

## RECOMMANDATION UIT-R P.835-4

**Atmosphère de référence pour l'affaiblissement dû aux gaz**

(Question UIT-R 201/3)

(1992-1994-1997-1999-2005)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

*considérant*

a) qu'il est nécessaire de disposer d'une atmosphère de référence pour calculer l'affaiblissement dû aux gaz sur un trajet Terre vers espace,

*recommande*

**1** que l'on utilise les atmosphères de référence définies dans l'Annexe 1 pour déterminer la température, la pression et la pression partielle de vapeur d'eau en fonction de l'altitude, dans le calcul de l'affaiblissement dû aux gaz, quand des données locales plus fiables ne sont pas disponibles,

**2** que l'on utilise les données expérimentales fournies dans les Annexes 2 et 3 pour les points considérés quand on a besoin de connaître les variations saisonnières ou mensuelles.

**Annexe 1****1 Atmosphère de référence moyenne annuelle pour le monde entier**

L'atmosphère de référence définie ci-après correspond aux profils moyens annuels, la moyenne étant faite sur tout le globe.

**1.1 Température et pression**

La définition de l'atmosphère de référence est fondée sur le modèle de l'United States Standard Atmosphere, 1976, dans lequel l'atmosphère est divisée en sept couches successives présentant une variation linéaire en fonction de la température, comme le montre la Fig. 1.

La température  $T$  à l'altitude  $h$  est donc donnée par:

$$T(h) = T_i + L_i (h - H_i) \quad \text{K} \quad (1)$$

où:

$$T_i = T(H_i) \quad (2)$$

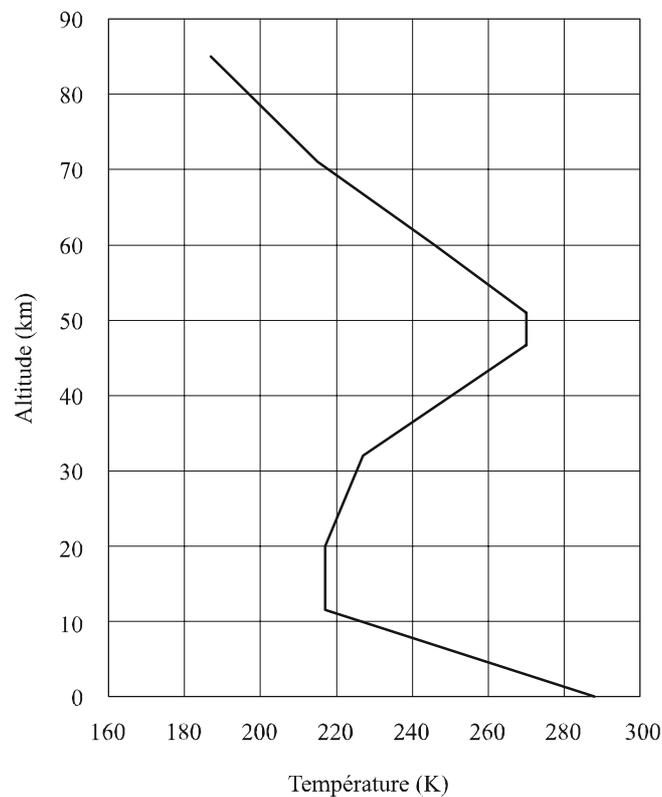
et  $L_i$  est le gradient de température à partir de l'altitude  $H_i$ , donné dans le Tableau 1.

TABLEAU 1

Indice, $i$	Altitude, $H_i$ (km)	Gradient de température, $L_i$ (K/km)
0	0	-6,5
1	11	0,0
2	20	+1,0
3	32	+2,8
4	47	0,0
5	51	-2,8
6	71	-2,0
7	85	

FIGURE 1

## Profil de référence de la température atmosphérique



0835-01

Lorsque le gradient de température  $L_i \neq 0$ , la pression est donnée par l'équation:

$$P(h) = P_i \left[ \frac{T_i}{T_i + L_i(h - H_i)} \right]^{34,163/L_i} \quad \text{hPa} \quad (3)$$

et lorsque le gradient de température  $L_i = 0$ , on obtient la pression par l'équation:

$$P(h) = P_i \exp \left[ \frac{-34,163(h - H_i)}{T_i} \right] \quad \text{hPa} \quad (4)$$

La température et la pression normalisées au niveau du sol sont:

$$\begin{aligned} T_0 &= 288,15 && \text{K} \\ P_0 &= 1013,25 && \text{hPa} \end{aligned} \quad (5)$$

Il faut noter que, au-dessus d'une altitude d'environ 85 km, l'atmosphère commence à ne plus être en équilibre thermodynamique local et l'équation hydrostatique sur laquelle se fondent les équations ci-dessus n'est plus valable.

## 1.2 Pression partielle de vapeur d'eau

La distribution de la vapeur d'eau dans l'atmosphère est en général extrêmement variable, mais elle peut être approximativement calculée par l'équation:

$$\rho(h) = \rho_0 \exp(-h / h_0) \quad \text{g/m}^3 \quad (6)$$

où la hauteur d'échelle  $h_0 = 2$  km et la densité de référence de vapeur d'eau au niveau du sol est:

$$\rho_0 = 7,5 \quad \text{g/m}^3 \quad (7)$$

On obtient la pression de vapeur d'eau à partir de sa densité par l'équation (voir la Recommandation UIT-R P.453):

$$e(h) = \frac{\rho(h) T(h)}{216,7} \quad \text{hPa} \quad (8)$$

La densité de vapeur d'eau décroît exponentiellement lorsque l'altitude augmente, jusqu'à l'altitude où le rapport de mélange  $e(h)/P(h) = 2 \times 10^{-6}$ . Aux altitudes plus élevées, on suppose que le rapport de mélange est constant.

## 1.3 Atmosphère sèche pour les calculs de l'affaiblissement

Le profil de densité des gaz atmosphériques autres que la vapeur d'eau («atmosphère sèche») peut être déduit des profils de température et de pression du § 1.1.

Pour les calculs de l'affaiblissement, ce profil de densité est pratiquement exponentiel, conformément à l'équation (6) pour:

$$h_0 = 6 \text{ km} \quad (9)$$

## 2 Atmosphère de référence annuelle pour les latitudes basses

Pour les latitudes basses (inférieures à 22°), les variations saisonnières ne sont pas très importantes et on peut utiliser un seul profil pour toute l'année.

La température  $T$  (K) à l'altitude  $h$  (km) est donnée par:

$$\begin{aligned} T(h) &= 300,4222 - 6,3533 h + 0,005886 h^2 && \text{pour } 0 \leq h < 17 \\ T(h) &= 194 + (h - 17) 2,533 && \text{pour } 17 \leq h < 47 \\ T(h) &= 270 && \text{pour } 47 \leq h < 52 \\ T(h) &= 270 - (h - 52) 3,0714 && \text{pour } 52 \leq h < 80 \\ T(h) &= 184 && \text{pour } 80 \leq h \leq 100 \end{aligned}$$

et la pression  $P$  (hPa) est donnée par:

$$\begin{aligned} P(h) &= 1012,0306 - 109,0338 h + 3,6316 h^2 && \text{pour } 0 \leq h < 10 \\ P(h) &= P_{10} \exp[-0,147 (h - 10)] && \text{pour } 10 \leq h < 72 \end{aligned}$$

$$P(h) = P_{72} \exp [-0,165 (h - 72)] \quad \text{pour} \quad 72 \leq h \leq 100$$

où  $P_{10}$  et  $P_{72}$  sont les pressions à 10 et 72 km respectivement.

La densité de vapeur d'eau ( $\text{g/m}^3$ ) est donnée par:

$$\begin{aligned} \rho(h) &= 19,6542 \exp [-0,2313 h - 0,1122 h^2 + 0,01351 h^3 \\ &\quad - 0,0005923 h^4] \quad \text{pour} \quad 0 \leq h \leq 15 \\ \rho(h) &= 0 \quad \text{pour} \quad h > 15 \end{aligned}$$

### 3 Atmosphère de référence pour les latitudes moyennes

Pour les latitudes moyennes (entre  $22^\circ$  et  $45^\circ$ ), on peut utiliser les profils ci-après en été et en hiver.

#### 3.1 Profil pour les latitudes moyennes en été

La température  $T$  (K) à l'altitude  $h$  (km) est donnée par:

$$\begin{aligned} T(h) &= 294,9838 - 5,2159 h - 0,07109 h^2 \quad \text{pour} \quad 0 \leq h < 13 \\ T(h) &= 215,5 \quad \text{pour} \quad 13 \leq h < 17 \\ T(h) &= 215,5 \exp [(h - 17) 0,008128] \quad \text{pour} \quad 17 \leq h < 47 \\ T(h) &= 275 \quad \text{pour} \quad 47 \leq h < 53 \\ T(h) &= 275 + \{1 - \exp [(h - 53) 0,06]\} 20 \quad \text{pour} \quad 53 \leq h < 80 \\ T(h) &= 175 \quad \text{pour} \quad 80 \leq h \leq 100 \end{aligned}$$

et la pression  $P$  (hPa) est donnée par:

$$\begin{aligned} P(h) &= 1012,8186 - 111,5569 h + 3,8646 h^2 \quad \text{pour} \quad 0 \leq h < 10 \\ P(h) &= P_{10} \exp [-0,147 (h - 10)] \quad \text{pour} \quad 10 \leq h < 72 \\ P(h) &= P_{72} \exp [-0,165 (h - 72)] \quad \text{pour} \quad 72 \leq h \leq 100 \end{aligned}$$

où  $P_{10}$  et  $P_{72}$  sont les pressions à 10 et 72 km respectivement.

La densité de vapeur d'eau ( $\text{g/m}^3$ ) est donnée par:

$$\begin{aligned} \rho(h) &= 14,3542 \exp [-0,4174 h - 0,02290 h^2 + 0,001007 h^3] \quad \text{pour} \quad 0 \leq h \leq 10 \\ \rho(h) &= 0 \quad \text{pour} \quad h > 10 \end{aligned}$$

#### 3.2 Profil pour les latitudes moyennes en hiver

La température  $T$  (K) à l'altitude  $h$  (km) est donnée par:

$$\begin{aligned} T(h) &= 272,7241 - 3,6217 h - 0,1759 h^2 \quad \text{pour} \quad 0 \leq h < 10 \\ T(h) &= 218 \quad \text{pour} \quad 10 \leq h < 33 \\ T(h) &= 218 + (h - 33) 3,3571 \quad \text{pour} \quad 33 \leq h < 47 \\ T(h) &= 265 \quad \text{pour} \quad 47 \leq h < 53 \\ T(h) &= 265 - (h - 53) 2,0370 \quad \text{pour} \quad 53 \leq h < 80 \\ T(h) &= 210 \quad \text{pour} \quad 80 \leq h \leq 100 \end{aligned}$$

et la pression  $P$  (hPa) est donnée par:

$$\begin{aligned} P(h) &= 1018,8627 - 124,2954 h + 4,8307 h^2 \quad \text{pour} \quad 0 \leq h < 10 \\ P(h) &= P_{10} \exp [-0,147 (h - 10)] \quad \text{pour} \quad 10 \leq h < 72 \\ P(h) &= P_{72} \exp [-0,155 (h - 72)] \quad \text{pour} \quad 72 \leq h \leq 100 \end{aligned}$$

où  $P_{10}$  et  $P_{72}$  sont les pressions à 10 et 72 km respectivement.

La densité de vapeur d'eau ( $\text{g/m}^3$ ) est donnée par:

$$\begin{aligned} \rho(h) &= 3,4742 \exp [-0,2697 h - 0,03604 h^2 + 0,0004489 h^3] & \text{pour} & \quad 0 \leq h \leq 10 \\ \rho(h) &= 0 & \text{pour} & \quad h > 10 \end{aligned}$$

#### 4 Atmosphère de référence pour les latitudes élevées

Pour les latitudes élevées (supérieures à  $45^\circ$ ), on peut utiliser les profils ci-après en été et en hiver.

##### 4.1 Profil pour les latitudes élevées en été

La température  $T$  (K) à l'altitude  $h$  (km) est donnée par:

$$\begin{aligned} T(h) &= 286,8374 - 4,7805 h - 0,1402 h^2 & \text{pour} & \quad 0 \leq h < 10 \\ T(h) &= 225 & \text{pour} & \quad 10 \leq h < 23 \\ T(h) &= 225 \exp [(h - 23) 0,008317] & \text{pour} & \quad 23 \leq h < 48 \\ T(h) &= 277 & \text{pour} & \quad 48 \leq h < 53 \\ T(h) &= 277 - (h - 53) 4,0769 & \text{pour} & \quad 53 \leq h < 79 \\ T(h) &= 171 & \text{pour} & \quad 79 \leq h \leq 100 \end{aligned}$$

et la pression  $P$  (hPa) est donnée par:

$$\begin{aligned} P(h) &= 1008,0278 - 113,2494 h + 3,9408 h^2 & \text{pour} & \quad 0 \leq h < 10 \\ P(h) &= P_{10} \exp [-0,140 (h - 10)] & \text{pour} & \quad 10 \leq h < 72 \\ P(h) &= P_{72} \exp [-0,165 (h - 72)] & \text{pour} & \quad 72 \leq h \leq 100 \end{aligned}$$

où  $P_{10}$  et  $P_{72}$  sont les pressions à 10 et 72 km respectivement.

La concentration en vapeur d'eau ( $\text{g/m}^3$ ) est donnée par:

$$\begin{aligned} \rho(h) &= 8,988 \exp [-0,3614 h - 0,005402 h^2 - 0,001955 h^3] & \text{pour} & \quad 0 \leq h \leq 15 \\ \rho(h) &= 0 & \text{pour} & \quad h > 15 \end{aligned}$$

##### 4.2 Profil pour les latitudes élevées en hiver

La température  $T$  (K) à l'altitude  $h$  (km) est donnée par:

$$\begin{aligned} T(h) &= 257,4345 + 2,3474 h - 1,5479 h^2 + 0,08473 h^3 & \text{pour} & \quad 0 \leq h < 8,5 \\ T(h) &= 217,5 & \text{pour} & \quad 8,5 \leq h < 30 \\ T(h) &= 217,5 + (h - 30) 2,125 & \text{pour} & \quad 30 \leq h < 50 \\ T(h) &= 260 & \text{pour} & \quad 50 \leq h < 54 \\ T(h) &= 260 - (h - 54) 1,667 & \text{pour} & \quad 54 \leq h \leq 100 \end{aligned}$$

et la pression  $P$  (hPa) est donnée par:

$$\begin{aligned} P(h) &= 1010,8828 - 122,2411 h + 4,554 h^2 & \text{pour} & \quad 0 \leq h < 10 \\ P(h) &= P_{10} \exp [-0,147 (h - 10)] & \text{pour} & \quad 10 \leq h < 72 \\ P(h) &= P_{72} \exp [-0,150 (h - 72)] & \text{pour} & \quad 72 \leq h \leq 100 \end{aligned}$$

où  $P_{10}$  et  $P_{72}$  sont les pressions à 10 et 72 km respectivement.

La densité de vapeur d'eau ( $\text{g/m}^3$ ) est donnée par:

$$\begin{aligned} \rho(h) &= 1,2319 \exp [0,07481 h - 0,0981 h^2 + 0,00281 h^3] && \text{pour } 0 \leq h \leq 10 \\ \rho(h) &= 0 && \text{pour } h > 10 \end{aligned}$$

## Bibliographie

BRUSSAARD, G., DAMOSSO, E. et STOLA, L. [octobre, 1983] Characterisation of the 50-70 GHz band for space communications. *CSELT Rapport Tecnici*, Vol. XI, 5.

## Annexe 2

### 1 Données expérimentales des profils atmosphériques verticaux

Les moyennes mensuelles des profils verticaux de la température, de la pression et de l'humidité relative ont été calculées pour 353 points répartis dans le monde entier sur la base d'observations réalisées par radiosonde sur 10 années (1980-1989). Cet ensemble de données (DST.STD) est disponible auprès du Bureau des radiocommunications (BR) de l'UIT et contient les profils verticaux moyens mensuels, pour 00.00 UTC et 12.00 UTC, de la pression, de la température et de l'humidité relative. Ces profils, calculés en l'absence de pluie, portent sur des altitudes allant de 0 à 16 km par pas de 500 m. Les profils mensuels moyens sont contenus dans des fichiers ASCII appelés **<WMO\_code>.dat** où *WMO\_code* est le nom de code du site selon l'Organisation mondiale de la météorologie (par exemple, 03496.dat, 03496 est le code de station OMM pour Hemsby-in-Norfolk). Un exemple de profil est donné dans le Tableau 2. La liste des points se trouve dans un fichier ASCII (en utilisant le format de fichier CSV avec valeurs séparées par des virgules) appelé **dst\_std\_lst.csv**. Chaque enregistrement de ce fichier contient le champ suivant: WMO\_CODE, nom de station, pays, latitude, longitude, altitude au-dessus du niveau de la mer. Voir un exemple dans le Tableau 3.

Au-dessus de l'altitude maximale, une extrapolation peut être effectuée en utilisant les profils de référence fournis dans l'Annexe 1. Pour convertir l'humidité relative en valeurs absolues de densité de vapeur d'eau, il convient d'utiliser les formules contenues dans la Recommandation UIT-R P.453.

TABLEAU 2

Format de données DST.STD – Exemple de profil moyen mensuel (station 10410)

YYMMDDHH NL			
99 199 0 33			
Press (hPa)	Z (km)	Temp (K)	RH (%/100)
1 016,905	0,00	273,62	0,864E+00
956,686	0,50	273,33	0,830E+00
898,555	1,00	271,74	0,754E+00
844,014	1,50	269,59	0,665E+00
791,860	2,00	267,15	0,591E+00
742,661	2,50	264,56	0,518E+00
696,285	3,00	261,89	0,470E+00
651,977	3,50	258,94	0,458E+00
610,086	4,00	255,88	0,448E+00
570,467	4,50	252,69	0,445E+00
533,076	5,00	249,33	0,451E+00
497,767	5,50	245,90	0,453E+00
464,123	6,00	242,32	0,450E+00
432,441	6,50	238,75	0,450E+00
402,414	7,00	235,16	0,443E+00
374,177	7,50	231,59	0,437E+00
347,236	8,00	228,12	0,433E+00
322,281	8,50	224,88	0,427E+00
298,474	9,00	221,89	0,421E+00
276,492	9,50	219,27	0,416E+00
255,527	10,00	217,08	0,411E+00
236,297	10,50	215,62	0,402E+00
218,415	11,00	214,79	0,393E+00
201,366	11,50	214,14	0,348E+00
186,214	12,00	214,02	0,205E+00
172,093	12,50	214,24	0,104E+00
158,709	13,00	214,66	0,368E-01
146,492	13,50	214,94	0,351E-02
135,813	14,00	214,88	0,120E-02
125,690	14,50	214,50	0,117E-02
116,027	15,00	214,01	0,113E-02
106,798	15,50	213,56	0,110E-02
98,291	16,00	213,26	0,107E-02

TABLEAU 2 (*fin*)

*Légende relative au Tableau 2:*

YY: Année (99 pour les profils moyens mensuels)

MM: Mois (1 = janvier, 2 = février ...)

DD: Jour du mois (99 pour les profils moyens mensuels)

HH: Heure du jour (UTC)

NL: Nombre de niveaux verticaux (NL = 33 pour STD.DST)

Press (hPa): Pression atmosphérique totale

Z (km): Altitude au-dessus de la surface terrestre

Temp (K): Température de l'air

RH (%/100): Humidité relative (en pourcentage)

NOTE 1 – Les valeurs de Temp et Press peuvent être mises à zéro si elles n'ont pas été enregistrées.

TABLEAU 3

**Fichier d'information sur la station DST\_STD\_LST.CSV –  
Exemple de structure d'enregistrement**

Code WMO	Nom de station	Pays	Latitude (degrés)	Longitude (degrés)	Altitude au-dessus du niveau de la mer (m)
10 410	ESSEN	DL	51,4	6,967	153

NOTE 1 – Les valeurs de latitude et de longitude sont exprimées en degrés (c'est-à-dire 51,4 = 51° 24').

## Annexe 3

### 1 Données de prévision météorologique numérique pour les profils verticaux atmosphériques

On a calculé des moyennes mensuelles, en fonction de l'heure de la journée, de profils verticaux de température, de pression et de densité de vapeur d'eau en utilisant l'ensemble de données ECMWF sur 15 ans tiré du projet de réanalyse ERA15. Cet ensemble de données (ESA\_STD\_PROF) est disponible auprès du BR de l'UIT et contient les profils verticaux mensuels moyens, pour 0000, 0600, 1200 et 1800 UTC, de la pression de l'air totale, de la température de l'air et de la densité de vapeur d'eau. Ces profils s'étendent d'une altitude de référence située autour de la surface terrestre locale jusqu'à une trentaine de km au-dessus de la surface terrestre et contient 32 niveaux dérivés des niveaux du modèle ERA15. Les données vont de 0° à 360° en longitude et de +90° à -90° en latitude, avec une résolution de 1,5° en latitude et en longitude. Toutes les données sont stockées dans des fichiers utilisant la norme précision simple à virgule flottante de l'IEEE (4 octets, 32 bits) au format «big-endian».

Les profils moyens mensuels de chaque paramètre météorologique se trouvent dans des fichiers binaires nommés *<param>\_<hh>.bin*, où *param* est le nom du paramètre météorologique (**pres** = pression de l'air totale [hPa], **temp** = température de l'air [K], **vapd** = densité de vapeur d'eau [g/m<sup>3</sup>] et *hh* est l'heure de la journée (c'est-à-dire 0000, 0600, 1200 et 1800 UTC). Les altitudes des niveaux de profil sont contenues dans un fichier binaire séparé, appelé **hght.bin**, dans lequel se trouvent les profils verticaux des altitudes de niveaux mensuels moyens. On trouvera au Tableau 4 un exemple des données contenues dans la base de données pour une heure précise.

TABLEAU 4

**Contenu ESA\_STD\_PROF – Exemple de profil au point de grille  
(latitude = 45° et longitude = 9°)  
à 1200 UTC en juillet**

Altitude (m)	Press (hPa)	Temp (K)	Vapd (g/m <sup>3</sup> )
668,309	939,255	298,373	9,823
701,645	935,673	298,125	9,617
819,406	923,092	296,598	9,302
1 029,200	900,957	294,292	8,811
1 312,119	871,693	291,459	8,099
1 653,510	837,298	288,287	6,992
2 042,286	799,373	285,107	5,706
2 470,212	759,191	282,116	4,555
2 931,283	717,723	279,045	3,641
3 421,197	675,691	275,934	2,692
3 937,159	633,633	272,913	1,855
4 477,475	591,936	269,707	1,286
5 040,996	550,876	266,183	0,911
5 627,126	510,656	262,354	0,636
6 235,769	471,427	258,213	0,428
6 867,105	433,307	253,687	0,277
7 521,528	396,390	248,780	0,173
8 199,571	360,767	243,521	0,103
8 901,801	326,527	237,971	0,058
9 629,047	293,764	232,319	0,034
10 382,883	262,580	226,984	0,019

TABLEAU 4 (*Fin*)

11 167,396	233,064	222,845	0,009
11 990,928	205,263	220,483	0,003
12 864,380	179,195	219,279	0,001
13 799,389	154,827	218,154	0,001
14 812,536	132,043	217,057	0,001
15 934,765	110,604	216,026	0,000
17 228,709	90,110	215,674	0,000
18 821,158	70,037	216,262	0,000
20 964,607	50,038	219,300	0,000
24 270,756	30,039	223,166	0,000
31 430,756	10,320	232,854	0,000

Z (m): Altitude par rapport au niveau de la mer

Press (hPa): Pression atmosphérique totale

Temp (K): Température de l'air

Vapd (g/m<sup>3</sup>): Densité de vapeur d'eau

NOTE 1 – Les procédures Matlab et Fortran d'accès à l'ensemble de données ESA\_STD\_PROF sont disponibles sur le site web de l'UIT-R concernant la Commission d'études 3 des radiocommunications.