

Recommandation UIT-R RS.515-6

(06/2026)

Série RS: Systèmes de télédétection

Bandes de fréquences et largeurs de bande utilisées pour la télédétection passive par satellite

Avant-propos

Le rôle du Secteur des radiocommunications est d'assurer l'utilisation rationnelle, équitable, efficace et économique du spectre radioélectrique par tous les services de radiocommunication, y compris les services par satellite, et de procéder à des études pour toutes les gammes de fréquences, à partir desquelles les Recommandations seront élaborées et adoptées.

Les fonctions réglementaires et politiques du Secteur des radiocommunications sont remplies par les Conférences mondiales et régionales des radiocommunications et par les Assemblées des radiocommunications assistées par les Commissions d'études.

Droits de propriété intellectuelle

L'UIT attire l'attention sur la possibilité que l'application ou la mise en œuvre de la présente Recommandation puisse donner lieu à l'utilisation d'un droit de propriété intellectuelle. L'UIT ne prend pas position en ce qui concerne l'existence, la validité ou l'applicabilité des droits de propriété intellectuelle, qu'ils soient revendiqués par un membre de l'UIT ou par une tierce partie étrangère à la procédure d'élaboration des Recommandations.

À la date d'approbation de la présente Recommandation, l'UIT avait été avisée de l'existence d'une propriété intellectuelle, protégée par des brevets, dont l'acquisition pourrait être requise pour mettre en œuvre la présente Recommandation. Toutefois, comme il ne s'agit peut-être pas de renseignements les plus récents, il est vivement recommandé aux développeurs de consulter les renseignements pertinents de l'UIT-R concernant les brevets à l'adresse <https://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/Pages/itu-r-patent-information.aspx>.

Séries des Recommandations UIT-R

(Également disponible en ligne: <https://www.itu.int/publ/R-REC/fr>)

Séries	Titre
BO	Diffusion par satellite
BR	Enregistrement pour la production, l'archivage et la diffusion; films pour la télévision
BS	Service de radiodiffusion sonore
BT	Service de radiodiffusion télévisuelle
F	Service fixe
M	Services mobile, de radiorepérage et d'amateur y compris les services par satellite associés
P	Propagation des ondes radioélectriques
RA	Radio astronomie
RS	Systèmes de télédétection
S	Service fixe par satellite
SA	Applications spatiales et météorologie
SF	Partage des fréquences et coordination entre les systèmes du service fixe par satellite et du service fixe
SM	Gestion du spectre
SNG	Reportage d'actualités par satellite
TF	Émissions de fréquences étalon et de signaux horaires
V	Vocabulaire et sujets associés

Note: Cette Recommandation UIT-R a été approuvée en anglais aux termes de la procédure détaillée dans la Résolution UIT-R 1.

Publication électronique
Genève, 2026

© UIT 2026

Tous droits réservés. Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite, par quelque procédé que ce soit, sans l'accord écrit préalable de l'UIT.

RECOMMANDATION UIT-R RS.515-6

**Bandes de fréquences et largeurs de bande utilisées
pour la télédétection passive par satellite**

(1978-1990-1994-1997-2003-2012-2026)

Domaine d'application

La présente Recommandation donne des renseignements sur les bandes de fréquences et les largeurs de bande utilisées aux fins de la télédétection passive par satellite de la Terre et de son atmosphère au moyen de capteurs passifs à hyperfréquences.

Mots clés

Service d'exploration de la Terre par satellite (passive), mesures, raies spectrales, largeur de bande requise

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 des télédéTECTEURS passifs hyperfréquences dans certaines bandes de fréquences attribuées à cette fin dans le Règlement des radiocommunications (RR);
- 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) qu'en raison des progrès techniques et scientifiques constants réalisés dans les bandes comprises entre 275 GHz et 3 000 GHz, il faut périodiquement réexaminer les conditions requises pour la télédéTECTION passive;
- h) qu'il est possible de déterminer trois catégories principales de capteurs passifs pour l'utilisation des bandes comprises entre 275 GHz et 3 000 GHz, à savoir:
 - 1) les sondeurs atmosphériques verticaux à trois dimensions nécessitant des données extrêmement fiables et une résolution moyenne sur plusieurs canaux;
 - 2) les radiomètres imageurs nécessitant des données extrêmement fiables, une résolution moyenne et une intégration sur des canaux uniques avec une largeur de bande relativement importante;
 - 3) les limboSONDEURS atmosphériques nécessitant des données de fiabilité moyenne et une très haute résolution sur de nombreux canaux à faible largeur de bande;

i) que les prescriptions en matière de qualité de fonctionnement doivent être fondées sur des besoins scientifiques connus pour les mesures, et que, en conséquence, il faut que les niveaux de résolution et de disponibilité des données soient significatifs sur le plan scientifique compte tenu des applications pour lesquelles celles-ci sont utilisées (prévisions, observations de la surface et surveillance du climat, par exemple),

notant

a) que, en raison du grand nombre de raies spectrales présentant de l'intérêt pour les observations de la Terre dans la gamme 1 000-3 000 GHz, il serait difficile en pratique de définir des bandes individuelles convenant pour la télédétection passive dans cette gamme de fréquences;

b) que, dans la gamme 1 000-3 000 GHz, l'atmosphère est si opaque pour toute émission que seules les observations par limbosondeur depuis la couche supérieure de l'atmosphère sont réalisables dans la pratique;

c) que, en raison de l'opacité de l'atmosphère dans la gamme 1 000-3 000 GHz, il est possible de garantir pour l'essentiel une protection appropriée des opérations de télédétection passive et d'assurer un partage des fréquences avec tout service de radiocommunication de Terre,

recommande

d'utiliser pour la télédétection passive par satellite appliquée au milieu terrestre, au milieu marin et à l'atmosphère, compte tenu des Annexes 1 et 2, les bandes de fréquences et les largeurs de bande associées indiquées dans le Tableau 1 pour les bandes inférieures à 275 GHz et dans le Tableau 2 pour les bandes comprises entre 275 et 1 000 GHz.

TABLEAU 1

**Bandes de fréquences pour la télédétection passive
par satellite au-dessous de 275 GHz**

Bande(s) de fréquences (GHz)	Largeur de bande totale nécessaire (MHz)	Raie(s) spectrale(s) ou fréquence centrale (GHz)	Mesure (météorologie climatologie, chimie (voir le Tableau 3))	Mode de balayage type N, L, C ⁽¹⁾
1,37-1,427	57	1,4	Humidité du sol, salinité de l'océan, température de la surface de la mer, indice de végétation	N, C
2,64-2,7	60	2,67	Salinité de l'océan, humidité du sol, indice de végétation	N
4,2-4,4	200	4,3	Température de la surface de la mer	N, C
4,95-4,99	40	4,97	Température de la surface de la mer	N, C
6,425-7,25	400 ⁽²⁾	6,85	Température de la surface de la mer	N, C
10,6-10,7	100	10,65	Taux de pluie, teneur en eau de fonte des neiges, morphologie glaciaire, état de la mer, vitesse du vent océanique	N, C
15,2-15,4	200	15,3	Vapeur d'eau, taux de pluie	N, C
18,6-18,8	200	18,7	Taux de pluie, état de la mer, glace sur la mer, vapeur d'eau, vitesse du vent océanique, pouvoir émissif et humidité du sol	N, C

TABLEAU 1 (*suite*)

Bande(s) de fréquences (GHz)	Largeur de bande totale nécessaire (MHz)	Raie(s) spectrale(s) ou fréquence centrale (GHz)	Mesure (météorologie climatologie, chimie (voir le Tableau 3))	Mode de balayage type N, L, C ⁽¹⁾
21,2-21,4	200	21,3	Vapeur d'eau, eau à l'état liquide	N
22,21-22,5	290	22,235	Vapeur d'eau, eau à l'état liquide	N, C
23,6-24	400	23,8	Vapeur d'eau, eau à l'état liquide, canal associé pour le sondage atmosphérique	N, C
31,3-31,8	500	31,4	Glace sur la mer, vapeur d'eau, nappes de pétrole répandu, nuages, eau à l'état liquide, température de surface, fenêtre de référence pour la gamme 50-60 GHz	N, C
36-37	1 000	36,5	Taux de pluie, neige, glace sur la mer, nuages	N, C
50,2-50,4	200	50,3	Fenêtre de référence pour le profil de température atmosphérique (température de surface)	N, C
52,6-59,3	6 700 ⁽²⁾	Plusieurs entre 52,6-59,3	Profil de température atmosphérique (raies d'absorption O ₂)	
86-92	6 000	89	Nuages, nappes de pétrole répandu, glace, neige, pluie, fenêtre de référence pour sondages de température au voisinage de 118 GHz	N, C
100-102	2 000	100,49	N ₂ O, NO	L
109,5-111,8	2 300	110,8	O ₃	L
114,25-122,25	8 000	118,75	CO, profil de température atmosphérique (ligne d'absorption O ₂)	N, C, L
148,5-151,5	3 000	150,74	N ₂ O, température de surface de la terre, paramètres nuageux, fenêtre de référence pour sondages de température	N, L
164-167	3 000	164,38; 167,2	N ₂ O, teneur en eau et glace des nuages, pluie, CO, ClO	N, C, L
174,8-191,8	17 000	175,86; 177,26; 183,31; 184,75	N ₂ O, profil de vapeur d'eau, O ₃	N, C, L
200-209	9 000	200,98; 203,4; 204,35; 206,13; 208,64	N ₂ O, ClO, vapeur d'eau, O ₃	L
226-231,5	5 500	226,09; 230,54; 231,28	Nuages, humidité, N ₂ O (226,09 GHz), CO (230,54 GHz), O ₃ (231,28 GHz), fenêtre de référence	N, L
235-238	3 000	235,71; 237,15	O ₃	L
239,2-242,2	3 000	240,7	Particules de nuage de glace	C
244,2-247,2	3 000	245,7	Particules de nuage de glace	C

TABLEAU 1 (*fin*)

Bande(s) de fréquences (GHz)	Largeur de bande totale nécessaire (MHz)	Raie(s) spectrale(s) ou fréquence centrale (GHz)	Mesure (météorologie climatologie, chimie (voir le Tableau 3))	Mode de balayage type N, L, C ⁽¹⁾
250-252	2 000	251,21	N ₂ O	L

⁽¹⁾ N: Nadir; les modes de balayage au Nadir sont axés sur un sondage ou une observation de la surface de la Terre à plusieurs angles d'incidence, y compris l'incidence normale. L: Limb; les modes de balayage au Limbe examinent l'atmosphère par la tranche et se terminent dans l'espace et non à la surface de la Terre. Elles sont donc pondérées zéro à la surface et au maximum à la hauteur du point tangent. C: Conique, les modes de balayage «Conique» consistent à observer la surface de la Terre en faisant tourner l'antenne à un angle de décalage par rapport à la direction du nadir. Le balayage se termine à la surface de la Terre ou à divers niveaux de l'atmosphère selon les fonctions de pondération du canal.

⁽²⁾ Cette largeur de bande correspond à la largeur de bande requise du capteur dans la gamme de fréquences indiquée dans la Colonne 1.

TABLEAU 2

Bandes de fréquences pour la télédétection passive par satellite entre 275 et 1 000 GHz

Bande(s) de fréquences (GHz)	Largeur de bande totale nécessaire (MHz)	Raie(s) spectrale(s) (GHz) (voir Tableau 3)	Mesure			Mode de balayage type N, C, L ⁽¹⁾
			Météorologie-climatologie	Fenêtre (GHz)	Chimie	
275-286	11 000	276,33 (N ₂ O), 278,6 (ClO)		276,4-285,4	N ₂ O, ClO	L
296-306	10 000	Fenêtre pour 325,1, 298,5, (HNO ₃), 300,22 (HOCl), 301,44 (N ₂ O), 303,57 (O ₃), 304,5 (O ¹⁷ O), 305,2 (HNO ₃)	Canal latéral pour les sondages de température	296-306	OXYGEN, HNO ₃ , HOCl, N ₂ O, O ₃ , O ¹⁷ O,	N, L
313-356	43 000	313,8 (HDO), {315,8, 346,9, 344,5, 352,9} (ClO), {318,8, 345,8, 344,5} (HNO ₃), {321,15, 325,15} (H ₂ O), {321, 345,5, 352,3, 352,6, 352,8} (O ₃), {322,8, 343,4} (HOCl), {345,0, 345,4} (CH ₃ Cl), 345,0 (O ¹⁸ O), 345,8 (CO), 346 (BrO), 349,4 (CH ₃ CN), 351,67 (N ₂ O), 354,5 (HCN)	Profil de vapeur d'eau, nuage Canal latéral pour les sondages de température	339,5-348,5	HDO, ClO, HNO ₃ , H ₂ O, O ₃ , HOCl, CH ₃ Cl, O ¹⁸ O, CO, BrO, CH ₃ CN, N ₂ O, HCN	N, C, L

TABLEAU 2 (suite)

Bande(s) de fréquences (GHz)	Largeur de bande totale nécessaire (MHz)	Raie(s) spectrale(s) (GHz) (voir Tableau 3)	Mesure			Mode de balayage type N, C, L ⁽¹⁾
			Météorologie-climatologie	Fenêtre (GHz)	Chimie	
361-365	4 000	364,32 (O ₃)	Canal latéral pour profil de vapeur d'eau		O ₃	N, L
369-392	23 000	380,2 (H ₂ O)	Profil de vapeur d'eau		H ₂ O	N, L
397-399	2 000		Profil de vapeur d'eau			N, L
409-411	2 000		Sondage de température			L
416-434	18 000	424,7 (O ₂)	Oxygène, profil de température		O ₂	N, L
439-467	28 000	442 (HNO ₃), {443,1, 448} (H ₂ O), 443,2 (O ₃), 452,09 (N ₂ O), 461,04 (CO)	Profil de vapeur d'eau, nuage	458,5-466,3	HNO ₃ , H ₂ O, O ₃ , N ₂ O, CO	N, L, C
497-502	5 000	{497,6, 497,9} (BrO), 497,9 (N ₂ ¹⁸ O), 498,6 (O ₃)	Canal latéral pour profil de vapeur d'eau	498-502	BrO, N ₂ ¹⁸ O, O ₃	L, N
523-527	4 000	Fenêtre pour 556,9	Canal latéral pour profil de vapeur d'eau	523-527		N
538-581	43 000	{541,26, 542,35, 550,90, 556,98} (HNO ₃), {544,99, 566,29, 571,0} (O ₃), 556,93 (H ₂ O), 575,4 (ClO)	Profil de vapeur d'eau	538-542	HNO ₃ , O ₃ , H ₂ O, ClO	N, L
611-630	19 000	620,7 (H ₂ O), 624,27 (ClO ₂), {624,34, 624,89, 625,84, 626,17} (SO ₂), {624,48, 624,78} (HNO ₃), 624,77 (⁸¹ BrO), 624,8 (CH ₃ CN), 624,98 (H ³⁷ Cl), 625,04 (H ₂ O ₂), {625,07, 628,46} (HOCl), 625,37 (O ₃), 625,66 (HO ₂), 625,92 (H ³⁵ Cl), 627,18 (CH ₃ Cl), 627,77 (O ¹⁸ O)	Profil de vapeur d'eau, oxygène		OXYGEN, H ₂ O, ClO ₂ , SO ₂ , HNO ₃ , BrO, CH ₃ CN, (H ³⁷ Cl), H ₂ O ₂ , HOCl, O ₃ , HO ₂ , H ³⁵ Cl, CH ₃ Cl, O ¹⁸ O	L

TABLEAU 2 (*fin*)

Bande(s) de fréquences (GHz)	Largeur de bande totale nécessaire (MHz)	Raie(s) spectrale(s) (GHz) (voir Tableau 3)	Mesure			Mode de balayage type N, C, L ⁽¹⁾
			Météorologie-climatologie	Fenêtre (GHz)	Chimie	
634-654	20 000	635,87 (HOCl), 647,1 (H ₂ ¹⁸ O), 649,24 (SO ₂), 649,45 (ClO), 649,7 (HO ₂), 650,18 (⁸¹ BrO), 650,28 (HNO ₃), 650,73 (O ₃), 651,77 (NO), 652,83 (N ₂ O)	Canal latéral pour profil de vapeur d'eau	634,8-651	HOCl, H ₂ ¹⁸ O, SO ₂ , ClO, HO ₂ , BrO, HNO ₃ , O ₃ , NO, N ₂ O	L, N
657-692	35 000	658 (H ₂ O), 660,49 (HO ₂), 687,7 (ClO), 688,5 (CH ₃ Cl), 691,47 (CO)	Profil de vapeur d'eau, nuage	676,5-689,5	H ₂ O, HO ₂ , ClO, CH ₃ Cl, CO	L, N, C
713-718	5 000	715,4 (O ₂)	Oxygène		O ₂	L
729-733	4 000	731 (HNO ₃), 731,18 (O ¹⁸ O)	Oxygène		HNO ₃ , O ¹⁸ O	L
750-754	4 000	752 (H ₂ O)	Eau		H ₂ O	L
771-776	5 000	773,8 (O ₂)	Oxygène		O ₂	L
823-846	23 000	834,15 (O ₂)	Oxygène		O ₂	N, C, L
850-854	4 000	852 (NO)			NO	L
857-862	5 000	859,9 (H ₂ O)	Eau		H ₂ O	L
866-882	16 000		Nuage, fenêtre			N, C
905-928	23 000	916,17 (H ₂ O)	Eau		H ₂ O	N, L
951-956	5 000	952 (NO), 955 (O ¹⁸ O)	Oxygène		NO, O ¹⁸ O	L
968-973	5 000	970,3 (H ₂ O)	Eau		H ₂ O	L
985-990	5 000	987,9 (H ₂ O)	Eau		H ₂ O	L

⁽¹⁾ N: Nadir; les modes de balayage au Nadir sont axés sur un sondage ou une observation de la surface de la Terre à plusieurs angles d'incidence, y compris l'incidence normale. L: Limb; les modes de balayage au Limbe examinent l'atmosphère par la tranche et se terminent dans l'espace et non à la surface de la Terre. Elles sont donc pondérées zéro à la surface et au maximum à la hauteur du point tangent. C: Conique; les modes de balayage «Conique» consistent à observer la surface de la Terre en faisant tourner l'antenne à un angle de décalage par rapport à la direction du nadir. Le balayage se termine à la surface de la Terre ou à divers niveaux de l'atmosphère selon les fonctions de pondération du canal.

TABLEAU 3
Principales molécules pour la télédétection passive
au-dessous de 1 000 GHz

Molécule	Nom chimique	Molécule	Nom chimique	Molécule	Nom chimique
BrO	Oxyde de brome	CH ₃ Cl	Chlorure de méthyle	CH ₃ CN	Acétonitrile
ClO	Monoxyde de chlore	ClO ₂	Dioxyde de chlore	CO	Monoxyde de carbone
H ³⁵ Cl	Chlorure d'hydrogène	HCN	Cyanure d'hydrogène	HDO	Protoxyde de deutérium
HNO ₃	Acide nitrique	H ₂ O	Eau	H ₂ ¹⁸ O	Eau riche en oxygène
HO ₂	Hydropéroxyde	H ₂ O ₂	Péroxyde d'hydrogène	HOCl	Acide hypochloreux
NO	Oxyde nitreux	N ₂ O	Oxyde nitreux	O ₃	Ozone
O ₂	Oxygène moléculaire				

Annexe 1

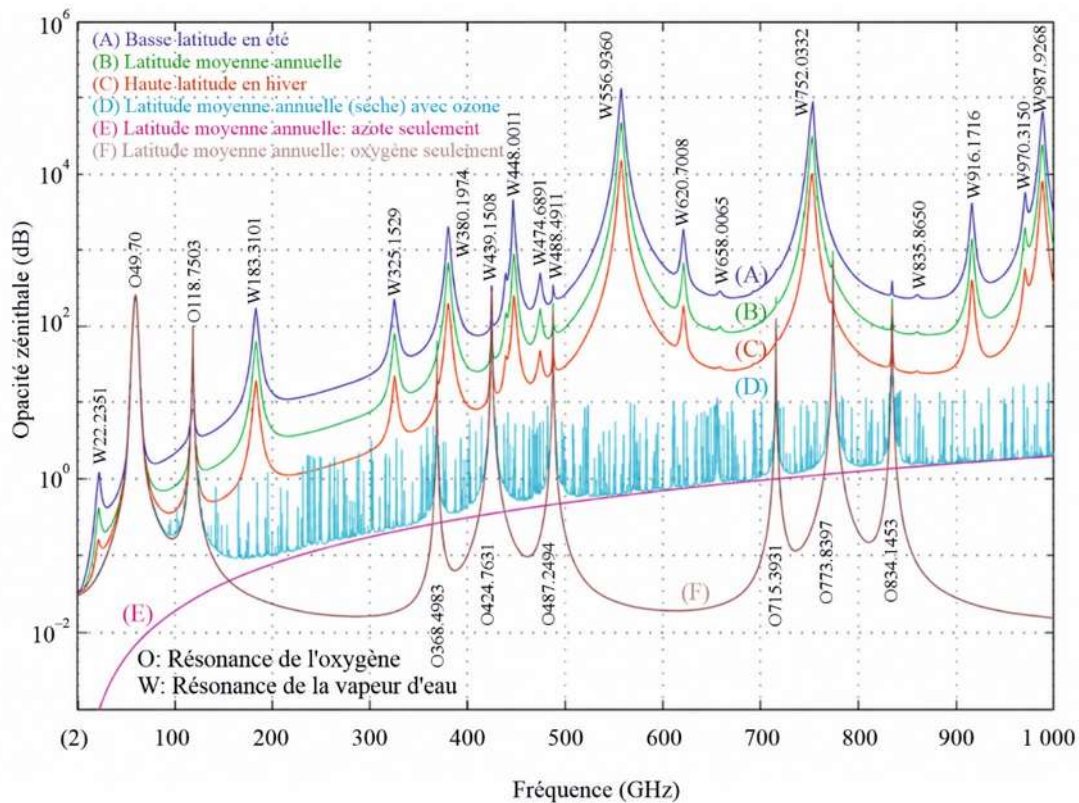
Choix des fréquences de télédétection passive par satellite

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 Fig. 1. Celle-ci illustre les valeurs calculées de l'affaiblissement sur un trajet zénithal unidirectionnel (angle d'élévation de 90°) pour les raies d'absorption de l'oxygène, de la vapeur d'eau et de constituants mineurs. Ces calculs portent sur un trajet entre la surface au niveau de la mer et un satellite. Ils montrent que, dans certaines bandes de fréquences, l'atmosphère est opaque et que, dans d'autres, elle est presque transparente. Dans le cas du sondage au nadir, par exemple, 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 de l'atmosphère.

FIGURE 1

Affaiblissement sur un trajet zénithal en fonction de la fréquence, 1-1 000 GHz



RS.0515-01

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 O_2 , 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 et de 183 GHz).

La capacité tout temps (capacité d'un détecteur spatial de voir à travers la plupart des nuages) est 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 $20 \times 20 \text{ km}^2$ (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. Le spectre d'absorption de l' O_2 au voisinage de 118 GHz offre moins de possibilités en raison de sa structure particulière (elle est monochromatique par rapport à la riche structure à plusieurs raies autour de 60 GHz) 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.

On peut utiliser la géométrie de sondage au limbe, l'atmosphère étant observée tangentiellement, à partir d'un satellite ou d'un instrument aéroporté pour détecter les profils de concentration d'espèces à l'état de traces qui sont utiles pour l'étude de la chimie atmosphérique. Le sondage au limbe est plus sensible que le sondage au nadir et permet une résolution verticale plus élevée. Les fréquences submillimétriques d'environ 500 GHz et plus permettent de poursuivre le sondage jusqu'aux couches inférieures de la stratosphère. Les fréquences millimétriques, notamment celles comprises entre 180 et 360 GHz, permettent de sonder à des altitudes inférieures, c'est-à-dire pour atteindre les couches supérieures de la troposphère.

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. Le pouvoir émissif de la surface étant toujours inférieur à l'unité (seul un corps noir parfait a un pouvoir émissif de 1 et aucune surface physique n'est un corps noir parfait), 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 plusieurs observations dans chacune des 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 bande 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, l'effet idéal de l'intégration sur la réduction de l'incertitude de mesure peut être exprimé comme suit:

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

où:

- ΔT_e : résolution radiométrique (incertitude (valeur quadratique moyenne) sur la mesure du bruit total du système, $T_A + T_N$)
- α : constante du système de réception, ≥ 1 , selon la conception du système
- T_A : température de l'antenne
- T_N : température de bruit du récepteur
- B : résolution spectrale du spectroradiomètre ou largeur de bande d'un seul canal radiométrique
- τ : durée d'intégration.

La constante α du système de réception est fonction du type de système de détection. Dans le cas des radiomètres à puissance totale utilisés par les détecteurs du service d'exploration de la Terre par satellite, cette constante ne peut pas être inférieure à l'unité. Dans la pratique, la plupart des radiomètres à puissance totale modernes approchent l'unité.

L'incertitude indiquée ci-dessus ne s'applique qu'à un radiomètre idéal où le bruit est purement aléatoire. Dans la réalité, un instrument présentera des effets (par exemple, instabilité de gain, bruit «rose», bruit 1/f, fluctuations thermiques, non-linéarité, pour n'en citer que quelques-uns) qui augmenteront la valeur théorique de ΔT_e . Ces effets sont minimisés par un choix approprié d'éléments de conception et d'exploitation et sont caractérisés pendant les essais au sol, mais ils sont rarement éliminés complètement. La valeur de ΔT_e calculée à partir de l'équation ci-dessus est donc une limite inférieure de l'incertitude des mesures.

En 2025, les amplificateurs à semi-conducteurs de pointe offriront des unités avec une température de bruit de 150 K (ou mieux) sur toute la gamme spectrale des hyperfréquences, ce qui fait de l'architecture d'amplification et de détection RF directe la solution privilégiée en raison de sa simplicité, de sa faible consommation d'énergie et de ses faibles besoins en termes de masse. Au-dessus d'environ 250 GHz, la température de bruit des amplificateurs utilisés comme unités frontales est encore suffisamment élevée pour que la configuration hétérodyne plus traditionnelle reste une alternative viable.

Les progrès technologiques devraient faire de l'amplificateur frontal à faible bruit l'architecture de référence pour tous les radiomètres jusqu'à 1 000 GHz d'ici à 2030.

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 Caractéristiques des détecteurs passifs

Le détecteur généralement utilisé pour mesurer diverses caractéristiques atmosphériques et de surface est le détecteur à balayage. Les détecteurs à balayage permettent une plus grande largeur de couverture pour une largeur de bande réduite. Ils autorisent aussi des valeurs plus faibles de ΔT_e compte tenu de la possibilité d'allonger le temps d'intégration par observation.

Les besoins de largeur de bande d'un détecteur passif mesurant des traces de gaz dans l'atmosphère sont déterminés par la largeur des raies des gaz observés et par la possibilité d'observer dans la même fenêtre un certain nombre de raies de gaz identique ou différent.

La largeur des raies d'émission des gaz atmosphériques dépend principalement de la pression. Cette corrélation impose des besoins minima de largeur de bande et de résolution. Au niveau du sol, les largeurs de raie sont de l'ordre de quelques gigahertz, dans la stratosphère, elles sont limitées à quelques mégahertz. En raison de ces grandes largeurs aux basses altitudes, les sondeurs au limbe à ondes millimétriques (au-dessus de 100 GHz) mesurant les couches supérieures de l'atmosphère nécessitent de très grandes largeurs de bande, de l'ordre de 10 GHz.

Des études ont été faites pour déterminer les besoins de sensibilité, de résolution spatiale, de temps d'intégration et de résolution spectrale des détecteurs. On trouvera les résultats correspondants dans la Recommandation UIT-R RS.2017.
