 GHz comporte plusieurs raies d'absorption étroites (opaques); des observations peuvent être faites aux limites de cette région ou dans les espaces entre les raies. La première raie du spectre d'absorption de l'O₂ qui suit le spectre de raies situé autour de 60 GHz se trouve au voisinage de 118 GHz: elle offre moins de possibilités car elle est monochromatique et l'affaiblissement dû à l'humidité atmosphérique y est beaucoup plus grand.

La présence de nuages et de précipitations sur le trajet peut augmenter l'affaiblissement. Les nuages et les précipitations peuvent être détectés dans les fenêtres atmosphériques comprises entre 5 et 150 GHz. Pour distinguer l'effet des nuages de celui des précipitations et distinguer ces effets des rayonnements émis par la surface de la Terre, des observations multiples sur une large gamme de fréquences sont nécessaires.

3 Télédétection appliquée au milieu terrestre et au milieu marin

Les ondes rayonnées par la surface de la Terre traversent l'atmosphère avant d'atteindre le satellite. Si l'affaiblissement est trop grand, ces rayonnements ne peuvent être détectés. Pour mesurer les températures des couches basses de l'atmosphère, il faut que l'affaiblissement soit faible; dans ce cas, le détecteur reçoit à la fois les ondes thermiques émises par la surface de la Terre et celles émises par l'atmosphère. Pour distinguer ces deux rayonnements, il est nécessaire de faire des mesures complémentaires dans ces fenêtres. Le rayonnement de surface est proportionnel à la température et au pouvoir émissif du sol. Ces caractéristiques dépendent des propriétés diélectriques du sol et de sa rugosité. Si le pouvoir émissif est inférieur à l'unité, la surface émet et diffuse des rayonnements. Le rayonnement diffusé provient d'un rayonnement vers le bas de la couche atmosphérique située au-dessus du sol. Dans le cas d'une fenêtre où l'affaiblissement est très faible, le rayonnement diffusé est négligeable, sinon on doit en tenir compte pour la solution.

La température de brillance de la surface ne varie pas aussi rapidement en fonction de la fréquence que les rayonnements dans les raies d'absorption atmosphériques. Comme l'influence des caractéristiques de la surface varie assez lentement avec la fréquence, la détermination de ces caractéristiques nécessite plusieurs observations simultanées sur une large gamme de fréquences dans les fenêtres atmosphériques. La distinction entre les divers paramètres ne peut s'effectuer que si ces paramètres varient différemment en fonction de la fréquence. La température de brillance de la surface de l'océan dépend de sa salinité, de sa température et du vent. Le vent modifie la température de brillance par agitation de la surface de la mer et production d'écume dont les propriétés diélectriques diffèrent de celles de l'eau. Les mesures de salinité s'effectuent à des fréquences inférieures à 3 GHz, et si la précision l'exige, en dessous de 1,5 GHz. La mesure de température à la surface de la mer s'effectue entre 3 et 10 GHz, la fréquence optimale étant voisine de 5 GHz. Le vent affecte les observations à toutes les fréquences, mais les mesures les meilleures s'effectuent au-dessus de 15 GHz.

Une pellicule de glace ou une nappe d'hydrocarbure flottant à la surface de la mer ont des caractéristiques diélectriques différentes de celles de l'eau, ce qui permet de les détecter par différence de température de brillance. Aux fréquences supérieures à 30 GHz pour une nappe d'huile et entre 1 et 40 GHz pour un banc de glace, cette modification peut être supérieure à 50 K. Bien que les pellicules de glace et les nappes d'hydrocarbure puissent provoquer de fortes variations de la température de brillance, il faut procéder à des observations dans plusieurs fenêtres atmosphériques pour pouvoir distinguer leurs effets de ceux de la pluie et des nuages.

La nature du contenu en eau des couches de surface peut être étudiée par des mesures hyperfréquences. La température de brillance de la neige et celle du sol sont l'une et l'autre fonction du contenu en eau et de la fréquence. En général, l'épaisseur de la couche que l'on peut mesurer est d'autant plus grande que la fréquence est basse. Comme l'humidité à la surface dépend du profil d'humidité en dessous de cette surface, il peut être utile d'effectuer des observations à des

fréquences plus élevées. Les observations à 37 GHz et aux fréquences supérieures permettent une étude précise de la fusion de la neige au voisinage de la surface. Pour l'étude de l'humidité du sol, et en particulier du sol en dessous de la couverture végétale, les fréquences inférieures à 3 GHz sont les plus intéressantes. Dans la pratique, plusieurs fréquences sont nécessaires pour, d'une part classer les surfaces en fonction de leur rugosité, de leur couverture végétale ou de l'âge de la couche de glace marine, etc., et d'autre part, mesurer les paramètres comme l'épaisseur de la glace ou l'humidité.

ANNEXE 2

Facteurs liés à la détermination des largeurs de bandes requises

1 Sensibilité des récepteurs radiométriques

Un récepteur radiométrique est un appareil qui mesure les rayonnements thermiques reçus par son antenne et le bruit thermique qu'il produit. En intégrant le signal reçu, on peut réduire les fluctuations de bruit aléatoires et évaluer avec précision la somme des puissances du bruit thermique du récepteur et du bruit thermique des rayonnements extérieurs. En convertissant la puissance de bruit par unité de largeur de bande en une température de bruit équivalente, on peut exprimer comme suit l'incertitude de la mesure en fonction de la durée d'intégration:

$$\Delta T_e = \frac{\alpha (T_A + T_N)}{\sqrt{B\tau}}$$

où:

ΔT_e : incertitude (valeur quadratique moyenne) sur la mesure du bruit total du système, $T_A + T_N$

α : constante du système de réception

T_A : température de l'antenne

T_N : température de bruit du récepteur

B : largeur de bande

τ : durée d'intégration.

Aux longueurs d'onde supérieures à 3 cm, on peut obtenir une température de bruit de récepteur inférieure à 150 K avec des amplificateurs paramétriques à semi-conducteur. Aux longueurs d'onde inférieures à 3 cm, le type de récepteur le plus courant actuellement est le superhétérodyne avec une température de bruit comprise entre quelques centaines de degrés à 3 cm et environ 2 000 K à 3 mm. Les améliorations apportées aux transistors HEMT (high electronic mobility transistor) vont permettre d'utiliser des préamplificateurs à faible bruit, avec des températures de bruit du récepteur de 300 K environ à 5 mm.

Outre l'amélioration de la température de bruit du récepteur obtenue grâce à l'utilisation de préamplificateurs à faible bruit, on peut également obtenir une réduction importante de l'incertitude de ΔT_e (c'est-à-dire une sensibilité plus grande) dans les radiomètres des satellites en augmentant la largeur de bande du système et en introduisant des configurations d'appareils de mesure permettant d'optimiser le temps d'intégration. Selon la résolution spatiale souhaitée, les temps d'intégration des radiomètres de satellites en orbite basse sont limités à quelques secondes ou moins, à cause de la vitesse relative des satellites.

2 Paramètres techniques des détecteurs passifs

2.1 Cas des radiomètres à balayage longitudinal

Des études ont permis de spécifier la sensibilité, la résolution spatiale et la largeur de bande sans balayage des détecteurs. On trouvera dans le Tableau 2 un récapitulatif des résultats de ces études pour chacune des fréquences préférées ainsi que la largeur de la zone explorée par les radiomètres à balayage. Il convient de noter qu'une largeur de balayage de 185 km permet une couverture totale de la Terre en 18 jours avec une orbite normale, du service d'exploration de la Terre par satellite, du type de celle utilisée pour les satellites Landsat. Pour répondre aux exigences des spécialistes de l'environnement et des météorologues, la période d'actualisation des données doit être inférieure à 18 jours.

TABLEAU 2
**Considérations techniques pour les détecteurs passifs installés à bord d'engins spatiaux
(avec des radiomètres à balayage)**

Fréquence (GHz)	Application principale	ΔT_e nécessaire (K)	Résolution (km)	Température de bruit du système (K)	Largeur de bande sans balayage (MHz)	Largeur de bande proposée (MHz)	Largeur de balayage (km)
Au voisinage de 1,4	Humidité du sol, salinité, température de la mer, indice de végétation	0,1	20	450	42	100	48
Au voisinage de 2,7	Salinité, humidité du sol	0,1	2	450	60	60	2
Au voisinage de 4	Température de la surface de la mer	0,3	2	450	45	200	9
Au voisinage de 6	Température de la surface de la mer	0,3	20	450	5	400	1 600
Au voisinage de 11	Pluie ⁽¹⁾ , neige, glace, vent	1,0	1	1 000	60	100	2
Au voisinage de 15	Vapeur d'eau, pluie	0,2	2	1 000	180	200	2
Au voisinage de 18	Pluie ⁽¹⁾ , neige, glace, vent, vapeur d'eau	1,0	2	1 000	180	200	2
Au voisinage de 21	Vapeur d'eau, eau à l'état liquide	0,2	2	1 000	180	200	2
22,235	Vapeur d'eau, eau à l'état liquide	0,4	2	1 000	45	300	13
Au voisinage de 24	Vapeur d'eau, eau à l'état liquide	0,2	2	1 000	180	400	4
Au voisinage de 31	Glace, nappes de pétrole répandues, nuages	0,2	2	1 000	180	500	6
Au voisinage de 37	Pluie, neige, glace, vapeur d'eau	1,0	1	2 300	230	1 000	4
50,2-61,3	Profil de température atmosphérique	0,3	10	2 300	235	Multiple ⁽²⁾	10
Au voisinage de 90	Nuages, nappes de pétrole répandues, glace, neige	1,0	1	2 300	230	6 000	26
Supérieure à 100	Protoxyde d'azote O ₃ , CO, H ₂ O, ClO, température	0,2	1	4 300	1 850	2 000	1

(1) Paramètres fournis pour cette application.

(2) Plusieurs bandes comprises entre 50,2 et 61,3 GHz.

2.2 Cas des radiomètres en peigne

On peut obtenir une meilleure largeur de la zone explorée ainsi qu'une réduction de la largeur de bande en utilisant des radiomètres en peigne. On peut également réduire des valeurs de l'incertitude ΔT_e car un temps d'intégration supérieur par observation est possible. Pour la gamme de fréquences comprises entre 50 et 66 GHz, les considérations techniques sont indiquées au Tableau 3.

TABLEAU 3

**Considérations techniques pour les détecteurs passifs installés à bord d'engins spatiaux
(avec des radiomètres en peigne)**

Fréquence (GHz)	Application principale	ΔT_e nécessaire (K)	Résolution (km)	Température de bruit du système (K)	Largeur de bande proposée (MHz)	Largeur de balayage (km)
50,2-61,3	Profil de température atmosphérique	0,1	10	550	20 ⁽¹⁾	2 000

⁽¹⁾ Plusieurs bandes de 20 MHz.