

Union internationale des télécommunications

UIT-R

Secteur des Radiocommunications de l'UIT

Recommandation UIT-R P.676-11
(09/2016)

**Affaiblissement dû aux gaz
de l'atmosphère**

Série P
Propagation des ondes radioélectriques



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, 2017

© UIT 2017

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 P.676-11

Affaiblissement dû aux gaz de l'atmosphère

(Question UIT-R 201/3)

(1990-1992-1995-1997-1999-2001-2005-2007-2009-2012-2013-2016)

Domaine d'application

La présente Recommandation décrit des méthodes permettant d'évaluer l'affaiblissement dû aux gaz de l'atmosphère sur les trajets terrestres et les trajets obliques, en utilisant:

- a) une évaluation de l'affaiblissement dû aux gaz calculé par une sommation des contributions de chaque raie d'absorption dans la gamme de fréquences 1-1 000 GHz; et
- b) une méthode approximative simplifiée permettant d'évaluer l'affaiblissement dû aux gaz dans la gamme de fréquences 1-350 GHz.

Mots clés

Absorption par les gaz, affaiblissement le long d'un trajet oblique, affaiblissement linéique, affaiblissement total, air sec, oxygène, vapeur d'eau

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) qu'il est nécessaire d'évaluer l'affaiblissement dû aux gaz de l'atmosphère sur les trajets terrestres et les trajets obliques,

recommande

- 1 d'utiliser, pour les applications générales, la procédure de l'Annexe 1 pour calculer l'affaiblissement dû aux gaz de l'atmosphère aux fréquences allant jusqu'à 1 000 GHz;
- 2 d'utiliser la procédure donnée à l'Annexe 2, qui exige moins de calculs, pour une évaluation approchée de l'affaiblissement dû aux gaz de l'atmosphère aux fréquences comprises entre 1 et 350 GHz.

Guide concernant l'utilisation de la présente Recommandation

Le présente Recommandation propose les trois méthodes suivantes de prédiction de l'affaiblissement linéique et de l'affaiblissement sur un trajet dus à l'oxygène et à la vapeur d'eau:

- 1 Calcul de l'affaiblissement linéique et de l'affaiblissement sur un trajet dus aux gaz de l'atmosphère à l'aide de la sommation des contributions des raies d'absorption tel que présenté dans l'Annexe 1, en considérant la pression atmosphérique, la température et la concentration en vapeur d'eau en fonction de la hauteur.
- 2 Estimation approximative de l'affaiblissement linéique et de l'affaiblissement sur un trajet dus aux gaz de l'atmosphère présentée dans l'Annexe 2, en considérant la concentration en vapeur d'eau à la surface de la Terre.
- 3 Estimation approximative de l'affaiblissement sur un trajet présentée dans l'Annexe 2, en considérant la densité de vapeur d'eau intégrée le long du trajet.

Ces méthodes de prédiction peuvent exploiter des données météorologiques locales ou, en l'absence de données locales, des atmosphères de référence ou des cartes météorologiques correspondant à une probabilité de dépassement considérée, qui sont fournies dans d'autres Recommandations UIT-R de la série P.

Affaiblissement linéique

L'équation (1) de l'Annexe 1, qui est applicable aux fréquences allant jusqu'à 1 000 GHz, ou la somme des équations (22) et (23) de l'Annexe 2, qui est applicable aux fréquences allant jusqu'à 350 GHz, peuvent être utilisées pour prédire l'affaiblissement linéique. Les deux méthodes nécessitent de connaître la pression, la température et la concentration en vapeur d'eau à l'emplacement concerné. En l'absence de données locales disponibles, il est possible d'utiliser, au lieu de la concentration de référence en vapeur d'eau au niveau du sol de $7,5 \text{ g/m}^3$, une combinaison de: a) l'atmosphère de référence moyenne annuelle pour le monde entier définie dans la Recommandation UIT-R P.835, b) la carte de la température moyenne annuelle de surface fournie dans la Recommandation UIT-R P.1510, et c) les cartes de concentration en vapeur d'eau à la surface en fonction de la probabilité de dépassement fournies dans la Recommandation UIT-R P.836.

Affaiblissement le long d'un trajet oblique (Terre vers espace)

L'équation (20) de l'Annexe 1, ou les équations (28) et (29) de l'Annexe 2 peuvent être utilisées.

- L'utilisation de l'équation (20) de l'Annexe 1 nécessite de connaître les profils de température, de pression et de concentration en vapeur d'eau le long du trajet. En l'absence de données locales disponibles, on pourra utiliser les profils d'atmosphère de référence définis dans la Recommandation UIT-R P.835. La concentration en vapeur d'eau à la surface de la Terre en fonction de la probabilité de dépassement définie dans la Recommandation UIT-R P.836 pourra être utilisée au lieu de la concentration de référence en vapeur d'eau au niveau du sol de $7,5 \text{ g/m}^3$.
- L'utilisation de l'équation (28) de l'Annexe 2 nécessite de connaître la pression à la surface, la température à la surface, et la concentration en vapeur d'eau à la surface de la Terre. L'équation (28) de l'Annexe 2 est une approximation de l'équation (20) applicable aux fréquences allant jusqu'à 350 GHz, en considérant une atmosphère de référence moyenne annuelle pour le monde entier et une concentration en vapeur d'eau à la surface de la Terre arbitraire, avec un profil exponentiel négatif de concentration en vapeur d'eau en fonction de la hauteur. L'équation (28) de l'Annexe 2 peut être utilisée pour prédire: a) l'affaiblissement instantané dû aux gaz de l'atmosphère pour une valeur spécifique de pression à la surface, de température à la surface et de concentration en vapeur d'eau à la surface de la Terre, ou b) l'affaiblissement dû aux gaz de l'atmosphère correspondant à la concentration en vapeur d'eau à la surface de la Terre pour une probabilité de dépassement considérée. En l'absence de données locales de concentration en vapeur d'eau à la surface de la Terre disponibles, on pourra utiliser les cartes de la concentration en vapeur d'eau à la surface de la Terre fournies dans la Recommandation UIT-R P.836.
- L'utilisation de l'équation (29) de l'Annexe 2 nécessite de connaître la température à la surface, la pression à la surface, ainsi que la densité de vapeur d'eau intégrée sur le trajet. De manière analogue à l'équation (28) de l'Annexe 2, l'équation (29) de l'Annexe 2 peut être utilisée pour prédire: a) l'affaiblissement instantané dû aux gaz de l'atmosphère correspondant à une valeur spécifique de pression à la surface, de température à la surface et de densité de vapeur d'eau intégrée, ou b) l'affaiblissement dû aux gaz de l'atmosphère correspondant à la densité de vapeur d'eau intégrée pour une probabilité de dépassement considérée. En l'absence de données locales de densité de vapeur d'eau intégrée à la surface disponibles, on pourra utiliser les cartes de densité de vapeur d'eau intégrée fournies dans la Recommandation UIT-R P.836.

Si l'on a accès à la fois à des données locales de concentration en vapeur d'eau à la surface de la Terre et de densité de vapeur d'eau intégrée, on considère que l'équation (29) de l'Annexe 2 utilisant la densité de vapeur d'eau intégrée locale est plus précise que l'équation (28) de l'Annexe 2 utilisant des données locales de concentration en vapeur d'eau à la surface de la Terre. De la même manière, en

l'absence de données locales, on considère que l'équation (29) de l'Annexe 2 utilisant les cartes de densité de vapeur d'eau intégrée fournies dans la Recommandation UIT-R P.836 est plus précise que l'équation (28) de l'Annexe 2 utilisant les cartes de concentration en vapeur d'eau à la surface de la Terre fournies dans la Recommandation UIT-R P.836.

	Annexe 1 Equation (20)	Annexe 2 Equation (28)	Annexe 2 Equation (29)
Gamme de fréquences	$\leq 1\ 000$ GHz	≤ 350 GHz	
Précision	Maximale, sommation des contributions des raies d'absorption	Approximation	
Pression en fonction de la hauteur	Arbitraire	Profil atmosphérique annuel moyen de référence pour le monde entier	
Température en fonction de la hauteur			
Concentration en vapeur d'eau en fonction de la hauteur		Valeur à la surface avec un profil exponentiel négatif en fonction de la hauteur	Densité de vapeur d'eau intégrée au lieu de la concentration en vapeur d'eau en fonction de la hauteur

Annexe 1

Calcul de l'affaiblissement dû aux gaz de l'atmosphère par sommation des contributions des raies d'absorption

1 Affaiblissement linéique

La manière la plus précise d'évaluer l'affaiblissement linéique dû à l'air sec et à la vapeur d'eau aux fréquences allant jusqu'à 1 000 GHz et pour des valeurs quelconques de pression, de température et d'humidité est de faire une sommation des contributions de chaque raie de résonance de l'oxygène et de la vapeur d'eau et d'y ajouter de faibles facteurs supplémentaires correspondant à l'absorption de Debye non résonante par l'oxygène en dessous de 10 GHz, à l'affaiblissement induit par la pression de l'azote au-dessus de 100 GHz et à un spectre continu de la vapeur d'eau, qui permet de tenir compte du fait que les valeurs mesurées d'absorption par la vapeur d'eau sont supérieures aux valeurs prédites. La Figure 1 illustre l'affaiblissement linéique calculé par la méthode de prédiction tous les 1 GHz entre 0 et 1 000 GHz, pour une pression de 1 013,25 hPa, une température de 15° C, dans le cas d'une concentration en vapeur d'eau de 7,5 g/m³ (valeur normale) et dans le cas d'une atmosphère sèche (atmosphère sèche).

Au voisinage de 60 GHz, de nombreuses raies d'absorption de l'oxygène fusionnent, aux pressions existant au niveau de la mer, pour former une unique et large bande d'absorption, qui est illustrée avec plus de détails sur la Fig. 2. Cette Figure montre aussi l'affaiblissement par l'oxygène à des altitudes supérieures; plus la pression est faible au fur et à mesure que l'altitude augmente, plus la résolution des raies est importante. Certaines autres espèces moléculaires (par exemple isotopes de l'oxygène, états excités vibrationnellement de l'oxygène, ozone, isotopes de l'ozone, états excités vibrationnellement de l'ozone et d'autres espèces mineures) ne sont pas prises en compte dans la

méthode de prévision raie par raie. Ces raies supplémentaires ne sont pas significatives pour des atmosphères types mais elles peuvent être importantes pour une atmosphère sèche.

Pour une évaluation rapide et approchée de l'affaiblissement linéique à des fréquences allant jusqu'à 350 GHz dans les cas ne nécessitant pas une grande précision, on pourra utiliser les algorithmes simplifiés donnés à l'Annexe 2 pour des plages restreintes de conditions météorologiques.

L'affaiblissement linéique dû aux gaz de l'atmosphère est donné par la formule:

$$\gamma = \gamma_o + \gamma_w = 0,1820f \left(N''_{\text{Oxygène}}(f) + N''_{\text{Vapeur d'eau}}(f) \right) \quad (\text{dB/km}) \quad (1)$$

Ici, γ_o et γ_w sont les affaiblissements linéiques (dB/km) dus respectivement à l'air sec (affaiblissement par l'oxygène, affaiblissement induit par la pression de l'azote et absorption de Debye non résonante) et à la vapeur d'eau, f est la fréquence (GHz) et $N''_{\text{Oxygène}}(f)$ et $N''_{\text{Vapeur d'eau}}(f)$ sont les parties imaginaires des coïndices complexes, fonction de la fréquence:

$$N''_{\text{Oxygène}}(f) = \sum_i (\text{Oxygène}) S_i F_i + N''_D(f) \quad (2a)$$

$$N''_{\text{Vapeur d'eau}}(f) = \sum_i (\text{Vapeur d'eau}) S_i F_i \quad (2b)$$

S_i est le coefficient d'amplitude de la i ème raie de l'oxygène ou de la vapeur d'eau, F_i est son facteur de forme et les sommations portent sur toutes les raies indiquées dans les Tableaux 1 et 2;

$N''_D(f)$ est la contribution du spectre continu de l'air sec due à l'absorption induite par la pression de l'azote et au spectre de Debye telle qu'elle est donnée dans l'équation (8).

Le coefficient d'amplitude de la raie est donné par:

$$\begin{aligned} S_i &= a_1 \times 10^{-7} p \theta^3 \exp [a_2 (1 - \theta)] && \text{pour l'oxygène} \\ &= b_1 \times 10^{-1} e \theta^{3,5} \exp [b_2 (1 - \theta)] && \text{pour la vapeur d'eau} \end{aligned} \quad (3)$$

où:

p : pression de l'air sec (hPa)

e : pression partielle de la vapeur d'eau (hPa) (la pression barométrique totale étant $p_{\text{tot}} = p + e$)

$\theta = 300/T$

T : température (K).

FIGURE 1

Affaiblissement linéique dû aux gaz de l'atmosphère, calculé tous les 1 GHz, y compris les fréquences centrales des raies

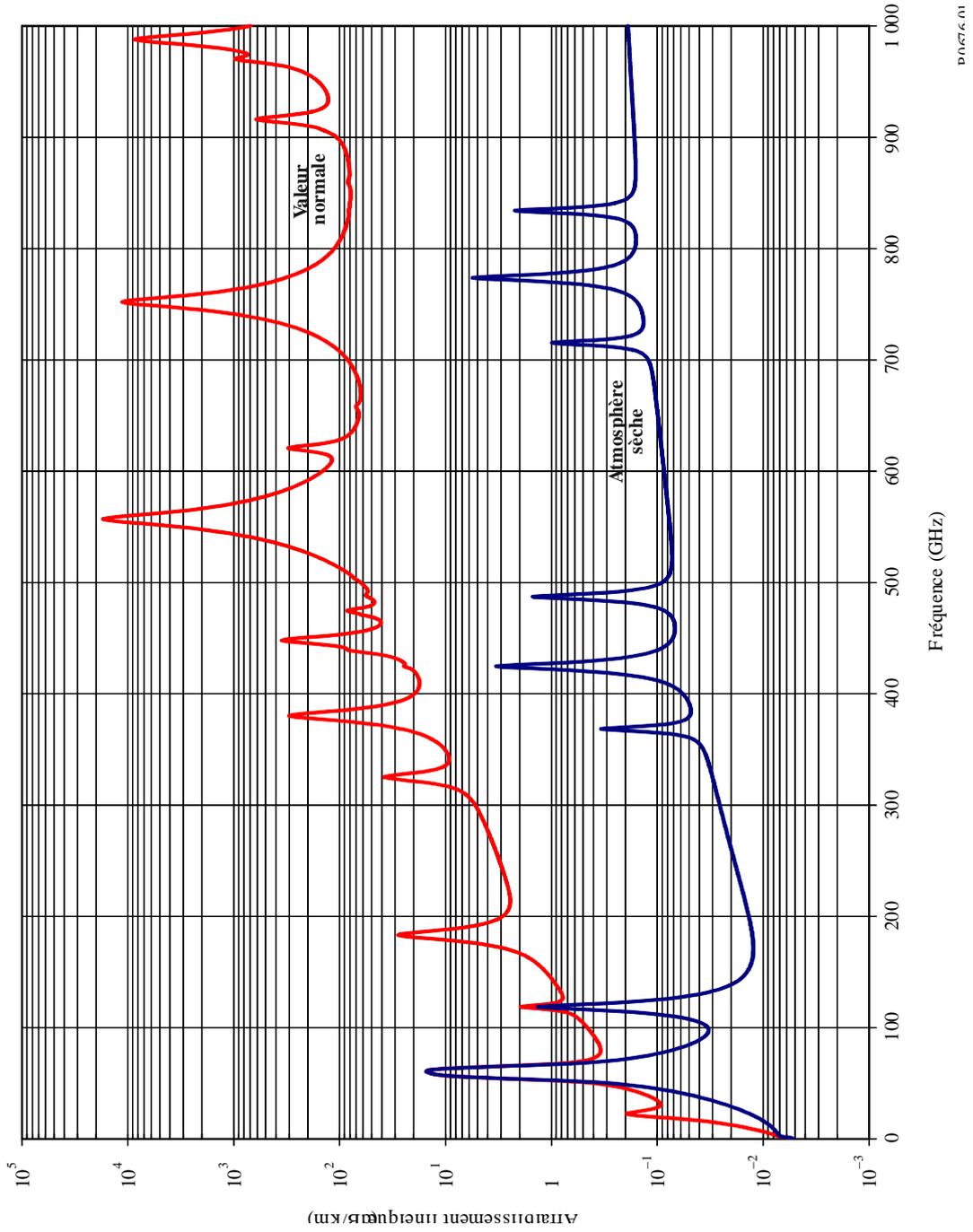
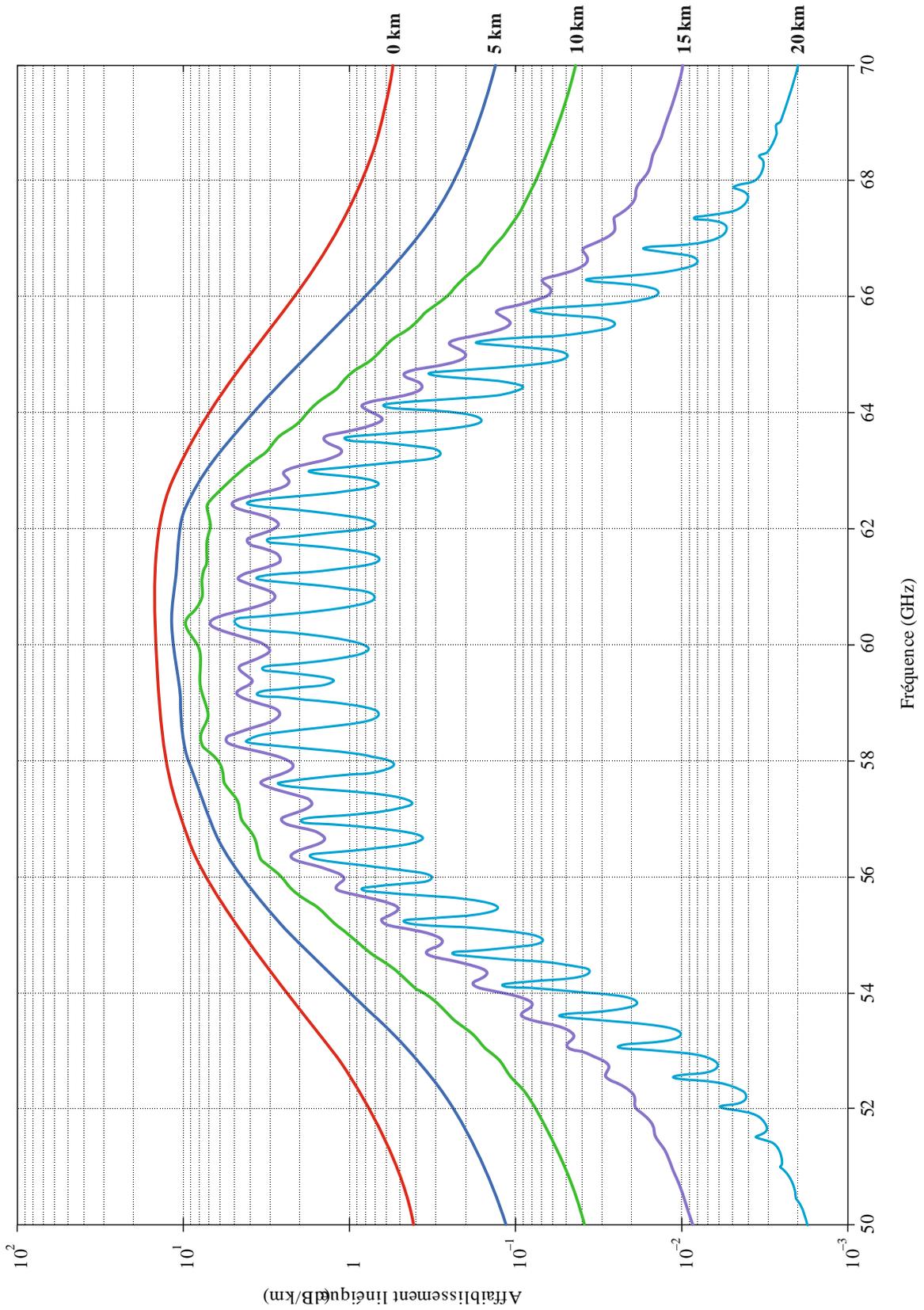


FIGURE 2

Affaiblissement linéique dans la gamme 50-70 GHz aux altitudes indiquées, calculé tous les 10 MHz, y compris les fréquences centrales (0 km, 5 km, 10 km, 15 km et 20 km)



S'ils sont disponibles, il convient d'utiliser les profils locaux de p , e , et T en fonction de l'altitude (obtenus au moyen de radiosondes par exemple). En l'absence d'informations locales, il convient d'utiliser une atmosphère de référence définie dans la Recommandation UIT-R P.835. (A noter que lorsqu'on calcule l'affaiblissement total dû aux gaz de l'atmosphère, on utilise la même pression partielle de la vapeur d'eau pour les affaiblissements dus à l'air sec et les affaiblissements dus à la vapeur d'eau.)

On peut obtenir la pression partielle de la vapeur d'eau, e , à une altitude donnée, à partir de la concentration en vapeur d'eau ρ , et la température, T , à cette altitude, par la formule:

$$e = \frac{\rho T}{216,7} \quad (4)$$

Le Tableau 1 fournit des données spectroscopiques pour l'oxygène, et le Tableau 2 fournit des données spectroscopiques pour la vapeur d'eau. La dernière entrée du Tableau 2 correspond à une pseudo-raie centrée sur 1 780 GHz, dont l'aile inférieure représente la contribution combinée en-dessous de 1 000 GHz des résonances de la vapeur d'eau non comprises dans la méthode de prédiction par sommation des contributions des raies d'absorption (c'est-à-dire le spectre continu de la vapeur d'eau). Les paramètres de la pseudo-raie sont ajustés pour tenir compte de la différence entre l'absorption mesurée dans les fenêtres atmosphériques et l'absorption calculée pour la raie au niveau local.

Le facteur de forme est donné par:

$$F_i = \frac{f}{f_i} \left[\frac{\Delta f - \delta (f_i - f)}{(f_i - f)^2 + \Delta f^2} + \frac{\Delta f - \delta (f_i + f)}{(f_i + f)^2 + \Delta f^2} \right] \quad (5)$$

où f_i est la fréquence de la raie de l'oxygène ou de la vapeur d'eau et Δf est sa largeur, donnée par:

$$\begin{aligned} \Delta f &= a_3 \times 10^{-4} (p \theta^{(0,8 - a_4)} + 1,1 e \theta) && \text{pour l'oxygène} \\ &= b_3 \times 10^{-4} (p \theta^{b_4} + b_5 e \theta^{b_6}) && \text{pour la vapeur d'eau} \end{aligned} \quad (6a)$$

La largeur de la raie Δf est modifiée pour tenir compte de l'effet Zeeman sur les raies de l'oxygène et de l'élargissement Doppler des raies de la vapeur d'eau:

$$\begin{aligned} \Delta f &= \sqrt{\Delta f^2 + 2,25 \times 10^{-6}} && \text{pour l'oxygène} \\ &= 0,535 \Delta f + \sqrt{0,217 \Delta f^2 + \frac{2,1316 \times 10^{-12} f_i^2}{\theta}} && \text{pour la vapeur d'eau} \end{aligned} \quad (6b)$$

δ est un facteur de correction qui résulte des effets d'interférences entre les raies de l'oxygène:

$$\begin{aligned} \delta &= (a_5 + a_6 \theta) \times 10^{-4} (p + e) \theta^{0,8} && \text{pour l'oxygène} \\ &= 0 && \text{pour la vapeur d'eau} \end{aligned} \quad (7)$$

TABLEAU 1

Données spectroscopiques pour l'affaiblissement par l'oxygène

f_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
50,474214	0,975	9,651	6,690	0,0	2,566	6,850
50,987745	2,529	8,653	7,170	0,0	2,246	6,800
51,503360	6,193	7,709	7,640	0,0	1,947	6,729
52,021429	14,320	6,819	8,110	0,0	1,667	6,640
52,542418	31,240	5,983	8,580	0,0	1,388	6,526
53,066934	64,290	5,201	9,060	0,0	1,349	6,206
53,595775	124,600	4,474	9,550	0,0	2,227	5,085
54,130025	227,300	3,800	9,960	0,0	3,170	3,750
54,671180	389,700	3,182	10,370	0,0	3,558	2,654
55,221384	627,100	2,618	10,890	0,0	2,560	2,952
55,783815	945,300	2,109	11,340	0,0	-1,172	6,135
56,264774	543,400	0,014	17,030	0,0	3,525	-0,978
56,363399	1331,800	1,654	11,890	0,0	-2,378	6,547
56,968211	1746,600	1,255	12,230	0,0	-3,545	6,451
57,612486	2120,100	0,910	12,620	0,0	-5,416	6,056
58,323877	2363,700	0,621	12,950	0,0	-1,932	0,436
58,446588	1442,100	0,083	14,910	0,0	6,768	-1,273
59,164204	2379,900	0,387	13,530	0,0	-6,561	2,309
59,590983	2090,700	0,207	14,080	0,0	6,957	-0,776
60,306056	2103,400	0,207	14,150	0,0	-6,395	0,699
60,434778	2438,000	0,386	13,390	0,0	6,342	-2,825
61,150562	2479,500	0,621	12,920	0,0	1,014	-0,584
61,800158	2275,900	0,910	12,630	0,0	5,014	-6,619
62,411220	1915,400	1,255	12,170	0,0	3,029	-6,759
62,486253	1503,000	0,083	15,130	0,0	-4,499	0,844
62,997984	1490,200	1,654	11,740	0,0	1,856	-6,675
63,568526	1078,000	2,108	11,340	0,0	0,658	-6,139
64,127775	728,700	2,617	10,880	0,0	-3,036	-2,895
64,678910	461,300	3,181	10,380	0,0	-3,968	-2,590
65,224078	274,000	3,800	9,960	0,0	-3,528	-3,680
65,764779	153,000	4,473	9,550	0,0	-2,548	-5,002
66,302096	80,400	5,200	9,060	0,0	-1,660	-6,091
66,836834	39,800	5,982	8,580	0,0	-1,680	-6,393
67,369601	18,560	6,818	8,110	0,0	-1,956	-6,475
67,900868	8,172	7,708	7,640	0,0	-2,216	-6,545
68,431006	3,397	8,652	7,170	0,0	-2,492	-6,600
68,960312	1,334	9,650	6,690	0,0	-2,773	-6,650
118,750334	940,300	0,010	16,640	0,0	-0,439	0,079

TABLEAU 1 (*fin*)

f_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
368,498246	67,400	0,048	16,400	0,0	0,000	0,000
424,763020	637,700	0,044	16,400	0,0	0,000	0,000
487,249273	237,400	0,049	16,000	0,0	0,000	0,000
715,392902	98,100	0,145	16,000	0,0	0,000	0,000
773,839490	572,300	0,141	16,200	0,0	0,000	0,000
834,145546	183,100	0,145	14,700	0,0	0,000	0,000

TABLEAU 2

Données spectroscopiques pour l'affaiblissement par la vapeur d'eau

f_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6
*22,235080	0,1079	2,144	26,38	0,76	5,087	1,00
67,803960	0,0011	8,732	28,58	0,69	4,930	0,82
119,995940	0,0007	8,353	29,48	0,70	4,780	0,79
*183,310087	2,273	0,668	29,06	0,77	5,022	0,85
*321,225630	0,0470	6,179	24,04	0,67	4,398	0,54
*325,152888	1,514	1,541	28,23	0,64	4,893	0,74
336,227764	0,0010	9,825	26,93	0,69	4,740	0,61
*380,197353	11,67	1,048	28,11	0,54	5,063	0,89
390,134508	0,0045	7,347	21,52	0,63	4,810	0,55
437,346667	0,0632	5,048	18,45	0,60	4,230	0,48
439,150807	0,9098	3,595	20,07	0,63	4,483	0,52
443,018343	0,1920	5,048	15,55	0,60	5,083	0,50
*448,001085	10,41	1,405	25,64	0,66	5,028	0,67
470,888999	0,3254	3,597	21,34	0,66	4,506	0,65
474,689092	1,260	2,379	23,20	0,65	4,804	0,64
488,490108	0,2529	2,852	25,86	0,69	5,201	0,72
503,568532	0,0372	6,731	16,12	0,61	3,980	0,43
504,482692	0,0124	6,731	16,12	0,61	4,010	0,45
547,676440	0,9785	0,158	26,00	0,70	4,500	1,00
552,020960	0,1840	0,158	26,00	0,70	4,500	1,00
*556,935985	497,0	0,159	30,86	0,69	4,552	1,00
620,700807	5,015	2,391	24,38	0,71	4,856	0,68
645,766085	0,0067	8,633	18,00	0,60	4,000	0,50
658,005280	0,2732	7,816	32,10	0,69	4,140	1,00
*752,033113	243,4	0,396	30,86	0,68	4,352	0,84
841,051732	0,0134	8,177	15,90	0,33	5,760	0,45
859,965698	0,1325	8,055	30,60	0,68	4,090	0,84

TABLEAU 2 (*fin*)

f_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6
899,303175	0,0547	7,914	29,85	0,68	4,530	0,90
902,611085	0,0386	8,429	28,65	0,70	5,100	0,95
906,205957	0,1836	5,110	24,08	0,70	4,700	0,53
916,171582	8,400	1,441	26,73	0,70	5,150	0,78
923,112692	0,0079	10,293	29,00	0,70	5,000	0,80
970,315022	9,009	1,919	25,50	0,64	4,940	0,67
987,926764	134,6	0,257	29,85	0,68	4,550	0,90
*1 780,000000	17506	0,952	196,3	2,00	24,15	5,00

Le terme de spectre continu de l'air sec résulte de l'absorption de Debye non résonante par l'oxygène en dessous de 10 GHz et d'un affaiblissement induit par des effets de pression de l'azote au-dessus de 100 GHz.

$$N_D''(f) = f p \theta^2 \left[\frac{6,14 \times 10^{-5}}{d \left[1 + \left(\frac{f}{d} \right)^2 \right]} + \frac{1,4 \times 10^{-12} p \theta^{1,5}}{1 + 1,9 \times 10^{-5} f^{1,5}} \right] \quad (8)$$

où d est le paramètre de largeur pour le spectre de Debye, donné par:

$$d = 5,6 \times 10^{-4} (p + e) \theta^{0,8} \quad (9)$$

2 Affaiblissement sur un trajet

2.1 Trajets terrestres

Dans le cas d'un trajet horizontal ou d'un trajet légèrement incliné proche du sol, l'affaiblissement, A , sur ce trajet, peut être calculé par la formule:

$$A = \gamma r_0 = (\gamma_o + \gamma_w) r_0 \text{ dB} \quad (10)$$

où r_0 est la longueur du trajet (km).

2.2 Trajets obliques

Ce paragraphe offre une méthode permettant d'intégrer l'affaiblissement linéique calculé par sommation des contributions des raies d'absorption (voir ci-dessus), pour différentes valeurs de pression, de température et d'humidité à travers l'atmosphère. Cette méthode permet de déterminer avec précision l'affaiblissement sur le trajet pour des systèmes de communication à configuration géométrique quelconque situés à l'intérieur et à l'extérieur de l'atmosphère terrestre simplement sur la base de la division de l'atmosphère en couches horizontales et de la spécification du profil des paramètres météorologiques de pression, de température et d'humidité le long du trajet. En l'absence de profils locaux, obtenus par exemple à partir de données provenant de radiosondes, on peut utiliser les atmosphères de référence définies dans la Recommandation UIT-R P.835, soit pour une

application mondiale soit pour une application à des sites de basse latitude (sur une année), de moyenne latitude (été et hiver) et de latitude élevée (été et hiver).

La Figure 3 montre l'affaiblissement en direction du zénith calculé tous les 1 GHz par cette méthode pour l'atmosphère de référence mondiale définie dans la Recommandation UIT-R P.835, avec des couches horizontales de 1 km d'épaisseur, l'affaiblissement représenté étant la somme des affaiblissements associés à chaque couche, dans le cas d'une atmosphère humide (valeur normale) et d'une atmosphère sèche (atmosphère sèche).

L'affaiblissement total le long d'un trajet oblique, $A(h, \varphi)$, à partir d'une station ayant une altitude h et un angle d'élévation φ , peut être calculé comme suit lorsque $\varphi \geq 0$:

$$A(h, \varphi) = \int_h^{\infty} \frac{\gamma(H)}{\sin \Phi} dH \quad (11)$$

où la valeur de Φ peut être déterminée comme suit sur la base de la loi de Snell en coordonnées polaires:

$$\Phi = \arccos \left(\frac{c}{(r+H) \times n(H)} \right) \quad (12)$$

où:

$$c = (r+h) \times n(h) \times \cos \varphi \quad (13)$$

où $n(h)$ est l'indice de réfraction radioélectrique atmosphérique, calculé au moyen des équations (1) et (2) de la Recommandation UIT-R P.453 à partir des données de pression, de température et de pression de vapeur d'eau le long du trajet (voir la Recommandation UIT-R P.835).

Lorsque $\varphi < 0$, il existe une hauteur minimale, h_{min} , à laquelle le faisceau radioélectrique devient parallèle à la surface de la Terre. On peut déterminer la valeur de h_{min} en résolvant l'équation transcendante suivante:

$$(r+h_{min}) \times n(h_{min}) = c \quad (14)$$

On peut résoudre facilement cette équation en réitérant le calcul suivant, avec $h_{min} = h$ comme valeur initiale:

$$h'_{min} = \frac{c}{n(h_{min})} - r \quad (15)$$

On peut donc obtenir l'affaiblissement $A(h, \varphi)$ comme suit:

$$A(h, \varphi) = \int_{h_{min}}^{\infty} \frac{\gamma(H)}{\sin \Phi} dH + \int_{h_{min}}^h \frac{\gamma(H)}{\sin \Phi} dH \quad (16)$$

En effectuant l'intégration des équations (11) et (16), on devra veiller au fait que l'expression à intégrer devient infinie lorsque $\Phi = 0$. Cette singularité peut toutefois être éliminée par une conversion de variable appropriée, par exemple si l'on utilise $u^4 = H - h$ dans l'équation (11) et $u^4 = H - h_{min}$ dans l'équation (16).

L'algorithme donné ci-après permet de conduire à une solution numérique pour l'affaiblissement dû aux gaz de l'atmosphère.

Pour calculer l'affaiblissement total pour une liaison par satellite, il faut connaître non seulement l'affaiblissement linéique en chaque point de la liaison mais aussi la longueur du trajet qui présente cet affaiblissement linéique. Pour déterminer la longueur du trajet, il faut aussi prendre en considération la courbure des rayons due à la sphéricité de la Terre.

Si on prend la Fig. 4 comme référence, a_n est la longueur du trajet à travers la couche n dont l'épaisseur vaut δ_n et l'indice de réfraction n_n . α_n et β_n sont les angles d'incidence entrant et sortant. r_n est le rayon entre le centre de la Terre et le début de la couche n . On peut exprimer a_n comme suit:

$$a_n = -r_n \cos \beta_n + \frac{1}{2} \sqrt{4 r_n^2 \cos^2 \beta_n + 8 r_n \delta_n + 4 \delta_n^2} \quad (17)$$

On peut calculer l'angle α_n au moyen de la formule:

$$\alpha_n = \pi - \arccos \left(\frac{-a_n^2 - 2 r_n \delta_n - \delta_n^2}{2 a_n r_n + 2 a_n \delta_n} \right) \quad (18)$$

β_1 est l'angle d'incidence au niveau de la station au sol (c'est le complément de l'angle d'élévation φ). On peut calculer β_{n+1} en fonction de α_n par la loi de Snell comme suit:

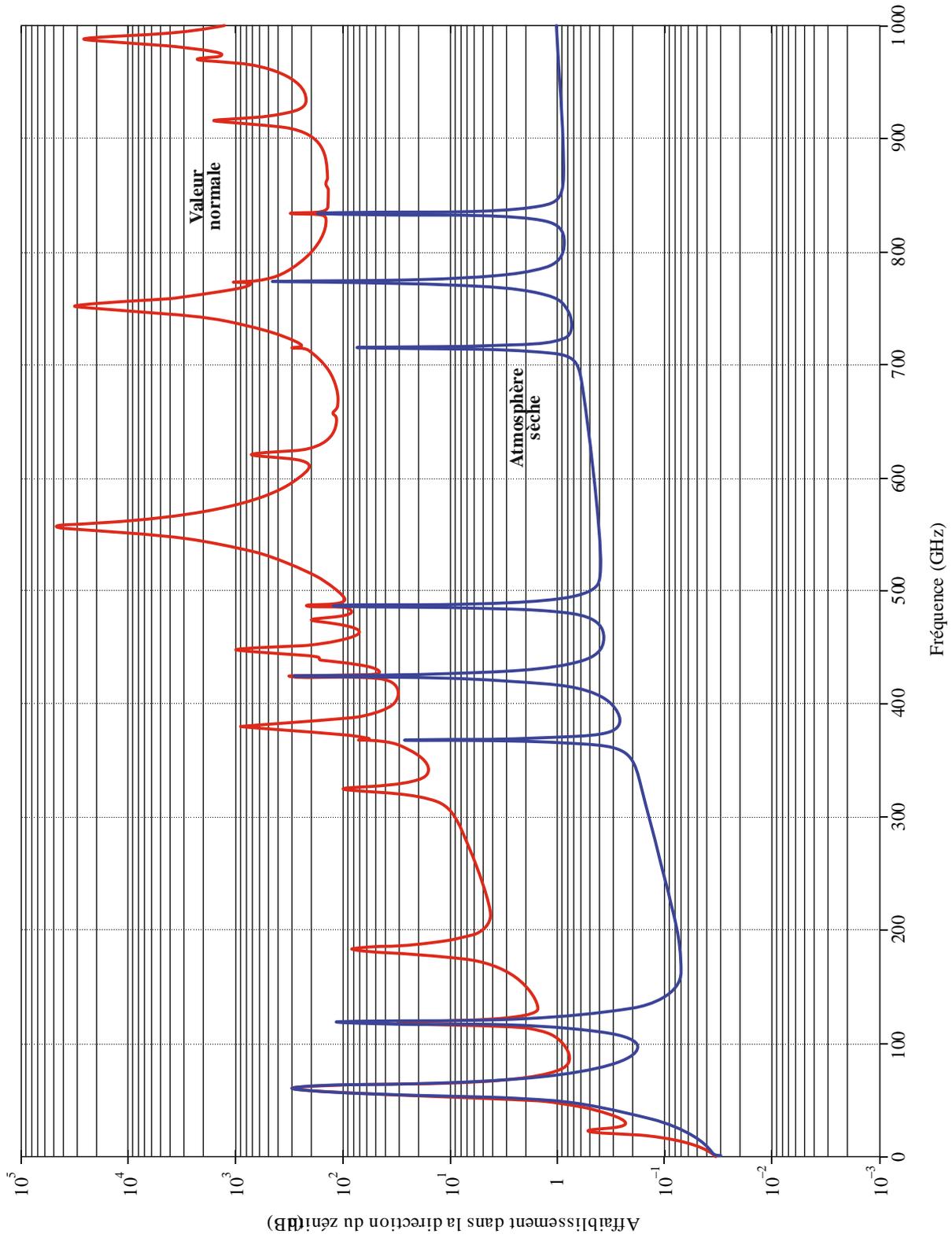
$$\beta_{n+1} = \arcsin \left(\frac{n_n}{n_{n+1}} \sin \alpha_n \right) \quad (19)$$

où n_n et n_{n+1} sont les indices de réfraction des couches n et $n + 1$.

L'équation (19) peut ne plus être valable pour des angles d'élévation très faibles ($\varphi < 1^\circ$) lorsqu'on utilise comme données d'entrée les données fournies par des radiosondes dans certaines régions du monde sensibles aux phénomènes de conduit. En pareil cas, il y a des couches de l'atmosphère pour lesquelles le gradient du coïndice est inférieur à -157 N/km et l'algorithme de tracé des rayons (équations (17) à (19)), qui est basé sur l'optique géométrique, n'est plus applicable. La fonction arcsinus dans l'équation (19) devient complexe dans ces conditions anormales étant donné que son argument est légèrement plus grand que 1. Il est à noter que l'équation (19) s'applique à tous les angles d'élévation lorsqu'on utilise en données d'entrée les atmosphères normalisées de référence définies dans la Recommandation UIT-R P.835, étant donné que ces atmosphères théoriques – pour lesquelles il n'y a pas manifestation de valeurs fortement négatives du gradient du coïndice – ne prennent pas en compte ces conditions de propagation anormales.

FIGURE 3

Affaiblissement dans la direction du zénith dû aux gaz de l'atmosphère, calculé tous les 1 GHz y compris les fréquences centrales des raies



P.0676-03

On peut déterminer l'affaiblissement total, A_{gaz} , au moyen de la formule:

$$A_{gaz} = \sum_{n=1}^k a_n \gamma_n \quad \text{dB} \quad (20)$$

où γ_n est l'affaiblissement linéique de la nième couche obtenu par la formule (1).

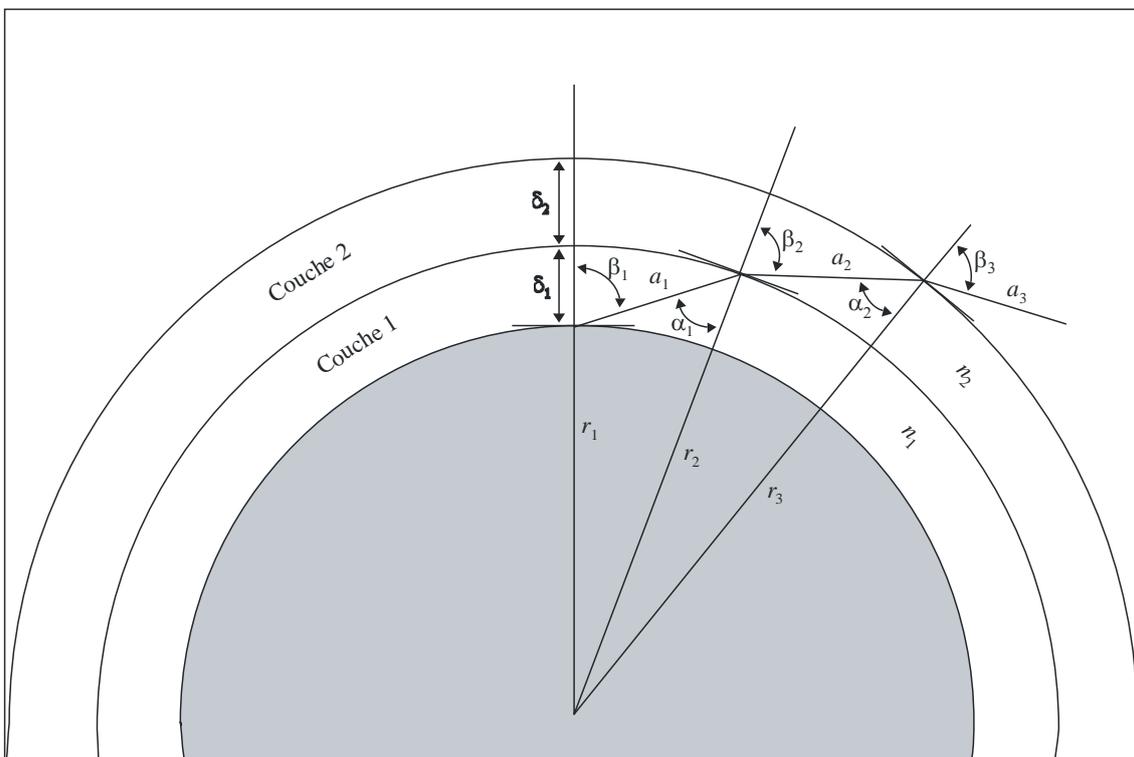
Pour garantir la précision de l'évaluation de l'affaiblissement, l'épaisseur des couches doit augmenter exponentiellement passant de 10 cm pour la couche inférieure (au niveau du sol) à 1 km à une altitude de 100 km, selon l'équation suivante:

$$\delta_i = 0,0001 \exp \left\{ \frac{i - 1}{100} \right\} \quad \text{km} \quad (21)$$

pour $i = 1$ à 922, sachant que $\delta_{922} \cong 1,0$ km et $\sum_{i=1}^{922} \delta_i \cong 100$ km.

Pour les applications Terre-espace, l'intégration doit être réalisée jusqu'à 30 km au moins, et jusqu'à 100 km pour les fréquences centrales des raies de l'oxygène.

FIGURE 4
Trajet dans l'atmosphère



3 Effets de la dispersion

En plus de l'affaiblissement décrit dans le paragraphe précédent, qui est basé sur la partie imaginaire du coïndice complexe, fonction de la fréquence, l'oxygène et la vapeur d'eau provoquent aussi une dispersion, qui est basée sur la partie réelle du coïndice complexe, fonction de la fréquence. Cet effet est décrit en termes de phase en fonction de la fréquence (degré/km) ou de temps de propagation de groupe en fonction de la fréquence (ps/km); tout comme l'affaiblissement, il peut être calculé pour les trajets obliques. Les effets de la dispersion sont évoqués dans le Chapitre 6 du Manuel sur la radiométéorologie de l'UIT-R, qui contient un modèle de calcul de la dispersion fondé sur la méthode de prédiction par sommation des contributions des raies d'absorption. Dans la pratique, les effets de la dispersion ne devraient pas imposer de contraintes sévères aux systèmes de communication de Terre fonctionnant en ondes millimétriques avec des largeurs de bande pouvant aller jusqu'à quelques centaines de MHz sur de courtes distances (par exemple, inférieures à environ 20 km), en particulier dans les fenêtres de propagation, aux fréquences éloignées des centres des principales raies d'absorption. Pour les systèmes de communication par satellite, comme les trajets à travers l'atmosphère sont longs, il faudra impérativement utiliser les fréquences situées dans les fenêtres de propagation, où l'affaiblissement dû aux gaz de l'atmosphère comme la dispersion correspondante sont faibles.

Annexe 2

Evaluation approchée de l'affaiblissement dû aux gaz de l'atmosphère dans la gamme de fréquences 1-350 GHz

La présente Annexe contient des algorithmes simplifiés pour des évaluations approchées de l'affaiblissement dû aux gaz de l'atmosphère pour une plage limitée de conditions météorologiques et une variété limitée de configurations géométriques.

1 Affaiblissement linéique

On peut évaluer l'affaiblissement linéique dû à l'air sec et à la vapeur d'eau, depuis le niveau de la mer jusqu'à une altitude de 10 km, au moyen des algorithmes simplifiés ci-après, qui sont fondés sur l'affaiblissement linéique dû à l'oxygène et à la vapeur d'eau obtenu par le calcul par sommation des contributions des raies d'absorption et sur les hauteurs équivalentes pour l'oxygène et la vapeur d'eau. Ces approximations sont très proches des résultats de la méthode de sommation des contributions des raies d'absorption. Cependant, pour les altitudes supérieures à 10 km et dans les cas nécessitant une plus grande précision, il convient d'utiliser la méthode de sommation des contributions des raies d'absorption.

L'affaiblissement linéique dû à l'air sec, γ_o (dB/km), et l'affaiblissement linéique dû à l'air humide, γ_w (dB/km), sont donnés par les formules suivantes:

$$\gamma_o = 0,1820 f \left(\sum_{i(\text{Oxygène})} S_i F_i + N_D''(f) \right) \quad (22)$$

$$\gamma_w = 0,1820 f \sum_{i(\text{Vapeur d'eau})} S_i F_i \quad (23)$$

où S_i , F_i et $N_D''(f)$ sont définis dans les équations (3), (5), (6a), (7), (8), et (9) pour l'oxygène, et où S_i et F_i sont définis dans les équations (3), (4), (5), (6a), et (7) pour la vapeur d'eau. L'équation (6b)

n'est pas utilisée puisqu'il n'est pas nécessaire de tenir compte de l'effet Zeeman sur les raies de l'oxygène ni de l'élargissement Doppler des raies de la vapeur d'eau à des altitudes inférieures à 10 km. La sommation pour l'oxygène se fait sur toutes les raies de l'oxygène du Tableau 1, et la sommation pour la vapeur d'eau se fait sur le sous-ensemble de neuf raies de la vapeur d'eau du Tableau 2 signalées par un astérisque.

La pression sèche, p , et la température, T , correspondent à la pression sèche et à la température à la surface de la Terre. En l'absence de données locales disponibles, l'atmosphère de référence moyenne annuelle pour le monde entier définie dans la Recommandation UIT-R P.835 peut être utilisée pour déterminer la pression sèche et la température à l'altitude de la surface de la Terre.

La Figure 5 montre l'affaiblissement linéique pour l'air sec (air sec), l'affaiblissement linéique pour la vapeur d'eau avec une concentration de $7,5 \text{ g/m}^3$ seulement (vapeur d'eau), et l'affaiblissement linéique total (total) entre 1 et 350 GHz au niveau de la mer pour l'atmosphère de référence moyenne annuelle pour le monde entier définie dans la Recommandation UIT-R P.835.

2 Affaiblissement sur un trajet

2.1 Trajets terrestres

Dans le cas d'un trajet horizontal ou d'un trajet légèrement incliné proche du sol, l'affaiblissement sur ce trajet, A , peut être calculé par la formule:

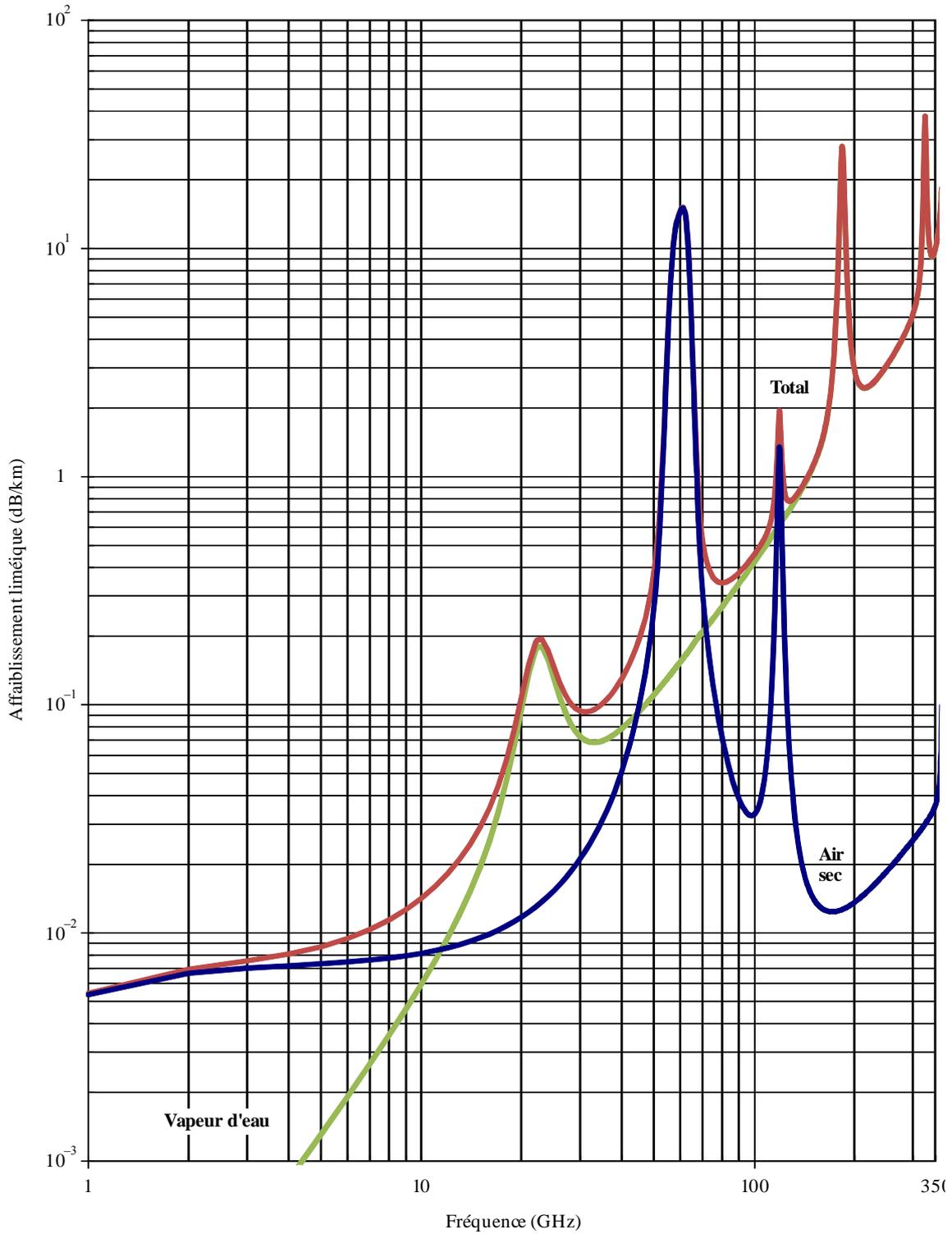
$$A = \gamma r_0 = (\gamma_o + \gamma_w) r_0 \quad \text{dB} \quad (24)$$

où r_0 est la longueur du trajet (km).

FIGURE 5

Affaiblissement linéique dû aux gaz de l'atmosphère

(Pression = 1 013,25 hPa; Température = 15°C; Concentration en vapeur d'eau = 7,5 g/m³)



P.676-11

2.2 Trajets obliques

Ce paragraphe contient des algorithmes simplifiés pour le calcul de l'affaiblissement dû aux gaz de l'atmosphère le long de trajets obliques à travers l'atmosphère terrestre; ils sont fondés sur la définition d'une hauteur équivalente par laquelle on peut multiplier l'affaiblissement linéique calculé au

paragraphe 1 pour obtenir l'affaiblissement sur le trajet dans la direction du zénith. Les hauteurs équivalentes dépendent de la pression et peuvent donc être utilisées pour déterminer l'affaiblissement dans la direction du zénith depuis le niveau de la mer jusqu'à une altitude d'environ 10 km. Les affaiblissements ainsi obtenus ont une précision de $\pm 10\%$ pour l'air sec et de $\pm 5\%$ pour la vapeur d'eau par rapport au niveau de la mer jusqu'à des altitudes d'environ 10 km sur la base de la pression, de la température et de la densité de vapeur d'eau correspondant à l'altitude visée. Pour des altitudes supérieures à 10 km et, en particulier, pour des fréquences situées à moins de 0,5 GHz des fréquences centrales des raies de résonance à toute altitude, il convient d'appliquer la procédure de l'Annexe 1. A noter que la fonction gaussienne dans la formule (25b), qui décrit la hauteur équivalente pour l'oxygène dans la bande des 60 GHz peut donner lieu à des taux d'erreur supérieurs à 10% sur certaines fréquences, étant donné que cette procédure n'a pas pour but de reproduire précisément la structure indiquée dans la Fig. 7. Les formules ci-dessous ont été obtenues à partir des valeurs de l'affaiblissement dans la direction du zénith calculées avec la procédure décrite dans l'Annexe 1, par intégration numérique des affaiblissements dans une largeur de bande de 500 MHz. Les valeurs de l'affaiblissement ainsi obtenues représentent dans la pratique des valeurs minimales approchées dans la bande des 50-70 GHz. Pour les directions autres que celle du zénith, on peut déterminer l'affaiblissement sur le trajet au moyen des procédures décrites plus bas dans le présent paragraphe.

Pour l'air sec, la hauteur équivalente est donnée par:

$$h_o = \frac{6,1}{1 + 0,17r_p^{-1,1}} (1 + t_1 + t_2 + t_3) \quad (25a)$$

où:

$$t_1 = \frac{4,64}{1 + 0,066 r_p^{-2,3}} \exp \left[- \left(\frac{f - 59,7}{2,87 + 12,4 \exp(-7,9 r_p)} \right)^2 \right] \quad (25b)$$

$$t_2 = \frac{0,14 \exp(2,12 r_p)}{(f - 118,75)^2 + 0,031 \exp(2,2 r_p)} \quad (25c)$$

$$t_3 = \frac{0,0114}{1 + 0,14 r_p^{-2,6}} f \frac{-0,0247 + 0,0001f + 1,61 \times 10^{-6} f^2}{1 - 0,0169f + 4,1 \times 10^{-5} f^2 + 3,2 \times 10^{-7} f^3} \quad (25d)$$

moyennant la contrainte suivante:

$$h_o \leq 10,7 r_p^{0,3} \quad \text{lorsque } f < 70 \text{ GHz} \quad (25e)$$

et, pour la vapeur d'eau, la hauteur équivalente est:

$$h_w = 1,66 \left(1 + \frac{1,39\sigma_w}{(f - 22,235)^2 + 2,56\sigma_w} + \frac{3,37\sigma_w}{(f - 183,31)^2 + 4,69\sigma_w} + \frac{1,58\sigma_w}{(f - 325,1)^2 + 2,89\sigma_w} \right) \quad (26a)$$

pour $f \leq 350$ GHz

$$\sigma_w = \frac{1,013}{1 + \exp[-8,6(r_p - 0,57)]} \quad (26b)$$

où

$$r_p = (p + e)/1013,25$$

L'affaiblissement en direction du zénith entre 50 et 70 GHz est une fonction compliquée de la fréquence, comme indiqué à la Fig. 7, et les algorithmes ci-dessus pour une hauteur équivalente ne permettent, en général, qu'un calcul approximatif des niveaux minimums d'affaiblissement susceptibles d'être trouvés dans cette gamme de fréquences. Pour obtenir une plus grande précision, il convient d'appliquer la procédure prévue à l'Annexe 1.

La notion de hauteur équivalente s'appuie sur l'hypothèse d'une atmosphère exponentielle spécifiée par une hauteur d'échelle pour décrire la décroissance de la concentration en fonction de l'altitude. Il convient de noter que les hauteurs d'échelle aussi bien pour l'air sec que pour la vapeur d'eau peuvent varier avec la latitude, la saison et/ou le climat, et que les répartitions de la vapeur d'eau dans l'atmosphère réelle peuvent s'écarter considérablement du profil exponentiel, les hauteurs équivalentes étant alors modifiées en conséquence. Les valeurs indiquées au-dessus sont applicables jusqu'à des altitudes de 10 km environ.

L'affaiblissement total dans la direction du zénith est alors:

$$A = \gamma_o h_o + \gamma_w h_w \quad \text{dB} \quad (27)$$

La Figure 6 montre l'affaiblissement total dans la direction du zénith au niveau de la mer (total) ainsi que l'affaiblissement dû à l'air sec (air sec) et à la vapeur d'eau (vapeur d'eau), pour l'atmosphère de référence moyenne annuelle pour le monde entier définie dans la Recommandation UIT-R P.835. Entre 50 et 70 GHz, on peut obtenir une plus grande précision à partir de la courbe notée 0 km de la Fig. 7, qui a été obtenue par la méthode de sommation des contributions des raies d'absorption décrite dans l'Annexe 1.

2.2.1 Angles d'élévation compris entre 5° et 90°

2.2.1.1 Trajets Terre vers espace

Pour un angle, φ , d'élévation compris entre 5° et 90°, on obtient l'affaiblissement sur un trajet en faisant intervenir une loi en cosécante comme suit:

Pour l'affaiblissement sur un trajet basé sur des données météorologiques de surface:

$$A = \frac{A_o + A_w}{\sin \varphi} \quad \text{dB} \quad (28)$$

où $A_o = h_o \gamma_o$ et $A_w = h_w \gamma_w$

Pour l'affaiblissement sur un trajet basé sur la densité de vapeur d'eau intégrée:

$$A = \frac{A_o + A_w}{\sin \varphi} \quad \text{dB} \quad (29)$$

où A_w est donné au § 2.3.

2.2.1.2 Trajets inclinés

Pour déterminer les valeurs de l'affaiblissement sur un trajet incliné entre une station située à l'altitude h_1 et une autre station située à une altitude supérieure h_2 , lorsque les deux altitudes sont inférieures à 10 km au-dessus du niveau moyen de la mer, il convient de remplacer dans l'équation (28) les valeurs h_o et h_w respectivement par les valeurs h'_o et h'_w suivantes:

$$h'_o = h_o \left[e^{-h_1/h_o} - e^{-h_2/h_o} \right] \quad \text{km} \quad (30)$$

$$h'_w = h_w \left[e^{-h_1/h_w} - e^{-h_2/h_w} \right] \quad \text{km} \quad (31)$$

étant bien entendu que la valeur ρ de la concentration en vapeur d'eau utilisée dans la formule (23) est la valeur hypothétique au niveau de la mer calculée comme suit:

$$\rho = \rho_1 \times \exp(h_1/2) \quad (32)$$

où ρ_1 est la valeur correspondant à l'altitude h_1 de la station en question et la hauteur équivalente pour la vapeur d'eau est supposée être de 2 km (voir la Recommandation UIT-R P.835).

Les équations (30), (31) et (32) utilisent des normalisations différentes pour les hauteurs équivalentes en air sec et en vapeur d'eau. Tandis que l'on peut considérer la pression atmosphérique moyenne par rapport au niveau de la mer comme constante dans le monde entier (c'est-à-dire égale à 1 013,25 hPa), la concentration en vapeur d'eau non seulement possède une large étendue de variabilité climatique mais est mesurée au sol (c'est-à-dire à l'altitude de la station au sol). Pour les valeurs de concentration en vapeur d'eau mesurées au niveau du sol, voir la Recommandation UIT-R P.836.

2.2.2 Angles d'élévation compris entre 0° et 5°

2.2.2.1 Trajets Terre vers espace

Dans ce cas, il convient d'appliquer les dispositions de l'Annexe 1 de la présente Recommandation. Cette Annexe doit également être utilisée pour des angles d'élévation inférieurs à zéro.

2.2.2.2 Trajets inclinés

L'affaiblissement sur un trajet incliné entre une station située à une altitude h_1 et une altitude supérieure h_2 (lorsque les deux altitudes sont inférieures à 10 km au-dessus du niveau moyen de la mer), peut être déterminé au moyen de l'équation suivante:

$$A = \gamma_o \sqrt{h_o} \left[\frac{\sqrt{R_e + h_1} \cdot F(x_1) e^{-h_1/h_o}}{\cos \varphi_1} - \frac{\sqrt{R_e + h_2} \cdot F(x_2) e^{-h_2/h_o}}{\cos \varphi_2} \right] \\ + \gamma_w \sqrt{h_w} \left[\frac{\sqrt{R_e + h_1} \cdot F(x'_1) e^{-h_1/h_w}}{\cos \varphi_1} - \frac{\sqrt{R_e + h_2} \cdot F(x'_2) e^{-h_2/h_w}}{\cos \varphi_2} \right] \quad \text{dB} \quad (33)$$

où:

R_e : rayon équivalent de la Terre comprenant la réfraction, donné dans la Recommandation UIT-R P.834, exprimé en km (une valeur de 8 500 km est généralement acceptable dans le voisinage immédiat de la surface de la Terre)

φ_1 : angle d'élévation à l'altitude h_1

F: fonction définie par:

$$F(x) = \frac{1}{0,661 x + 0,339 \sqrt{x^2 + 5,51}} \quad (34)$$

$$\varphi_2 = \arccos \left(\frac{R_e + h_1}{R_e + h_2} \cos \varphi_1 \right) \quad (35a)$$

$$x_i = \operatorname{tg} \varphi_i \sqrt{\frac{R_e + h_i}{h_o}} \quad \text{pour } i = 1, 2 \quad (35b)$$

$$x'_i = \operatorname{tg} \varphi_i \sqrt{\frac{R_e + h_i}{h_w}} \quad \text{pour } i = 1, 2 \quad (35c)$$

étant bien entendu que la valeur ρ de la concentration en vapeur d'eau utilisée dans la formule (23) est la valeur hypothétique au niveau de la mer calculée comme suit:

$$\rho = \rho_1 \cdot \exp(h_1 / 2) \quad (36)$$

où ρ_1 est la valeur correspondant à l'altitude h_1 de la station en question et la hauteur équivalente pour la vapeur d'eau est supposée être égale à 2 km (voir la Recommandation UIT-R P.835).

FIGURE 6

Affaiblissement total et affaiblissement dû à l'air sec et à la vapeur d'eau
au niveau de la mer dans la direction du zénith

(Pression = 1 013,25 hPa; Température = 15°C; Concentration en vapeur d'eau = 7,5 g/m³)

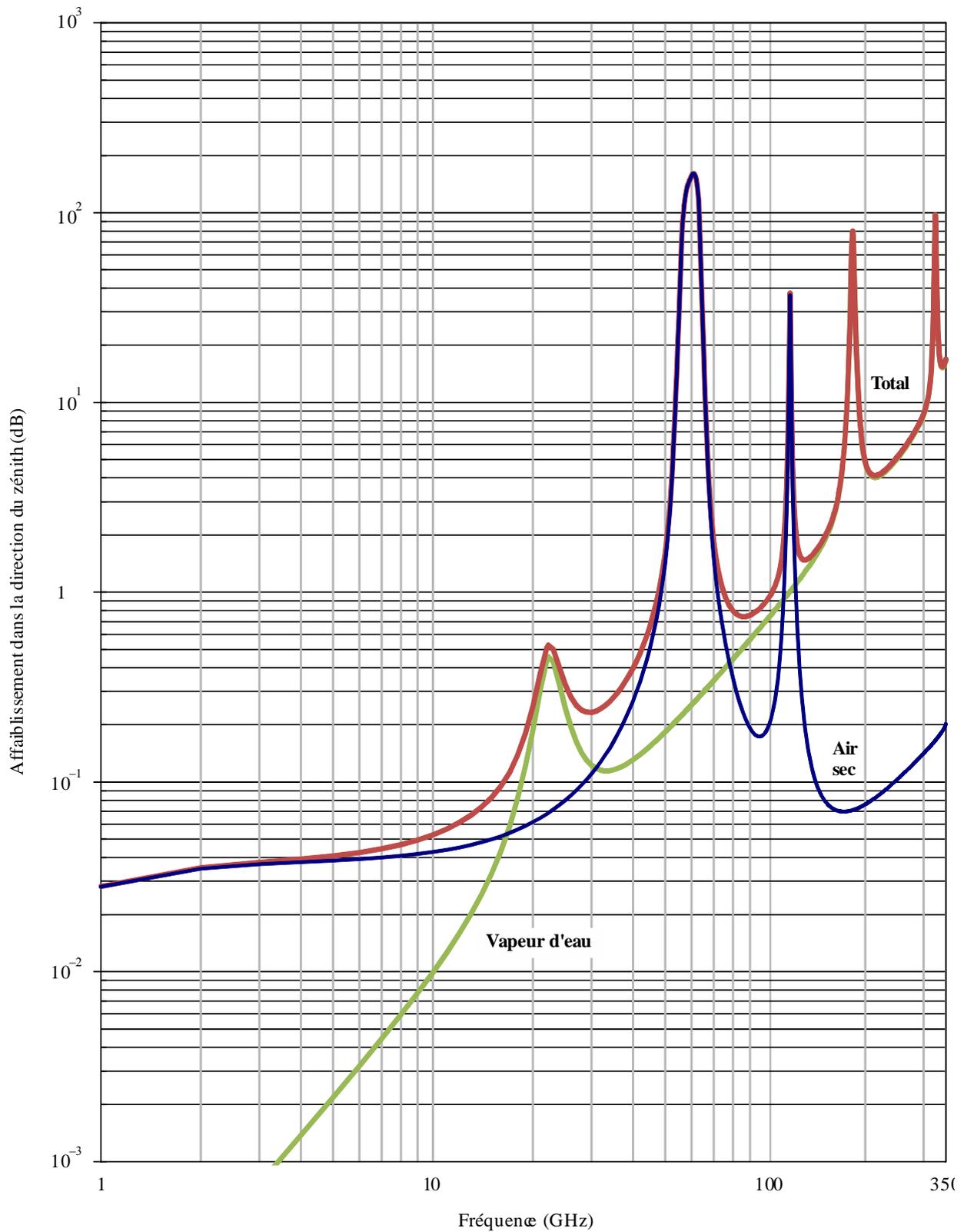
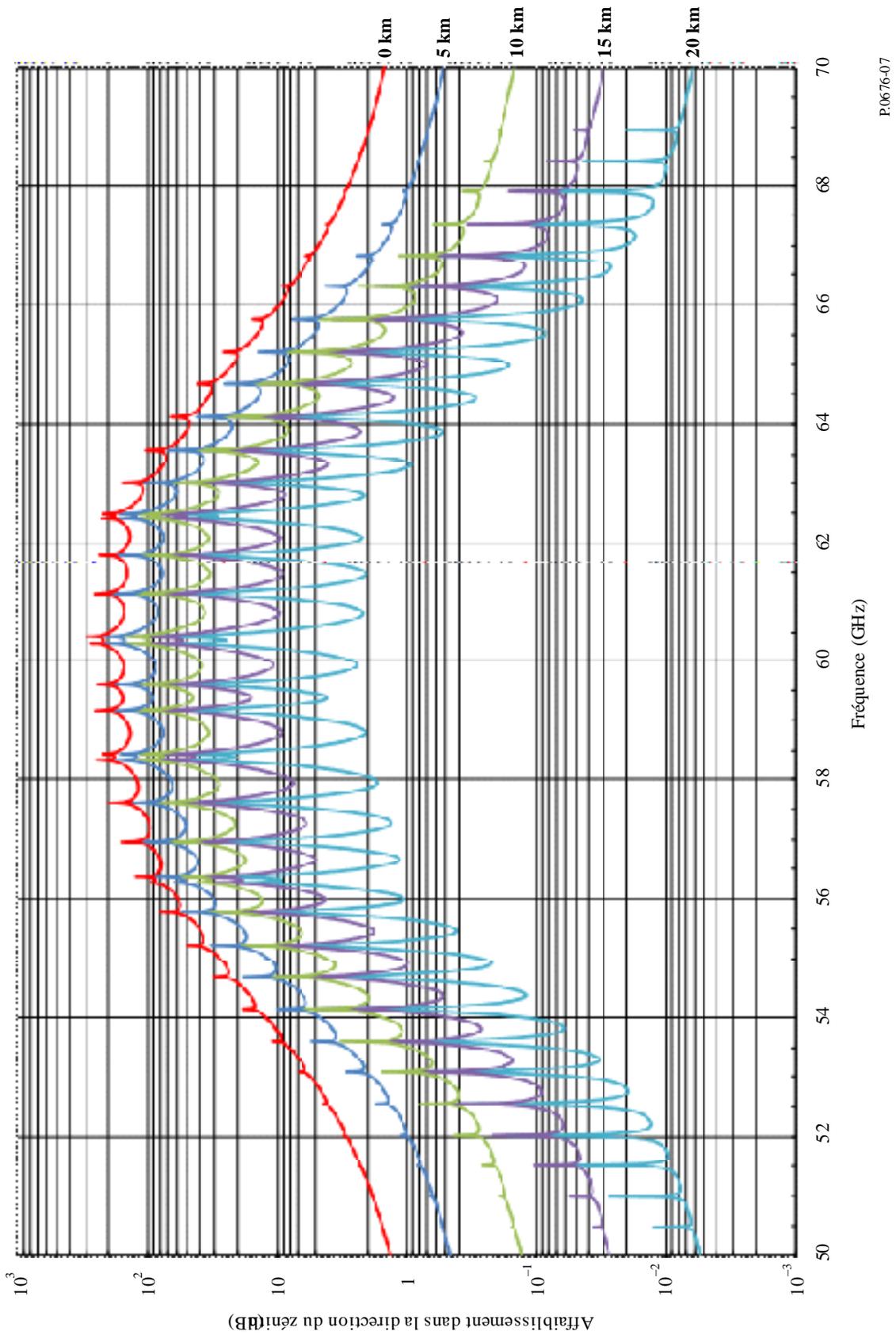


FIGURE 7

Affaiblissement dû à l'oxygène dans la direction du zénith à partir des altitudes indiquées, calculé tous les 10 MHz, y compris les fréquences centrales des raies (0 km, 5 km, 10 km, 15 km et 20 km)



P.0676-07

Les valeurs de ρ_1 mesurées au niveau du sol peuvent être consultées dans la Recommandation UIT-R P.836. Les différences de formulation pour l'air sec et la vapeur d'eau sont expliquées au § 2.2.2.2.

2.3 Affaiblissement dû à la vapeur d'eau sur les trajets obliques

La méthode ci-dessus de calcul de l'affaiblissement sur les trajets obliques repose sur la connaissance de la concentration en vapeur d'eau à la surface de la Terre. Si on connaît la densité de vapeur d'eau intégrée, V_t , on peut exprimer comme suit l'affaiblissement total dû à la vapeur d'eau:

$$A_w = \begin{cases} \frac{0,0176 V_t \gamma_w(f, p_{ref}, \rho_{v,ref}, t_{ref})}{\gamma_w(f_{ref}, p_{ref}, \rho_{v,ref}, t_{ref})}, & 1 \text{ GHz} \leq f \leq 20 \text{ GHz} \\ \frac{0,0176 V_t \gamma_w(f, p_{ref}, \rho_{v,ref}, t_{ref})}{\gamma_w(f_{ref}, p_{ref}, \rho_{v,ref}, t_{ref})} (ah^b + 1), & 20 \text{ GHz} < f \leq 350 \text{ GHz} \end{cases} \quad \text{dB} \quad (37)$$

où:

$$\begin{aligned} a &= 0,2048 \exp \left[- \left(\frac{f-22,43}{3,097} \right)^2 \right] + 0,2326 \exp \left[- \left(\frac{f-183,5}{4,096} \right)^2 \right] \\ &\quad + 0,2073 \exp \left[- \left(\frac{f-325}{3,651} \right)^2 \right] - 0,113 \\ b &= 8,741 \times 10^4 \exp(-0,587f) + 312,2f^{-2,38} + 0,723 \\ h &= \begin{cases} h_s & h_s \leq 4 \text{ km} \\ 4 & h_s > 4 \text{ km} \end{cases} \end{aligned}$$

et

f : fréquence (GHz)

f_{ref} : 20,6 (GHz)

p_{ref} = 815 (hPa)

$\rho_{v,ref}$ = $\frac{V_t}{3,67}$ (g/m³)

t_{ref} = $14 \ln \left(\frac{0,22 V_t}{3,67} \right) + 3$ (°C)

V_t : densité de vapeur d'eau intégrée: a) obtenue à partir de radiosondes locales ou de données radiométriques, ou b) obtenue, pour le pourcentage de temps nécessaire (kg/m² ou mm), à partir des cartes numériques fournies dans la Recommandation UIT-R P.836 (kg/m² ou mm)

$\gamma_w(f, p, \rho, t)$: affaiblissement linéique en fonction de la fréquence, de la pression, de la densité de vapeur d'eau et de la température, calculé à partir de la formule (23) (dB/km)

h_s : altitude de la station au-dessus du niveau moyen de la mer (km).