

Union internationale des télécommunications

UIT-R

Secteur des Radiocommunications de l'UIT

Recommandation UIT-R RA.1860
(01/2010)

**Bandes de fréquences préférées
pour les mesures de radioastronomie
entre 1 et 3 THz**

Série RA
Radio astronomie



Union
internationale des
télécommunications

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.

Politique en matière de droits de propriété intellectuelle (IPR)

La politique de l'UIT-R en matière de droits de propriété intellectuelle est décrite dans la «Politique commune de l'UIT-T, l'UIT-R, l'ISO et la CEI en matière de brevets», dont il est question dans l'Annexe 1 de la Résolution UIT-R 1. Les formulaires que les titulaires de brevets doivent utiliser pour soumettre les déclarations de brevet et d'octroi de licence sont accessibles à l'adresse <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/fr>, où l'on trouvera également les Lignes directrices pour la mise en oeuvre de la politique commune en matière de brevets de l'UIT-T, l'UIT-R, l'ISO et la CEI et la base de données en matière de brevets de l'UIT-R.

Séries des Recommandations UIT-R

(Egalement disponible en ligne: <http://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	Emissions 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, 2010

© UIT 2010

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 RA.1860

**Bandes de fréquences préférées pour les mesures
de radioastronomie entre 1 et 3 THz**

(Question UIT-R 145/7)

(2010)

Domaine d'application

La présente Recommandation décrit les observations radioastronomiques des raies spectrales et du continuum réalisées entre 1 000 et 3 000 GHz, et recommande aux administrations d'apporter leur aide à la coordination des observations de radioastronomie dans cette gamme de fréquences.

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que les radioastronomes étudient les émissions radioélectriques provenant de sources cosmiques à des fréquences de plus en plus élevées;
- b) que les fréquences d'observation sont souvent déterminées par les fréquences des raies spectrales des atomes et des molécules qui existent dans les environnements astrophysiques et que ces fréquences sont déterminées par la nature;
- c) que la possibilité de réaliser des observations à partir de la surface de la Terre dépend des «fenêtres» dans lesquelles l'atmosphère est suffisamment transparente;
- d) que le développement de la radioastronomie aux fréquences submillimétriques (THz) débouche sur des progrès technologiques, en particulier dans le domaine des techniques de réception, et laisse entrevoir d'autres résultats importants;
- e) que les bandes de fréquences présentant un intérêt pour le service de radioastronomie au-dessous de 1 000 GHz font l'objet de la Recommandation UIT-R RA.314;
- f) que l'utilisation pour la radioastronomie des fréquences comprises entre 10 THz et 1 000 THz font l'objet de la Recommandation UIT-R RA.1630;
- g) que le service de radioastronomie porte un intérêt grandissant à l'utilisation de la bande 1 000-3 000 GHz;
- h) que l'Union astronomique internationale (UAI) tient à jour la liste des raies spectrales présentant un intérêt majeur pour la radioastronomie, et ce pour des fréquences allant jusqu'à 3 000 GHz;
- j) qu'il convient de prendre en compte les décalages des raies par effet Doppler, en raison du mouvement relatif entre la source cosmique et l'observateur;
- k) que les radioastronomes ont également besoin de faire des observations du continuum à des fréquences supérieures à 1 000 GHz et que les bandes utilisées pour ces observations à partir du sol sont déterminées par les fenêtres atmosphériques présentant un affaiblissement minimal;

l) que les radiotélescopes des plates-formes spatiales, utilisés dans le cadre du service de recherche spatiale (passive), donnent accès à l'ensemble du spectre radioélectrique, y compris à des parties du spectre qui ne sont pas accessibles depuis la Terre en raison de l'absorption par l'atmosphère;

m) que le service de radioastronomie est protégé dans les bandes inférieures à 275 GHz conformément au Tableau d'attribution des bandes de fréquences et dans les bandes comprises entre 275 et 1 000 GHz conformément au numéro 5.565 du Règlement des radiocommunications (RR),

recommande

1 aux administrations d'apporter leur aide à la coordination des observations de radioastronomie dans les bandes de fréquences comprises entre 1 000 GHz et 3 000 GHz, en particulier les fréquences énumérées au Tableau 1 (pour les observations depuis l'espace) et au Tableau 3 (pour les observations depuis la Terre).

Annexe 1

1 Raies spectrales présentant un intérêt pour l'astronomie

Le Tableau 1 énumère les fréquences non décalées par effet Doppler («fréquences de repos») des raies spectrales émises par diverses molécules présentant un intérêt en astrophysique. Le tableau indique, à partir de la fréquence de repos, une gamme de fréquences approximative dans laquelle les raies peuvent être observées. Cette gamme repose sur les décalages Doppler classiques que l'on observe, décalages dus à la vitesse radiale de la source cosmique lorsqu'elle se rapproche de l'observateur ou qu'elle s'en éloigne. Dans le tableau, on prend pour hypothèse un intervalle Doppler de ± 300 km/s. Les intervalles de fréquences énumérés au Tableau 1 correspondent aux bandes minimales préconisées.

Il convient de noter qu'en raison de la haute sensibilité des observations radioastronomiques, de nombreuses raies spectrales observées proviennent d'objets extragalactiques, jusqu'à $z \sim 6$ ou plus (ici, z désigne le «décalage vers le rouge», défini par $z = (\lambda_{obs} - \lambda_0)/\lambda_0$, où λ_{obs} est la longueur d'onde observée et λ_0 la longueur d'onde non décalée par effet Doppler). C'est pourquoi il convient de s'intéresser tout particulièrement aux observations de raies spectrales fortement décalées vers le rouge.

Les données à l'origine du Tableau 1, qui a été approuvé par l'Assemblée générale de l'Union astronomique internationale (UAI) en 2009, ont été obtenues à partir d'études d'observation des émissions de raies spectrales submillimétriques en direction de deux régions de la Voie lactée riches en molécules^{1,2}; de la base de données de spectroscopie moléculaire du JPL (*JPL Molecular Spectroscopy database*)³; et d'un catalogue en ligne de raies spectrales moléculaires (la base de

¹ E. T. POLEHAMPTON *et al.*, «The ISO LWS high-resolution spectral survey towards Sagittarius B2*», *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society (MNRAS)*, Vol. 377, p. 1122, 2007.

² M. R. LERATE *et al.*, «A far-infrared molecular and atomic line survey of the Orion KL region», *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society (MNRAS)*, Vol. 370, p. 597, 2006.

³ <http://spec.jpl.nasa.gov/>.

données de Cologne pour la spectroscopie moléculaire) tenu à jour par l'Université de Cologne, Allemagne⁴.

2 Absorption atmosphérique

Le degré d'affaiblissement par l'atmosphère des signaux radioélectriques est un facteur important à prendre en compte lors des observations au sol aux longueurs d'onde millimétriques et submillimétriques. L'affaiblissement des signaux dans la gamme de fréquences 1 000-3 000 GHz est principalement dû à l'absorption par la vapeur d'eau et, dans une moindre mesure, par l'oxygène, l'azote et l'ozone.

Les observatoires au sol subissent les effets de l'affaiblissement atmosphérique: réduction du niveau de signal observé provenant du rayonnement de sources cosmiques d'une part et ajout de bruit thermique au signal reçu d'autre part. C'est pourquoi les stations de radioastronomie dans les longueurs d'ondes millimétriques et submillimétriques se trouvent sur des sites à haute altitude et en atmosphère sèche. Cela étant, malgré l'optimisation de l'emplacement du site, le niveau d'affaiblissement est tellement élevé sur certaines parties de la gamme 1 000-3 000 GHz qu'à l'exception de quelques «fenêtres», de nombreuses observations dans cette région spectrale ne peuvent être menées qu'à partir de l'espace. Le Tableau 1 indique les raies spectrales qui ne seraient observables qu'à partir de l'espace en raison d'un affaiblissement atmosphérique élevé dans la bande minimale préconisée.

La Fig. 1 est un exemple de la transmittance sur un trajet vertical à travers l'atmosphère (c'est-à-dire en regardant vers l'espace le long du trajet le plus court en visibilité directe à travers l'atmosphère), sur l'ensemble de la gamme de fréquences 1 000-3 000 GHz, à partir d'un site d'observation astronomique de qualité. Les données ont été calculées à l'aide du modèle atmosphérique *am*⁵, à partir des paramètres d'entrée suivants⁶:

- emplacement du site: Cerro Sairecabur, à environ 35 km au nord/nord-ouest du site de l'ALMA (grand réseau d'antennes millimétrique/submillimétrique d'Atacama, *Atacama Large Millimeter/submillimeter Array*) à Chajnantor, Chili;
- élévation: 5 525 m;
- pression barométrique au sol: 532 mbar;
- température au sol: 285 K;
- profil atmosphérique pression/température: déterminé à partir de données acquises lors de 187 vols embarquant des radiosondes dans la zone, sur la période 1998-2002. Le profil relatif à l'ozone a été déterminé à partir de données fournies par des vols de la NASA embarquant des sondes pour mesurer l'ozone, au-dessus des Galapagos, Equateur, à la même période;
- teneur en vapeur d'eau précipitable (PWV) totale: 0,25 mm. Il a été déterminé, à partir de plusieurs campagnes de mesures très complètes, que le site avait une PWV inférieure ou égale à cette valeur pendant 25% du temps environ.

⁴ <http://www.astro.uni-koeln.de/cdms/>.

⁵ Voir <http://www.cfa.harvard.edu/~spaine/am/> (dernier accès juin 2008).

⁶ Plus précisément, les calculs utilisent le profil Sairecabur de l'exemple 4 de: S. PAINE, *The am Atmospheric Model. Submillimeter Array Technical Memo #152 (Revision 3)*, 2004. Disponible à l'adresse http://sma-www.harvard.edu/private/memos/tech_no.html (dernier accès juin 2008).

La courbe de transmittance calculée présente une bonne adéquation avec les températures de brillance atmosphérique observées sur le site à l'aide d'un spectromètre à transformée de Fourier (STF).

Le Tableau 2 énumère les gammes de fréquences pour lesquelles la transmittance atmosphérique de la Fig. 2 dépasse 20%, 10%, 5% et 1% (la Fig. 2 est une représentation graphique des données figurant au Tableau 2). De faibles valeurs de la transmittance produisent une diminution de l'intensité du signal reçu des sources cosmiques en raison de l'absorption atmosphérique et une augmentation de la température de bruit du système de radioastronomie en raison du rayonnement thermique de l'atmosphère. C'est pourquoi il est fortement recommandé de réaliser les mesures de radioastronomie au sol dans des conditions de grande valeur de transmittance, même si des observations au sol de rayonnements cosmiques relativement puissants pour des valeurs de transmittance descendant jusqu'à 5%, voire moins, peuvent donner des résultats exploitables.

TABLEAU 1

Raies spectrales les plus importantes d'un point de vue astrophysique dans la gamme des fréquences comprises entre 1 000 et 3 000 GHz

Substance	Fréquence de repos (GHz)	Fréquence minimale préconisée (GHz)	Fréquence maximale préconisée (GHz)	Observations	Fréquence minimale globale (GHz)	Fréquence maximale globale (GHz)
Vapeur d'eau (H ₂ ¹⁸ O)	1 003,278	1 002,274	1 004,281	G	1 002,274	1 004,281
Eau lourde (HDO)	1 009,945	1 008,935	1 010,955	G	1 008,935	1 010,955
Azanylidonium (NH ⁺)	1 012,524	1 011,511	1 013,537	G	1 011,511	1 013,537
Monosulfure de carbone (CS)	1 027,314	1 026,287	1 028,341	G	1 026,287	1 028,341
Hydroxylum (OH ⁺)	1 033,119	1 032,085	1 034,152	G	1 032,085	1 034,152
Monoxyde de carbone (CO)	1 036,912	1 035,875	1 037,949	G	1 035,875	1 037,949
Cyanure d'hydrogène (HCN)	1 062,983	1 061,920	1 064,046		1 061,920	1 064,046
Formylum (HCO ⁺)	1 069,694	1 068,624	1 070,764		1 068,624	1 070,764
Monosulfure de carbone (CS)	1 076,078	1 075,002	1 077,154		1 075,002	1 077,154
Sulphydrylium (SH ⁺)	1 082,909	1 081,826	1 083,993		1 081,826	1 083,993
Vapeur d'eau (H ₂ ¹⁸ O)	1 095,627	1 094,532	1 096,723		1 094,532	1 098,462
Monoxyde de carbone (C ¹⁸ O)	1 097,163	1 096,066	1 098,260			
Vapeur d'eau (H ₂ O)	1 097,365	1 096,267	1 098,462			
Monoxyde de carbone (¹³ CO)	1 101,350	1 100,248	1 102,451		1 100,248	1 102,800
Vapeur d'eau (H ₂ ¹⁸ O)	1 101,698	1 100,597	1 102,800			

TABLEAU 1 (suite)

Substance	Fréquence de repos (GHz)	Fréquence minimale préconisée (GHz)	Fréquence maximale préconisée (GHz)	Observations	Fréquence minimale globale (GHz)	Fréquence maximale globale (GHz)
Vapeur d'eau (H ₂ O)	1 113,343	1 112,230	1 114,456		1 112,230	1 116,175
Eau-cation (H ₂ O ⁺)	1 115,059	1 113,943	1 116,175			
Monosulfure de carbone (CS)	1 124,820	1 123,696	1 125,945		1 123,696	1 125,945
Vapeur d'eau (H ₂ ¹⁸ O)	1 136,704	1 135,567	1 137,840		1 135,567	1 137,840
Cyanure d'hydrogène (HCN)	1 151,452	1 150,301	1 152,603		1 150,301	1 154,280
Monoxyde de carbone (CO)	1 151,985	1 150,833	1 153,137			
Vapeur d'eau (H ₂ O)	1 153,127	1 151,974	1 154,280			
Vapeur d'eau (H ₂ O)	1 158,324	1 157,165	1 159,482		1 157,165	1 159,886
Formylium (HCO ⁺)	1 158,727	1 157,568	1 159,886			
Eau lourde (HDO)	1 161,953	1 160,791	1 163,115		1 160,791	1 165,935
Vapeur d'eau (H ₂ O)	1 162,912	1 161,749	1 164,075			
Eau lourde (HDO)	1 164,770	1 163,605	1 165,935			
Ammoniac (NH ₃)	1 168,452	1 167,283	1 169,620		1 167,283	1 169,620
Monosulfure de carbone (CS)	1 173,539	1 172,366	1 174,713		1 172,366	1 174,713
Eau lourde (HDO)	1 180,324	1 179,143	1 181,504		1 179,143	1 182,575
Vapeur d'eau (H ₂ ¹⁸ O)	1 181,394	1 180,213	1 182,575			
Vapeur d'eau (H ₂ ¹⁸ O)	1 188,863	1 187,674	1 190,052		1 187,674	1 190,052
Vapeur d'eau (H ₂ ¹⁸ O)	1 199,006	1 197,807	1 200,205		1 197,807	1 200,205

TABLEAU 1 (suite)

Substance	Fréquence de repos (GHz)	Fréquence minimale préconisée (GHz)	Fréquence maximale préconisée (GHz)	Observations	Fréquence minimale globale (GHz)	Fréquence maximale globale (GHz)
Monoxyde de carbone (C ¹⁸ O)	1 206,725	1 205,519	1 207,932		1 205,519	1 208,846
Vapeur d'eau (H ₂ O)	1 207,639	1 206,431	1 208,846			
Monoxyde de carbone (¹³ CO)	1 211,330	1 210,118	1 212,541		1 210,118	1 212,541
Ammoniac (NH ₃)	1 214,859	1 213,644	1 216,073		1 213,644	1 218,476
Ammoniac (NH ₃)	1 215,245	1 214,030	1 216,460			
Vapeur d'eau (H ₂ ¹⁸ O)	1 216,850	1 215,634	1 218,067			
Eau lourde (HDO)	1 217,258	1 216,041	1 218,476			
Monosulfure de carbone (CS)	1 222,234	1 221,012	1 223,456		1 221,012	1 223,456
Vapeur d'eau (H ₂ O)	1 228,789	1 227,560	1 230,018		1 227,560	1 231,633
Eau lourde (HDO)	1 230,403	1 229,173	1 231,633			
Cyanure d'hydrogène (HCN)	1 239,895	1 238,655	1 241,134		1 238,655	1 241,134
Formylium (HCO ⁺)	1 247,735	1 246,487	1 248,982		1 246,487	1 248,982
Eau lourde (HDO)	1 259,072	1 257,813	1 260,331	G	1 257,813	1 262,731
Eau lourde (HDO)	1 261,469	1 260,208	1 262,731	G		
Monoxyde de carbone (CO)	1 267,014	1 265,747	1 268,282	G	1 265,747	1 268,310
Eau lourde (HDO)	1 267,043	1 265,776	1 268,310	G		
Monosulfure de carbone (CS)	1 270,903	1 269,632	1 272,174	G	1 269,632	1 272,174
Eau lourde (HDO)	1 277,676	1 276,398	1 278,954	G	1 276,398	1 278,954

TABLEAU 1 (suite)

Substance	Fréquence de repos (GHz)	Fréquence minimale préconisée (GHz)	Fréquence maximale préconisée (GHz)	Observations	Fréquence minimale globale (GHz)	Fréquence maximale globale (GHz)
Eau lourde (HDO)	1 291,642	1 290,351	1 292,934	G	1 290,351	1 294,666
Eau lourde (HDO)	1 293,372	1 292,079	1 294,666	G		
Eau lourde (HDO)	1 297,805	1 296,507	1 299,103	G	1 296,507	1 299,103
Monoxyde de carbone (C ¹⁸ O)	1 316,244	1 314,928	1 317,560	G	1 314,928	1 317,560
Monosulfure de carbone (CS)	1 319,545	1 318,226	1 320,865		1 318,226	1 323,387
Monoxyde de carbone (¹³ CO)	1 321,266	1 319,944	1 322,587			
Vapeur d'eau (H ₂ O)	1 322,065	1 320,743	1 323,387			
Cyanure d'hydrogène (HCN)	1 328,308	1 326,980	1 329,637	G	1 326,980	1 329,637
Formylium (HCO ⁺)	1 336,714	1 335,378	1 338,051	G	1 335,378	1 338,051
Vapeur d'eau (H ₂ ¹⁸ O)	1 340,739	1 339,398	1 342,080	G	1 339,398	1 342,080
Eau lourde (HDO)	1 353,777	1 352,423	1 355,130	G	1 352,423	1 355,130
Monosulfure de carbone (CS)	1 368,160	1 366,792	1 369,528	G	1 366,792	1 371,455
Trihydrogène (H ₂ D ⁺)	1 370,085	1 368,715	1 371,455	G		
Monoxyde de carbone (CO)	1 381,995	1 380,613	1 383,377	G	1 380,613	1 383,377
Eau lourde (HDO)	1 385,216	1 383,831	1 386,601		1 383,831	1 386,601
Eau lourde (HDO)	1 392,919	1 391,526	1 394,312		1 391,526	1 394,312
Vapeur d'eau (H ₂ ¹⁸ O)	1 402,966	1 401,563	1 404,369		1 401,563	1 404,369
Vapeur d'eau (H ₂ O)	1 410,618	1 409,207	1 412,029		1 409,207	1 412,029

TABLEAU 1 (suite)

Substance	Fréquence de repos (GHz)	Fréquence minimale préconisée (GHz)	Fréquence maximale préconisée (GHz)	Observations	Fréquence minimale globale (GHz)	Fréquence maximale globale (GHz)
Cyanure d'hydrogène (HCN)	1 416,691	1 415,275	1 418,108		1 415,275	1 418,162
Monosulfure de carbone (CS)	1 416,745	1 415,329	1 418,162			
Formylium (HCO ⁺)	1 425,664	1 424,238	1 427,090		1 424,238	1 427,141
Monoxyde de carbone (C ¹⁸ O)	1 425,715	1 424,289	1 427,141			
Monoxyde de carbone (¹³ CO)	1 431,153	1 429,722	1 432,584		1 429,722	1 434,310
Eau lourde (HDO)	1 432,877	1 431,444	1 434,310		1 437,210	1 442,222
Vapeur d'eau (H ₂ ¹⁸ O)	1 438,649	1 437,210	1 440,087			
Vapeur d'eau (H ₂ O)	1 440,782	1 439,341	1 442,222			
Eau lourde (HDO)	1 444,829	1 443,384	1 446,274	G	1 443,384	1 448,460
Sulfhydyle (SH)	1 447,012	1 445,564	1 448,460	G		
Ion azote (N II)	1 461,130	1 459,669	1 462,591	G	1 459,669	1 462,591
Trihydrogène (D ₂ H ⁺)	1 476,606	1 475,128	1 478,083	G	1 475,128	1 478,083
Eau lourde (HDO)	1 491,927	1 490,435	1 493,419	G	1 490,435	1 493,419
Monoxyde de carbone (CO)	1 496,923	1 495,426	1 498,420	G	1 495,426	1 498,420
Eau lourde (HDO)	1 500,990	1 499,489	1 502,491	G	1 499,489	1 502,491
Cyanure d'hydrogène (HCN)	1 505,042	1 503,537	1 506,547	G	1 503,537	1 508,768
Eau lourde (HDO)	1 507,261	1 505,754	1 508,768	G		

TABLEAU 1 (suite)

Substance	Fréquence de repos (GHz)	Fréquence minimale préconisée (GHz)	Fréquence maximale préconisée (GHz)	Observations	Fréquence minimale globale (GHz)	Fréquence maximale globale (GHz)
Formylium (HCO ⁺)	1 514,582	1 513,067	1 516,096	G	1 513,067	1 516,096
Eau lourde (HDO)	1 522,926	1 521,403	1 524,449	G	1 521,403	1 524,449
Monoxide de carbone (C ¹⁸ O)	1 535,134	1 533,599	1 536,669	G	1 533,599	1 536,669
Monoxide de carbone (¹³ CO)	1 540,989	1 539,448	1 542,530		1 539,448	1 543,509
Vapeur d'eau (H ₂ O)	1 541,967	1 540,425	1 543,509			
Eau lourde (HDO)	1 577,178	1 575,600	1 578,755		1 575,600	1 578,755
Cyanure d'hydrogène (HCN)	1 593,357	1 591,764	1 594,951		1 591,764	1 594,951
Vapeur d'eau (H ₂ O)	1 602,219	1 600,617	1 603,821		1 600,617	1 607,568
Formylium (HCO ⁺)	1 603,466	1 601,862	1 605,069			
Vapeur d'eau (H ₂ ¹⁸ O)	1 605,962	1 604,356	1 607,568			
Monoxide de carbone (CO)	1 611,794	1 610,182	1 613,405		1 610,182	1 617,242
Eau lourde (HDO)	1 614,294	1 612,679	1 615,908			
Eau lourde (HDO)	1 615,626	1 614,010	1 617,242			
Vapeur d'eau (H ₂ ¹⁸ O)	1 620,852	1 619,231	1 622,472		1 619,231	1 622,472
Eau lourde (HDO)	1 625,408	1 623,783	1 627,033		1 623,783	1 627,033
Sulphydrylium (SH ⁺)	1 632,518	1 630,884	1 634,151		1 630,884	1 636,274
Vapeur d'eau (H ₂ ¹⁸ O)	1 633,484	1 631,850	1 635,117			
Eau lourde (HDO)	1 634,639	1 633,005	1 636,274			

TABLEAU 1 (suite)

Substance	Fréquence de repos (GHz)	Fréquence minimale préconisée (GHz)	Fréquence maximale préconisée (GHz)	Observations	Fréquence minimale globale (GHz)	Fréquence maximale globale (GHz)
Monoxide de carbone (C ¹⁸ O)	1 644,497	1 642,852	1 646,141		1 642,852	1 646,141
Eau lourde (HDO)	1 648,801	1 647,153	1 650,450		1 647,153	1 652,418
Monoxide de carbone (¹³ CO)	1 650,768	1 649,117	1 652,418			
Oxonium (H ₃ O ⁺)	1 655,813	1 654,158	1 657,469		1 654,158	1 657,858
Vapeur d'eau (H ₂ ¹⁸ O)	1 655,868	1 654,212	1 657,523			
Vapeur d'eau (H ₂ ¹⁸ O)	1 656,202	1 654,546	1 657,858			
Vapeur d'eau (H ₂ O)	1 661,008	1 659,347	1 662,669		1 659,347	1 665,247
Oxonium (H ₃ O ⁺)	1 663,584	1 661,920	1 665,247			
Methylidyne (CH ⁺)	1 669,170	1 667,499	1 670,840		1 667,499	1 673,021
Vapeur d'eau (H ₂ O)	1 669,905	1 668,235	1 671,575			
Vapeur d'eau (H ₂ ¹⁸ O)	1 671,350	1 669,679	1 673,021			
Eau lourde (HDO)	1 678,578	1 676,899	1 680,256		1 676,899	1 686,290
Cyanure d'hydrogène (HCN)	1 681,636	1 679,955	1 683,318			
Eau lourde (HDO)	1 684,606	1 682,921	1 686,290			
Formylium (HCO ⁺)	1 692,313	1 690,621	1 694,006		1 690,621	1 694,006
Vapeur d'eau (H ₂ O)	1 713,883	1 712,169	1 715,597		1 712,169	1 721,701
Vapeur d'eau (H ₂ O)	1 716,770	1 715,053	1 718,486			
Vapeur d'eau (H ₂ O)	1 716,957	1 715,240	1 718,674			
Vapeur d'eau (H ₂ ¹⁸ O)	1 719,250	1 717,531	1 720,969			
Vapeur d'eau (H ₂ ¹⁸ O)	1 719,981	1 718,261	1 721,701			

TABLEAU 1 (suite)

Substance	Fréquence de repos (GHz)	Fréquence minimale préconisée (GHz)	Fréquence maximale préconisée (GHz)	Observations	Fréquence minimale globale (GHz)	Fréquence maximale globale (GHz)
Monoxide de carbone (CO)	1 726,603	1 724,876	1 728,329		1 724,876	1 728,329
Monoxide de carbone (C ¹⁸ O)	1 753,800	1 752,046	1 755,554		1 752,046	1 755,554
Eau lourde (HDO)	1 759,978	1 758,218	1 761,738		1 758,218	1 765,585
Monoxide de carbone (¹³ CO)	1 760,486	1 758,726	1 762,247			
Vapeur d'eau (H ₂ O)	1 762,043	1 760,281	1 763,805			
Ammoniac (NH ₃)	1 763,525	1 761,762	1 765,289			
Eau lourde (HDO)	1 763,558	1 761,795	1 765,322			
Ammoniac (NH ₃)	1 763,602	1 761,838	1 765,365			
Ammoniac (NH ₃)	1 763,821	1 762,058	1 765,585			
Cyanure d'hydrogène (HCN)	1 769,877	1 768,107	1 771,647			
Formylium (HCO ⁺)	1 781,123	1 779,342	1 782,904		1 779,342	1 782,904
Vapeur d'eau (H ₂ O)	1 794,789	1 792,994	1 796,584		1 792,994	1 796,584
Vapeur d'eau (H ₂ ¹⁸ O)	1 800,475	1 798,674	1 802,275		1 798,674	1 802,275
Ammoniac (NH ₃)	1 808,936	1 807,127	1 810,744		1 807,127	1 812,188
Ammoniac (NH ₃)	1 810,378	1 808,567	1 812,188			
Vapeur d'eau (H ₂ ¹⁸ O)	1 815,853	1 814,038	1 817,669		1 814,038	1 820,348
Eau lourde (HDO)	1 818,530	1 816,711	1 820,348			
Vapeur d'eau (H ₂ ¹⁸ O)	1 824,554	1 822,729	1 826,378		1 822,729	1 826,378

TABLEAU 1 (suite)

Substance	Fréquence de repos (GHz)	Fréquence minimale préconisée (GHz)	Fréquence maximale préconisée (GHz)	Observations	Fréquence minimale globale (GHz)	Fréquence maximale globale (GHz)
Hydroxyle (OH)	1 834,745	1 832,911	1 836,580		1 832,911	1 843,187
Hydroxyle (OH)	1 837,741	1 835,903	1 839,578			
Hydroxyle (OH)	1 837,812	1 835,974	1 839,649			
Monoxide de carbone (CO)	1 841,346	1 839,504	1 843,187			
Vapeur d'eau (H ₂ ¹⁸ O)	1 846,872	1 845,025	1 848,719		1 845,025	1 850,154
Eau lourde (HDO)	1 848,306	1 846,458	1 850,154			
Eau lourde (HDO)	1 853,873	1 852,019	1 855,727		1 852,019	1 855,727
Cyanure d'hydrogène (HCN)	1 858,077	1 856,219	1 859,935		1 856,219	1 859,935
Monoxide de carbone (C ¹⁸ O)	1 863,039	1 861,176	1 864,902		1 861,176	1 864,902
Vapeur d'eau (H ₂ O)	1 867,749	1 865,881	1 869,616		1 865,881	1 874,481
Vapeur d'eau (H ₂ O)	1 867,819	1 865,951	1 869,687			
Formylium (HCO ⁺)	1 869,893	1 868,023	1 871,763			
Monoxide de carbone (¹³ CO)	1 870,141	1 868,271	1 872,011			
Eau lourde (HDO)	1 872,609	1 870,736	1 874,481			
Eau lourde (HDO)	1 877,487	1 875,609	1 879,364		1 875,609	1 883,172
Vapeur d'eau (H ₂ O)	1 880,753	1 878,872	1 882,634			
Eau lourde (HDO)	1 881,291	1 879,410	1 883,172			

TABLEAU 1 (suite)

Substance	Fréquence de repos (GHz)	Fréquence minimale préconisée (GHz)	Fréquence maximale préconisée (GHz)	Observations	Fréquence minimale globale (GHz)	Fréquence maximale globale (GHz)
Eau lourde (HDO)	1 890,757	1 888,866	1 892,647		1 888,866	1 896,218
Vapeur d'eau (H ₂ O)	1 893,687	1 891,793	1 895,580			
Vapeur d'eau (H ₂ ¹⁸ O)	1 894,324	1 892,429	1 896,218			
Vapeur d'eau (H ₂ ¹⁸ O)	1 899,604	1 897,705	1 901,504		1 897,705	1 902,438
Ion carbone (C II)	1 900,537	1 898,637	1 902,438			
Eau lourde (HDO)	1 909,602	1 907,693	1 911,512		1 907,693	1 911,512
Vapeur d'eau (H ₂ O)	1 918,475	1 916,557	1 920,394		1 916,557	1 922,353
Vapeur d'eau (H ₂ O)	1 918,485	1 916,567	1 920,404			
Vapeur d'eau (H ₂ O)	1 919,360	1 917,440	1 921,279			
Vapeur d'eau (H ₂ O)	1 919,360	1 917,440	1 921,279			
Eau lourde (HDO)	1 920,433	1 918,513	1 922,353			
Eau lourde (HDO)	1 929,255	1 927,326	1 931,184		1 927,326	1 932,259
Eau lourde (HDO)	1 930,329	1 928,398	1 932,259			
Eau lourde (HDO)	1 941,797	1 939,855	1 943,739		1 939,855	1 943,739
Cyanure d'hydrogène (HCN)	1 946,235	1 944,288	1 948,181		1 944,288	1 948,181
Eau lourde (HDO)	1 950,155	1 948,204	1 952,105		1 948,204	1 952,159
Eau lourde (HDO)	1 950,209	1 948,259	1 952,159			
Azanylidène (NH)	1 955,027	1 953,072	1 956,982		1 953,072	1 960,579
Monoxide de carbone (CO)	1 956,018	1 954,062	1 957,974			
Azanylidène (NH)	1 958,198	1 956,240	1 960,156			
Formylium (HCO ⁺)	1 958,621	1 956,662	1 960,579			

TABLEAU 1 (suite)

Substance	Fréquence de repos (GHz)	Fréquence minimale préconisée (GHz)	Fréquence maximale préconisée (GHz)	Observations	Fréquence minimale globale (GHz)	Fréquence maximale globale (GHz)
Eau lourde (HDO)	1 965,554	1 963,588	1 967,519		1 963,588	1 967,519
Monoxide de carbone (C ¹⁸ O)	1 972,211	1 970,239	1 974,183		1 970,239	1 987,905
Vapeur d'eau (H ₂ ¹⁸ O)	1 974,636	1 972,661	1 976,611	G		
Azanylidène (NH)	1 978,464	1 976,485	1 980,442	G		
Monoxide de carbone (¹³ CO)	1 979,727	1 977,747	1 981,707	G		
Eau lourde (HDO)	1 982,064	1 980,082	1 984,046	G		
Vapeur d'eau (H ₂ ¹⁸ O)	1 985,919	1 983,933	1 987,905	G		
Eau lourde (HDO)	1 994,285	1 992,291	1 996,280	G	1 992,291	1 996,280
Eau lourde (HDO)	2 003,495	2 001,491	2 005,498		2 001,491	2 008,785
Eau lourde (HDO)	2 005,180	2 003,175	2 007,186			
Methyladyne (CH)	2 006,779	2 004,772	2 008,785			
Methyladyne (CH)	2 010,799	2 008,788	2 012,810		2 008,788	2 016,880
Eau lourde (HDO)	2 014,370	2 012,355	2 016,384			
Vapeur d'eau (H ₂ O)	2 014,865	2 012,850	2 016,880			
Eau lourde (HDO)	2 019,134	2 017,115	2 021,154		2 017,115	2 021,154
Eau lourde (HDO)	2 031,743	2 029,711	2 033,774		2 029,711	2 033,774
Vapeur d'eau (H ₂ O)	2 040,477	2 038,436	2 042,517		2 038,436	2 042,517
Oxygène (O I)	2 060,070	2 058,010	2 062,130		2 058,010	2 062,130
Eau lourde (HDO)	2 064,690	2 062,625	2 066,755		2 062,625	2 066,755

TABLEAU 1 (suite)

Substance	Fréquence de repos (GHz)	Fréquence minimale préconisée (GHz)	Fréquence maximale préconisée (GHz)	Observations	Fréquence minimale globale (GHz)	Fréquence maximale globale (GHz)
Monoxide de carbone (CO)	2 070,616	2 068,545	2 072,687		2 068,545	2 076,519
Vapeur d'eau (H ₂ O)	2 074,432	2 072,358	2 076,507			
Vapeur d'eau (H ₂ O)	2 074,444	2 072,370	2 076,519			
Monoxide de carbone (C ¹⁸ O)	2 081,311	2 079,229	2 083,392		2 079,229	2 085,118
Eau lourde (HDO)	2 082,718	2 080,635	2 084,801		2 085,139	2 091,330
Eau lourde (HDO)	2 083,035	2 080,952	2 085,118			
Eau lourde (HDO)	2 087,226	2 085,139	2 089,313			
Monoxide de carbone (¹³ CO)	2 089,241	2 087,151	2 091,330		2 085,139	2 091,330
Vapeur d'eau (H ₂ ¹⁸ O)	2 099,963	2 097,863	2 102,063		2 097,863	2 102,063
Eau lourde (HDO)	2 110,993	2 108,882	2 113,104		2 108,882	2 113,104
Eau lourde (HDO)	2 121,216	2 119,095	2 123,338		2 119,095	2 123,338
Vapeur d'eau (H ₂ ¹⁸ O)	2 143,752	2 141,608	2 145,895		2 141,608	2 154,357
Vapeur d'eau (H ₂ ¹⁸ O)	2 147,733	2 145,585	2 149,880			
Eau lourde (HDO)	2 149,224	2 147,075	2 151,373			
Eau lourde (HDO)	2 152,205	2 150,052	2 154,357			
Vapeur d'eau (H ₂ O)	2 164,132	2 161,968	2 166,296		2 161,968	2 166,296
Monoxide de carbone (CO)	2 185,135	2 182,950	2 187,320		2 182,950	2 187,320
Vapeur d'eau (H ₂ O)	2 196,346	2 194,149	2 198,542		2 194,149	2 201,998
Eau lourde (HDO)	2 199,798	2 197,599	2 201,998			

TABLEAU 1 (suite)

Substance	Fréquence de repos (GHz)	Fréquence minimale préconisée (GHz)	Fréquence maximale préconisée (GHz)	Observations	Fréquence minimale globale (GHz)	Fréquence maximale globale (GHz)
Eau lourde (HDO)	2 204,707	2 202,503	2 206,912		2 202,503	2 206,912
Eau lourde (HDO)	2 213,707	2 211,493	2 215,921		2 211,493	2 215,921
Vapeur d'eau (H ₂ O)	2 221,751	2 219,529	2 223,972		2 219,529	2 223,972
Vapeur d'eau (H ₂ ¹⁸ O)	2 227,872	2 225,644	2 230,100		2 225,644	2 230,100
Vapeur d'eau (H ₂ ¹⁸ O)	2 242,198	2 239,956	2 244,440		2 239,956	2 244,440
Vapeur d'eau (H ₂ O)	2 264,150	2 261,886	2 266,414		2 261,886	2 266,414
Eau lourde (HDO)	2 269,686	2 267,416	2 271,956		2 267,416	2 271,956
Eau lourde (HDO)	2 278,017	2 275,739	2 280,295		2 275,739	2 280,295
Eau lourde (HDO)	2 283,942	2 281,658	2 286,226		2 281,658	2 288,499
Eau lourde (HDO)	2 286,213	2 283,926	2 288,499			
Eau lourde (HDO)	2 291,309	2 289,018	2 293,601		2 289,018	2 293,601
Eau lourde (HDO)	2 296,248	2 293,952	2 298,544		2 293,952	2 302,002
Eau lourde (HDO)	2 297,652	2 295,355	2 299,950			
Monoxide de carbone (CO)	2 299,569	2 297,269	2 301,868			
Eau lourde (HDO)	2 299,702	2 297,402	2 302,002		2 305,723	2 310,339
Monoxide de carbone (¹³ CO)	2 308,031	2 305,723	2 310,339		2 305,723	2 310,339
Vapeur d'eau (H ₂ ¹⁸ O)	2 318,554	2 316,236	2 320,873		2 316,236	2 320,873
Eau lourde (HDO)	2 327,429	2 325,101	2 329,756		2 325,101	2 329,756
Eau lourde (HDO)	2 335,788	2 333,452	2 338,123		2 333,452	2 338,556
Eau lourde (HDO)	2 336,220	2 333,883	2 338,556			

TABLEAU 1 (suite)

Substance	Fréquence de repos (GHz)	Fréquence minimale préconisée (GHz)	Fréquence maximale préconisée (GHz)	Observations	Fréquence minimale globale (GHz)	Fréquence maximale globale (GHz)		
Eau lourde (HDO)	2 343,735	2 341,392	2 346,079		2 341,392	2 368,266		
Vapeur d'eau (H ₂ O)	2 344,290	2 341,945	2 346,634					
Méthylène (CH ₂)	2 344,726	2 342,381	2 347,071					
Méthylène (CH ₂)	2 348,622	2 346,274	2 350,971					
Eau lourde (HDO)	2 351,731	2 349,380	2 354,083					
Eau lourde (HDO)	2 355,192	2 352,837	2 357,548					
Ammoniac (NH ₃)	2 357,210	2 354,853	2 359,568					
Ammoniac (NH ₃)	2 357,727	2 355,369	2 360,084					
Ammoniac (NH ₃)	2 358,563	2 356,205	2 360,922					
Eau lourde (HDO)	2 360,340	2 357,980	2 362,700					
Trihydrogène (H ₂ D ⁺)	2 363,306	2 360,943	2 365,669					
Amino (NH ₂)	2 364,268	2 361,903	2 366,632					
Vapeur d'eau (H ₂ O)	2 365,900	2 363,534	2 368,266					
Eau lourde (HDO)	2 382,166	2 379,784	2 384,548				2 379,784	2 384,548
Vapeur d'eau (H ₂ ¹⁸ O)	2 388,325	2 385,936	2 390,713				2 385,936	2 393,964
Vapeur d'eau (H ₂ O)	2 391,573	2 389,181	2 393,964					
Eau lourde (HDO)	2 399,218	2 396,819	2 401,618		2 396,819	2 407,526		
Ammoniac (NH ₃)	2 400,018	2 397,618	2 402,418					
Ammoniac (NH ₃)	2 400,578	2 398,178	2 402,979					
Ammoniac (NH ₃)	2 402,265	2 399,863	2 404,667					
Ammoniac (NH ₃)	2 405,121	2 402,716	2 407,526					

TABLEAU 1 (suite)

Substance	Fréquence de repos (GHz)	Fréquence minimale préconisée (GHz)	Fréquence maximale préconisée (GHz)	Observations	Fréquence minimale globale (GHz)	Fréquence maximale globale (GHz)
Eau lourde (HDO)	2 411,827	2 409,415	2 414,239		2 409,415	2 420,888
Monoxide de carbone (CO)	2 413,924	2 411,510	2 416,338			
Vapeur d'eau (H ₂ ¹⁸ O)	2 418,469	2 416,051	2 420,888			
Ion azote (N II)	2 459,379	2 456,920	2 461,839		2 456,920	2 468,338
Vapeur d'eau (H ₂ O)	2 462,933	2 460,470	2 465,396			
Eau lourde (HDO)	2 463,054	2 460,591	2 465,517			
Fluorure d'hydrogène (HF)	2463,427	2 460,964	2 465,891			
Eau lourde (HDO)	2 465,872	2 463,406	2 468,338			
Eau lourde (HDO)	2 477,453	2 474,976	2 479,931			
Eau lourde (HDO)	2 480,807	2 478,326	2 483,287		2 474,976	2 486,788
Eau lourde (HDO)	2 484,303	2 481,819	2 486,788		2 492,179	2 516,847
Hydroxyle (¹⁸ OH)	2 494,674	2 492,179	2 497,169			
Hydroxyle (¹⁸ OH)	2 498,970	2 496,471	2 501,469			
Hydroxyle (¹⁷ OH)	2 501,856	2 499,355	2 504,358			
Eau lourde (HDO)	2 502,167	2 499,665	2 504,669			
Hydroxyle (¹⁷ OH)	2 506,186	2 503,680	2 508,692			
Hydroxyle (OH)	2 509,965	2 507,455	2 512,475			
Hydroxyle (OH)	2 514,333	2 511,819	2 516,847			

TABLEAU 1 (suite)

Substance	Fréquence de repos (GHz)	Fréquence minimale préconisée (GHz)	Fréquence maximale préconisée (GHz)	Observations	Fréquence minimale globale (GHz)	Fréquence maximale globale (GHz)
Vapeur d'eau (H ₂ ¹⁸ O)	2 526,741	2 524,214	2 529,268		2 524,214	2 531,838
Monoxide de carbone (CO)	2 528,166	2 525,638	2 530,694			
Eau lourde (HDO)	2 529,308	2 526,779	2 531,838			
Eau lourde (HDO)	2 541,065	2 538,524	2 543,606		2 538,524	2 547,650
Amino (NH ₂)	2 545,105	2 542,560	2 547,650			
Amino (NH ₂)	2 553,966	2 551,412	2 556,520		2 551,412	2 563,471
Eau lourde (HDO)	2 558,905	2 556,346	2 561,464			
Amino (NH ₂)	2 560,910	2 558,349	2 563,471			
Eau lourde (HDO)	2 577,667	2 575,089	2 580,244		2 575,089	2 582,211
Eau lourde (HDO)	2 579,631	2 577,052	2 582,211			
Vapeur d'eau (H ₂ ¹⁸ O)	2 591,047	2 588,456	2 593,638		2 588,456	2 595,117
Eau lourde (HDO)	2 592,524	2 589,932	2 595,117			
Eau lourde (HDO)	2 598,288	2 595,690	2 600,886		2 595,690	2 606,031
Hydroxyle (OH)	2 603,427	2 600,824	2 606,031			
Eau lourde (HDO)	2 616,165	2 613,549	2 618,781		2 613,549	2 618,781
Vapeur d'eau (H ₂ ¹⁸ O)	2 622,939	2 620,316	2 625,562		2 620,316	2 625,562
Vapeur d'eau (H ₂ O)	2 630,960	2 628,329	2 633,590		2 628,329	2 633,682
Vapeur d'eau (H ₂ O)	2 631,051	2 628,420	2 633,682			
Vapeur d'eau (H ₂ O)	2 640,474	2 637,833	2 643,114		2 637,833	2 644,963

TABLEAU 1 (suite)

Substance	Fréquence de repos (GHz)	Fréquence minimale préconisée (GHz)	Fréquence maximale préconisée (GHz)	Observations	Fréquence minimale globale (GHz)	Fréquence maximale globale (GHz)
Monoxide de carbone (CO)	2 642,321	2 639,679	2 644,963			
Vapeur d'eau (H ₂ O)	2 657,666	2 655,008	2 660,323		2 655,008	2 660,323
Vapeur d'eau (H ₂ O)	2 664,561	2 661,897	2 667,226		2 661,897	2 677,662
Vapeur d'eau (H ₂ ¹⁸ O)	2 666,732	2 664,065	2 669,398			
Eau lourde (HDO)	2 669,415	2 666,745	2 672,084			
Eau lourde (HDO)	2 674,283	2 671,609	2 676,957			
Hydroène deutéré (HD)	2 674,987	2 672,312	2 677,662			
Vapeur d'eau (H ₂ O)	2 685,639	2 682,953	2 688,325		2 682,953	2 688,325
Eau lourde (HDO)	2 735,277	2 732,541	2 738,012		2 732,541	2 738,012
Vapeur d'eau (H ₂ ¹⁸ O)	2 741,675	2 738,933	2 744,416		2 738,933	2 744,416
Eau lourde (HDO)	2 748,312	2 745,564	2 751,060		2 745,564	2 751,060
Monoxide de carbone (CO)	2 756,383	2 753,626	2 759,139		2 753,626	2 759,139
Vapeur d'eau (H ₂ O)	2 773,977	2 771,203	2 776,751		2 771,203	2 776,751
Méthylène (CH ₂)	2 783,064	2 780,281	2 785,847		2 780,281	2 785,847
Eau lourde (HDO)	2 794,002	2 791,208	2 796,796		2 791,208	2 796,829
Eau lourde (HDO)	2 794,035	2 791,241	2 796,829			

TABLEAU 1 (suite)

Substance	Fréquence de repos (GHz)	Fréquence minimale préconisée (GHz)	Fréquence maximale préconisée (GHz)	Observations	Fréquence minimale globale (GHz)	Fréquence maximale globale (GHz)
Vapeur d'eau (H ₂ ¹⁸ O)	2 805,384	2 802,579	2 808,190		2 802,579	2 816,325
Eau lourde (HDO)	2 807,498	2 804,691	2 810,306			
Eau lourde (HDO)	2 809,406	2 806,597	2 812,216			
Eau lourde (HDO)	2 810,880	2 808,069	2 813,691			
Eau lourde (HDO)	2 813,511	2 810,698	2 816,325			
Eau lourde (HDO)	2 834,411	2 831,577	2 837,245		2 831,577	2 837,245
Vapeur d'eau (H ₂ ¹⁸ O)	2 845,980	2 843,134	2 848,826		2 843,134	2 848,826
Eau lourde (HDO)	2 855,631	2 852,776	2 858,487		2 852,776	2 861,891
Eau lourde (HDO)	2 859,032	2 856,173	2 861,891			
Monoxide de carbone (CO)	2 870,338	2 867,468	2 873,208		2 867,468	2 875,782
Eau lourde (HDO)	2 872,909	2 870,036	2 875,782			
Vapeur d'eau (H ₂ O)	2 880,025	2 877,145	2 882,905		2 877,145	2 890,914
Vapeur d'eau (H ₂ O)	2 884,279	2 881,395	2 887,163			
Vapeur d'eau (H ₂ O)	2 884,312	2 881,427	2 887,196			
Vapeur d'eau (H ₂ O)	2 884,941	2 882,056	2 887,826			
Vapeur d'eau (H ₂ O)	2 884,950	2 882,065	2 887,835			

TABLEAU 1 (suite)

Substance	Fréquence de repos (GHz)	Fréquence minimale préconisée (GHz)	Fréquence maximale préconisée (GHz)	Observations	Fréquence minimale globale (GHz)	Fréquence maximale globale (GHz)
Vapeur d'eau (H ₂ ¹⁸ O)	2 888,026	2 885,138	2 890,914			
Eau lourde (HDO)	2 900,172	2 897,272	2 903,072		2 897,272	2 906,294
Eau lourde (HDO)	2 903,391	2 900,487	2 906,294			
Eau lourde (HDO)	2 916,109	2 913,193	2 919,025		2 913,193	2 923,819
Eau lourde (HDO)	2 920,898	2 917,977	2 923,819			
Vapeur d'eau (H ₂ ¹⁸ O)	2 938,998	2 936,059	2 941,937		2 936,059	2 944,831
Vapeur d'eau (H ₂ ¹⁸ O)	2 939,000	2 936,061	2 941,939			
Eau lourde (HDO)	2 941,889	2 938,947	2 944,831			
Eau lourde (HDO)	2 948,042	2 945,094	2 950,990		2 945,094	2 955,592
Ammoniac (NH ₃)	2 948,411	2 945,462	2 951,359			
Ammoniac (NH ₃)	2 948,669	2 945,721	2 951,618			
Ammoniac (NH ₃)	2 949,480	2 946,531	2 952,430			
Ammoniac (NH ₃)	2 950,815	2 947,864	2 953,765			
Ammoniac (NH ₃)	2 952,640	2 949,687	2 955,592			
Vapeur d'eau (H ₂ O)	2 962,111	2 959,149	2 965,073		2 959,149	2 975,081
Eau lourde (HDO)	2 966,081	2 963,115	2 969,047			
Vapeur d'eau (H ₂ O)	2 968,749	2 965,780	2 971,717			

TABLEAU 1 (*fin*)

Substance	Fréquence de repos (GHz)	Fréquence minimale préconisée (GHz)	Fréquence maximale préconisée (GHz)	Observations	Fréquence minimale globale (GHz)	Fréquence maximale globale (GHz)
Vapeur d'eau (H ₂ ¹⁸ O)	2 969,868	2 966,899	2 972,838			
Vapeur d'eau (H ₂ O)	2 970,800	2 967,829	2 973,771			
Vapeur d'eau (H ₂ O)	2 970,801	2 967,830	2 973,772			
Oxonium (H ₃ O ⁺)	2 972,109	2 969,137	2 975,081			
Oxonium (H ₃ O ⁺)	2 980,735	2 977,754	2 983,715		2 977,754	3 002,430
Monoxide de carbone (CO)	2 984,168	2 981,183	2 987,152			
Eau lourde (HDO)	2 984,559	2 981,575	2 987,544			
Ammoniac (NH ₃)	2 989,643	2 986,653	2 992,632			
Vapeur d'eau (H ₂ ¹⁸ O)	2 990,139	2 987,149	2 993,129			
Ammoniac (NH ₃)	2 991,555	2 988,564	2 994,547			
Ammoniac (NH ₃)	2 994,786	2 991,792	2 997,781			
Eau lourde (HDO)	2 997,115	2 994,118	3 000,112	H		
Ammoniac (NH ₃)	2 999,430	2 996,431	3 002,430	H		

NOTE 1 – La lettre G sous «Observations» indique que la raie est observable au sol si les conditions atmosphériques sont très bonnes.

La lettre H sous «Observations» indique que les fréquences maximales préconisées dépassent 3 000 GHz.

Les fréquences minimales et maximales préconisées correspondent aux fréquences décalées par effet Doppler respectivement pour +300 km/s et –300 km/s.

Références: Résolution A.2 de l'UAI (1991, Buenos Aires; révision 2009, Rio de Janeiro)
 JPL Molecular Spectroscopy Database (<http://spec.jpl.nasa.gov/>)
 Base de données de Cologne pour la spectroscopie moléculaire (<http://www.astro.uni-koeln.de/cdms/>)

FIGURE 1
Transmittance verticale à travers l'atmosphère, calculée à partir des paramètres d'entrée du § 2 de l'Annexe 1

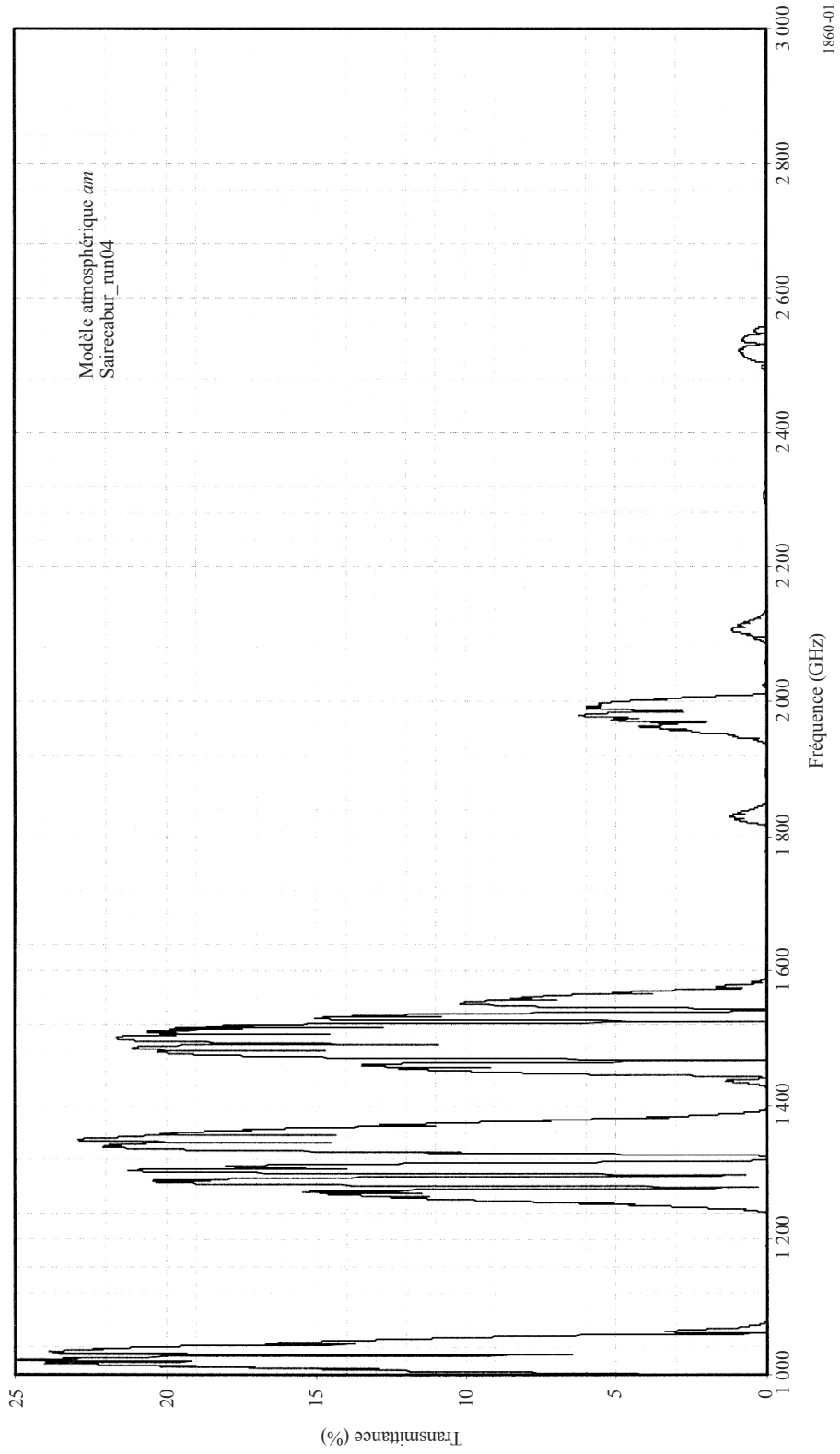


FIGURE 2
Affaiblissement vertical à travers l'atmosphère, calculé à partir des paramètres d'entrée du § 2 de l'Annexe 1

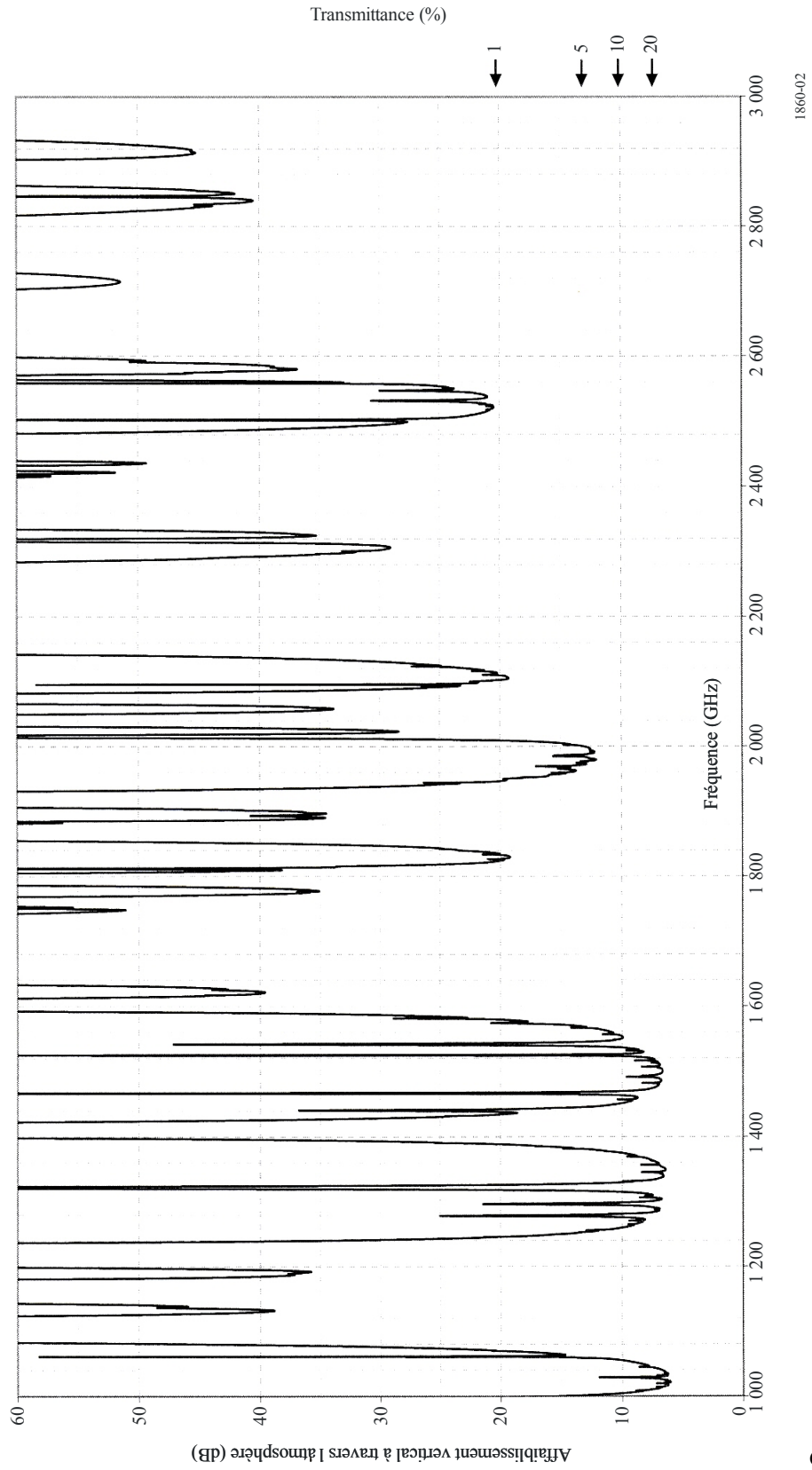
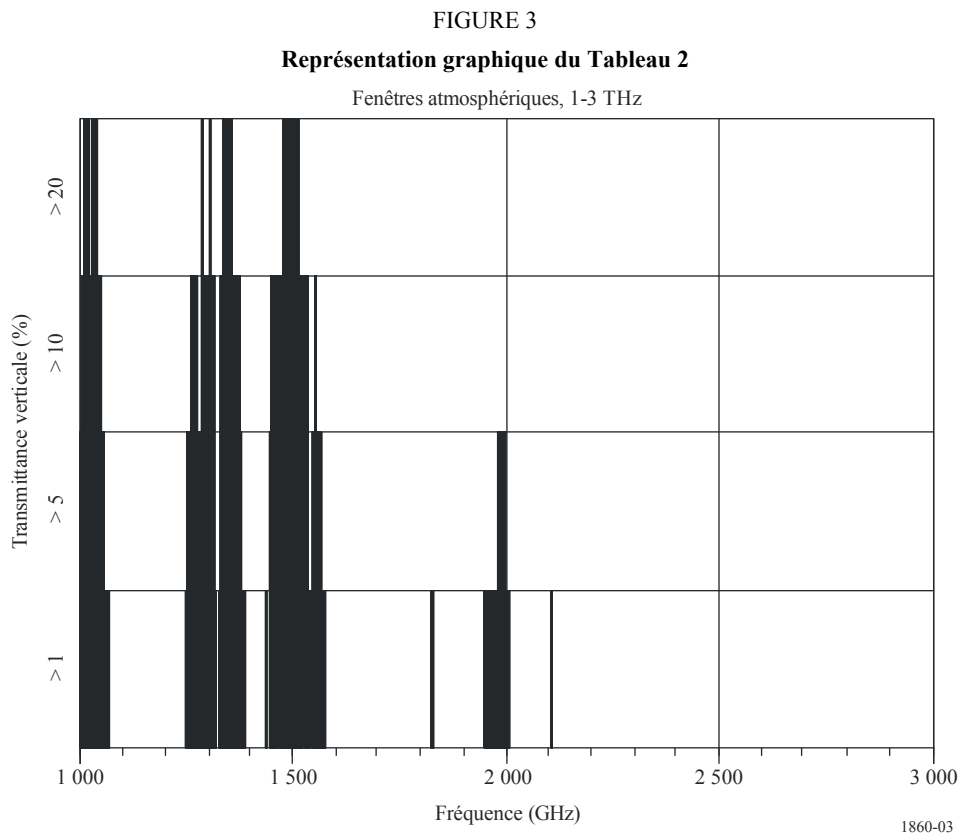


TABLEAU 2

Bandes de la Fig. 1 pour lesquelles la transmittance atmosphérique est égale ou dépasse la valeur spécifiée (GHz)

1%	5%	10%	20%
998,4-1 060,4	1 001,7-1 058,6	1 004,7-1 028,4 1 029,3-1 054,9	1 011,8-1 013,8 1 014,3-1 019,3 1 019,7-1 026,2 1 029,9-1 041,7
1 061,9-1 069,6	–	–	–
1 245,9-1 277,5	1 253,1-1 276,6	1 259,7-1 275,6	–
1 279,0-1 295,9	1 279,9-1 294,9	1 281,3-1 294,1	1 285,6-1 286,8 1 287,9-1 289,4
1 296,9-1 318,0	1 297,9-1 316,4	1 298,8-1 314,7	1 301,8-1 305,4
1 326,0-1 388,5	1 327,7-1 380,9	1 329,4-1 374,9	1 335,5-1 343,9 1 345,9-1 355,7 1 357,7-1 359,0
1 434,4-1 438,2	–	–	–
1 442,7-1 465,4	1 445,7-1 464,6	1 451,2-1 463,4	–
1 468,2-1 524,4	1 469,0-1 524,0	1 469,9-1 523,3	1 478,6-1 481,0 1 482,8-1 489,3 1 495,3-1 505,0 1 505,5-1 506,0 1 508,3-1 512,1
1 525,8-1 540,0	1 526,3-1 538,6	1 526,9-1 536,6	–
1 543,9-1 573,9	1 545,6-1 566,5 1 567,6-1 568,4	1 550,3-1 553,8	–
1 575,0-1 579,9	–	–	–
1 827,2-1 833,1	–	–	–
1 946,7-2 009,2	1 977,5-1 983,6 1 987,9-1 999,6	–	–
2 102,7-2 109,7	–	–	–



Compte tenu des bandes de fréquences pour lesquelles la transmittance atmosphérique sur un site d'observation astronomique de qualité dépasse 5% et permet donc de réaliser des observations pertinentes, les bandes minimales préconisées pour la protection des observations de radio astronomie réalisées à la surface de la Terre sont les suivantes:

TABLEAU 3
**Bandes minimales préconisées
pour la radio astronomie au sol**

1 000-1 060 GHz
1 250-1 320 GHz
1 325-1 385 GHz
1 445-1 540 GHz
1 545-1 570 GHz
1 975-2 000 GHz

En raison de l'affaiblissement atmosphérique excessif, même sur des sites d'observation au sol en atmosphère sèche et à haute altitude, l'utilisation des bandes de fréquences supérieures à 2 000 GHz pour la radio astronomie est limitée aux applications aéroportées et spatioportées.