

RECOMMANDATION UIT-R SA.1017*

**Méthode préférée de calcul de la qualité de fonctionnement
des liaisons dans le service de recherche spatiale**

(Question UIT-R 131/7)

(1994)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que l'identification des gammes de fréquences offrant la meilleure qualité de fonctionnement de liaison peut servir de base pour les attributions de bande et pour d'autres objectifs de gestion du spectre;
- b) que les calculs de qualité de fonctionnement de liaison impliquent nécessairement l'examen des caractéristiques de propagation des ondes radioélectriques;
- c) que les Recommandations relatives à la propagation fournissent des équations, des algorithmes et des données permettant d'effectuer de tels calculs;
- d) qu'une méthode fondée sur ces Recommandations a été mise au point pour effectuer les calculs de bandes de fréquences préférées pour le service de recherche spatiale;
- e) que cette méthode est présentée dans l'Annexe 1;
- f) que cette méthode tient également compte des facteurs de bruit et d'affaiblissement qui sont particulièrement applicables à certains systèmes dont les températures de bruit sont inférieures à 30 K environ,

recommande

- 1 que la méthode présentée dans l'Annexe 1 soit considérée comme préférée pour les calculs de qualité de fonctionnement de liaison dans le service de recherche spatiale, sur la base des Recommandations UIT-R concernant la propagation.

Annexe 1**Méthode d'utilisation des informations de propagation de l'UIT-R
lors du calcul de l'affaiblissement, de la température de bruit
et de la qualité de fonctionnement des liaisons****1 Introduction**

La présente Annexe présente une méthode de calcul de l'affaiblissement, de la température de bruit et de la qualité de fonctionnement des liaisons de télécommunication. Cette méthode est fondée sur les Recommandations UIT-R relatives aux caractéristiques de propagation des ondes radioélectriques. Elle pourra être complétée pour tenir compte des caractéristiques des équipements.

* La Commission d'études 7 des radiocommunications a apporté des modifications rédactionnelles à cette Recommandation en 2003 conformément à la Résolution UIT-R 44.

La méthode prévoit l'examen de certains effets qui prennent de l'importance dans les systèmes dont les températures de bruit sont inférieures à 30 K environ lorsqu'ils sont exploités dans des bandes de fréquences inférieures à 15 GHz environ. Ces facteurs sont le bruit de fond du rayonnement cosmique, le bruit galactique et l'effet de l'affaiblissement atmosphérique sur les valeurs de ces bruits. Pour beaucoup d'autres systèmes, à température de bruit plus élevée, on pourra négliger ces facteurs.

La méthode sera expliquée dans le cadre de la fourniture de données pour le choix de bandes de fréquences préférées en fonction de la qualité de fonctionnement de liaison.

2 Références

La méthode et les calculs décrits ci-après sont en partie fondés sur les Recommandations suivantes:

Recommandation UIT-R P.837: Caractéristiques des précipitations pour la modélisation de la propagation

Recommandation UIT-R P.618: Données de propagation et méthodes de prévision nécessaires pour la conception de systèmes de télécommunication Terre-espace

Recommandation UIT-R P.676: Affaiblissement dû aux gaz de l'atmosphère

Recommandation UIT-R P.838: Modèle d'affaiblissement linéique dû à la pluie, pour usage dans les méthodes de prévision

Recommandation UIT-R P.372: Bruit radioélectrique.

3 Méthodes de calcul

Une analyse pas à pas des calculs nécessaires pour déterminer la variation de la qualité de liaison en fonction de la fréquence est reproduite dans l'Appendice 1. Pour rendre la présentation de la méthode plus commode et par souci de concision, les calculs sont groupés en cinq sections:

- calculs d'affaiblissement et de température de bruit par atmosphère claire (sans pluie ni nuages),
- calculs des effets de la pluie sur l'affaiblissement et sur la température de bruit,
- calculs d'affaiblissement et de température de bruit par atmosphère claire plus pluie,
- calcul de la qualité de fonctionnement de liaison par atmosphère claire (sans pluie ni nuages),
- calcul de la qualité de fonctionnement de liaison par atmosphère claire plus pluie.

NOTE 1 – Pour un trajet de propagation espace-Terre dans une atmosphère pluvieuse, l'affaiblissement est égal à la somme de l'affaiblissement par atmosphère claire sur le trajet et de l'affaiblissement supplémentaire dû à la pluie sur le trajet. L'affaiblissement dû à l'atmosphère seulement et l'affaiblissement dû à la pluie seulement font l'objet de calculs séparés (voir la Recommandation UIT-R P.618).

La température de bruit du ciel attribuée à l'atmosphère pluvieuse est calculée en fonction de l'affaiblissement total et n'est pas égale à la somme des températures de bruit que l'on pourrait calculer pour chacune des deux composantes de l'affaiblissement total.

4 Types d'analyse pour le choix des fréquences

Pour les liaisons entre un engin spatial et la Terre, on dispose de quatre types d'analyse:

- liaison espace-Terre, limitée uniquement par des phénomènes naturels,
- liaison espace-Terre, compte tenu des effets de l'équipement,
- liaison Terre-espace, limitée uniquement par des phénomènes naturels,
- liaison Terre-espace, compte tenu des effets de l'équipement.

En ce qui concerne la liaison Terre-espace, les éléments qui contribuent à la température de bruit du système de réception de l'engin spatial sont également le bruit de fond cosmique et le bruit galactique. La contribution de l'atmosphère de la Terre peut cependant être relativement faible. Dans le cas des sondes explorant l'espace lointain, la Terre occupe une partie si réduite du diagramme de rayonnement de l'antenne de réception que la contribution de l'atmosphère à la température de bruit est négligeable. Il faut toutefois tenir compte de l'affaiblissement dû à l'atmosphère dans l'analyse de la liaison car il influe directement sur la puissance du signal reçu.

Il est utile de considérer des liaisons assurées par deux types d'antenne. La première liaison comporte des antennes d'émission et de réception ayant un diamètre fixe. Dans ce cas, le gain des deux antennes varie avec la fréquence. Dans le deuxième type de liaison, on suppose qu'une des antennes a un diamètre fixe et que l'autre a une ouverture de faisceau fixe. Dans ce cas, le gain de l'antenne à ouverture de faisceau fixe est pratiquement indépendant de la fréquence. Un exemple de ce cas est celui de l'utilisation, à bord d'une station spatiale, d'une antenne équidirective qui permet d'établir des communications lors des manœuvres de correction de trajectoire ou lors d'une perte de contrôle de l'orientation.

L'allure des courbes de qualité de fonctionnement de liaison dépend du type d'antenne considéré.

5 Choix des bandes de fréquences préférées

On peut créer par calcul deux séries de courbes de qualité de fonctionnement de liaison. Dans la première, on part de l'hypothèse d'un équipement parfait et d'antennes idéales, avec un gain variant comme le carré de la fréquence ou avec une ouverture de faisceau (gain) constante par rapport à la fréquence. La puissance de l'émetteur est supposée constante par rapport à la fréquence et la température de bruit du système de réception est négligée. L'objectif de ces hypothèses est de permettre le choix de bandes de fréquences préférées uniquement en fonction des limites imposées par les phénomènes naturels.

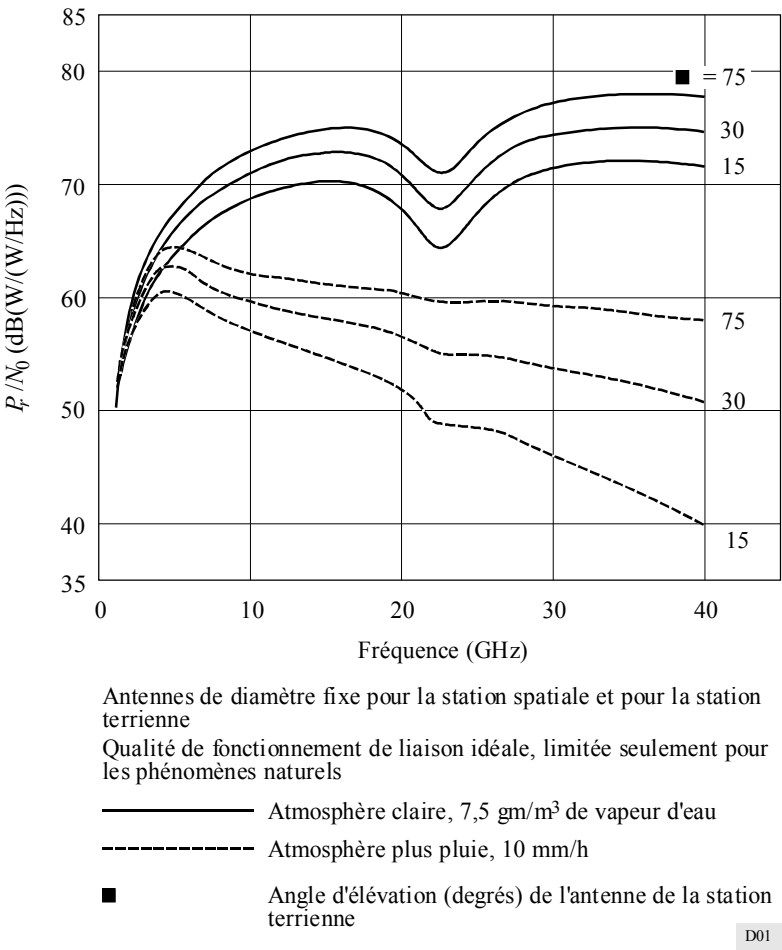
La deuxième série de courbes tient compte des variations, en fonction de la fréquence, d'un ensemble particulier de paramètres d'équipement. Certains paramètres d'antenne de station terrienne dépendent également de l'angle d'élévation, variations dont il est également tenu compte. Les facteurs pris en considération sont la variation du gain d'antenne en fonction de l'angle d'élévation, la contribution à la température de bruit de la Terre «chaude» couplée par la structure supportant le dispositif d'alimentation et la diffraction de l'éclairement, ainsi que la température de bruit des équipements de réception. L'inclusion de ces facteurs permet de choisir des bandes de fréquences préférées pour une liaison sans négliger les caractéristiques propres des équipements.

En examinant la qualité de fonctionnement des liaisons actuellement réalisable et celle des liaisons idéales, il est possible d'identifier des bandes de fréquences préférées pour les équipements actuels ainsi que pour les futurs équipements améliorés.

On trouvera à la Fig. 1 un exemple de qualité de fonctionnement qu'il est possible d'atteindre avec un équipement idéal. Cette Figure montre les courbes pour un trajet espace-Terre. On suppose que l'équipement est parfait, avec des antennes d'émission et de réception de diamètre fixe. Si l'on souhaite choisir des bandes de fréquences dans la gamme 1-40 GHz, qui permettent d'obtenir une qualité de fonctionnement proche à 1 dB près du maximum possible, les courbes donnent les résultats suivants, dans le cas d'un angle d'élévation de 30°:

Conditions de propagation	Bande de fréquences préférée
Atmosphère claire (ni pluie, ni nuages)	12,5-19,2 GHz
Atmosphère claire plus 0,1 % de pluie	4 100-9 400 MHz

FIGURE 1
Qualité de fonctionnement de la liaison espace-Terre, P_r/N_0



Appendice 1 à l'Annexe 1

Procédure de calcul

1 Introduction

Le calcul de la qualité de fonctionnement de liaison espace-Terre par atmosphère claire et par atmosphère claire plus pluie sera décrit avec les divers paramètres énumérés dans les Tableaux 1 à 5 ci-après:

- 1) Affaiblissement et température de bruit en fonction de la fréquence, de l'angle d'élévation et de la densité de vapeur d'eau pour la propagation par atmosphère claire;
- 2) Affaiblissement et température de bruit résultant de la pluie seule, en fonction de la fréquence, de l'angle d'élévation et du taux de précipitation;
- 3) Affaiblissement et température de bruit pour un trajet de propagation par atmosphère claire plus pluie, compte tenu des données du Tableau 2;
- 4) Qualité de fonctionnement de liaison pour un ensemble hypothétique de paramètres d'émetteur, d'antenne et de distance, compte tenu des données du Tableau 1 concernant l'affaiblissement et la température de bruit;
- 5) Qualité de fonctionnement de liaison pour un ensemble hypothétique de paramètres d'émetteur, d'antenne et de distance, compte tenu des données du Tableau 3 concernant l'affaiblissement et la température de bruit.

Ces tableaux ne sont que des exemples, qui indiquent les divers paramètres et valeurs pour quelques fréquences.

NOTE 1 – Les valeurs indiquées dans les tableaux sont issues de calculs analytiques. Il convient de ne pas en déduire que l'énumération de ces valeurs avec une précision de plusieurs décimales reflète l'exactitude ou la précision des données de propagation sous-jacentes ou des formules analytiques associées. La prédiction de la qualité de fonctionnement réelle de liaison avec la précision indiquée n'est généralement pas possible.

Chaque ligne de tableau est assortie d'une description du paramètre ou du calcul avec, en général, la citation en référence d'une source d'information.

2 Calculs pour une atmosphère claire (sans pluie ni nuages)

Le Tableau 1 présente des valeurs calculées d'affaiblissement dû à l'atmosphère et de température de bruit due aux effets combinés du bruit de fond cosmique, du bruit de fond galactique et de la température de bruit liée à l'affaiblissement produit par l'atmosphère. Les calculs figurant dans le Tableau 1 s'appliquent à une propagation par atmosphère claire (sans pluie ni nuages). Les calculs correspondant aux numéros de ligne situés à gauche se font de la manière suivante:

Ligne 7 Densité vapeur (gm/m^3)

Densité de vapeur d'eau dans l'atmosphère, prise comme hypothèse pour le calcul considéré.

Ligne 8 Altitude station (km)

Altitude de la station terrienne (au-dessus du niveau de la mer). L'exemple donné dans le Tableau 1 est de 0,81 km pour la station de recherche dans l'espace lointain à partir de Madrid (Espagne).

Ligne 10 Fréquence (GHz)

Fréquence radioélectrique utilisée pour le calcul considéré.

Ligne 12 Ho' (km)

Hauteur équivalente d'oxygène à l'altitude de la station terrienne. La valeur Ho' est dérivée d'une correction de la valeur de Ho , hauteur équivalente d'oxygène au niveau de la mer. Pour des fréquences inférieures à 57 GHz, elle est donnée par:

$$Ho \times e^{(-\text{altitude de la station} / Ho)} \quad \text{km}$$

où $Ho = 6$ km au dessus du niveau de la mer.

Voir le § 2.2 de la Recommandation UIT-R P.676.

Ligne 13 Ogamma (dB/km)

Affaiblissement linéique au niveau du sol dû à l'oxygène, à une température de 15°C. Pour des fréquences inférieures à 57 GHz, il est donné par:

$$\left(7,19 \times 10^{-3} + \frac{6,09}{f^2 + 0,227} + \frac{4,81}{(f - 0,57)^2 + 1,5} f^2 \times 10^{-3} \right) \quad \text{dB/km}$$

Voir le § 1 de la Recommandation UIT-R P.676.

Ligne 14 Hw' (km)

Hauteur équivalente de vapeur d'eau à l'altitude de la station terrienne. La valeur Hw' est dérivée d'une correction de la valeur de Hw , hauteur équivalente de vapeur d'eau au niveau de la mer. La correction est telle que, pour un trajet entre une station terrienne et un satellite, $Hw' = Hw$. Pour des fréquences inférieures à 350 GHz, Hw est donné par:

$$Hw_0 \left(1 + \frac{3}{(f - 22,2)^2 + 5} + \frac{5}{(f - 183,3)^2 + 6} + \frac{2,5}{(f - 325,4)^2 + 4} \right) \quad \text{km}$$

où $Hw_0 = 1,6$ km par temps clair et 2,1 km par temps pluvieux.

NOTE 1 – Pour les fréquences inférieures à 57 GHz, seuls les deux premiers termes de la formule sont nécessaires.

Voir le § 2.2 de la Recommandation UIT-R P.676.

Ligne 15 Wgamma (dB/km)

Affaiblissement linéique au niveau du sol dû à la vapeur d'eau à une température de 15°C, $\rho < 12$ gm/m³. Pour des fréquences inférieures à 350 GHz, il est donné par:

$$\left[0,05 + 0,0021 \rho + \frac{3,6}{(f - 22,2)^2 + 8,5} + \frac{10,6}{(f - 183,3)^2 + 9} + \frac{8,9}{(f - 325,4)^2 + 26,3} \right] f^2 \times \rho \times 10^{-4} \quad \text{dB/km}$$

où ρ est la densité de la vapeur d'eau à l'altitude de la station (gm/m³).

NOTE 1 – Pour les fréquences inférieures à 57 GHz, seuls les deux premiers termes de la formule entre crochets sont nécessaires.

Voir le § 1 de la Recommandation UIT-R P.676.

Ligne 17 Temp galact @ 408 MHz (K)

Température galactique pour une région particulière du ciel; elle est utilisée pour calculer la température de bruit galactique pour d'autres fréquences pour la même région du ciel. Dans le cas du Tableau 1, on a choisi arbitrairement une valeur de 30 K.

Voir la Recommandation UIT-R P.372.

Ligne 18 Temp galact (K)

Température calculée pour une fréquence particulière, donnée par:

$$(\text{Temp galact @ 408 MHz}) \left(\frac{\text{Fréquence (MHz)}}{408} \right)^{-2,75} \quad \text{K}$$

Voir le § 4 de la Recommandation UIT-R P.372.

Ligne 19 Bruit cosmique (W/Hz)

Densité spectrale de puissance du bruit de fond cosmique, donnée par:

$$\frac{hf}{e^{(hf/kT)} - 1} \quad \text{W/Hz}$$

où:

$h = 6,626 \times 10^{-34}$ (J/s) (constante de Planck)

f : fréquence (Hz)

$k = 1,3806 \times 10^{-23}$ (J/K) (constante de Boltzmann)

T : température de bruit, considérée comme étant de 2,7 K.

Ligne 20 Temp cosmique (K)

Température du bruit de fond cosmique, donnée par:

$$\text{Bruit cosmique} / k \quad \text{K}$$

où k est la constante de Boltzmann soit $1,3806 \times 10^{-23}$ (J/K)

Ligne 21 Cosmique + galactique (K)

Somme des températures de bruit cosmique et galactique à une fréquence particulière, donnée par:

$$\text{Température cosmique} + \text{température galactique} \quad \text{K}$$

Ligne 23 Aff zénith (dB)

Affaiblissement dans un seul sens à travers l'atmosphère en direction du zénith, donné par:

$$(Ho' \times O_{\text{gamma}}) + (Hw' \times W_{\text{gamma}}) \quad \text{dB}$$

Voir le § 2.2 de la Recommandation UIT-R P.676.

Ligne 24 Bruit atmos zénith (K)

Température de bruit causée par l'atmosphère en direction du zénith, donnée par:

$$280 (1 - 10^{-A(\text{dB})/10}) \quad \text{K}$$

où 280 est la température rayonnante moyenne de l'atmosphère et A (dB) l'affaiblissement dans un seul sens à travers l'atmosphère en direction du zénith.

Voir la Recommandation UIT-R P.372.

Ligne 25 Cosmique + galactique zénith (K)

Somme des températures de bruit cosmique et galactique, telle que réduite par l'affaiblissement zénithal, donnée par:

$$(\text{Cosmique} + \text{galactique}) / e^{A(\text{dB})/4,34} \quad \text{K}$$

Voir la Recommandation UIT-R P.372.

Ligne 26 Bruit total zénith (K)

Somme de la température de bruit atmosphérique zénithale et de la température de bruit zénithale cosmique + galactique, donnée par:

$$\text{Bruit atmos zénith} + \text{bruit zénith (cosmique} + \text{galactique)} \quad \text{K}$$

Ligne 29 Angle élev (degrés)

Angle d'élévation de l'antenne de la station terrienne pour le calcul en question.

Ligne 30 Aff atmos élev (dB)

Affaiblissement dans un seul sens à travers l'atmosphère à l'angle d'élévation en question; pour les angles d'élévation supérieurs à 10°, il est donné par:

$$\text{Affaiblissement zénithal} / \sin(\text{angle d'élévation}) \quad \text{dB}$$

Voir le § 2.2 de la Recommandation UIT-R P.676.

Ligne 31 Bruit atmos élev (K)

Température de bruit causée par l'atmosphère dans la direction de l'angle d'élévation, donnée par:

$$280 (1 - 10^{B(\text{dB})/10}) \quad \text{K}$$

où 280 est la température rayonnante moyenne de l'atmosphère (K) et B l'affaiblissement (dB) dans un seul sens à travers l'atmosphère dans la direction de l'angle d'élévation.

Ligne 32 Cosmique + galactique élev (K)

Somme des températures de bruit cosmique et galactique telle que réduite par l'affaiblissement à l'angle d'élévation en question, donnée par:

$$(\text{Cosmique} + \text{galactique}) / e^{B(\text{dB})/4,34} \quad \text{K}$$

où B est l'affaiblissement (dB) dans un seul sens à travers l'atmosphère dans la direction de l'angle d'élévation.

Ligne 33 Bruit total élev (K)

Somme du bruit atmosphérique et du bruit cosmique + galactique à l'angle d'élévation en question, donnée par:

$$\text{Bruit atmos élev} + \text{cosmique élev} + \text{galactique élev} \quad \text{K}$$

Ligne 34 Puissance bruit élev (dB(W/Hz))

Densité spectrale de puissance du bruit correspondant du bruit total élev, donnée par:

$$-228,6 + 10 \log(\text{bruit total élev}) \quad \text{dB(W/Hz)}$$

où $-228,6$ est l'expression logarithmique de la constante de Boltzmann, soit $1,3806 \times 10^{-23}$ (J/K).

Les lignes 37 à 42 et 45 à 50 sont similaires aux lignes 29 à 34 sauf en ce qui concerne les effets des angles d'élévation différents.

TABLEAU 1
Données pour le choix des fréquences préférées
Affaiblissement et température de bruit, atmosphère claire, sans pluie

1					
2					
3					
4					
5					
6					
7	Densité vapeur (gm/m ³)	7,5			
8	Altitude station (km)	0,81			
9					
10	Fréquence (GHz)	1	10	20	30
11					
12	H_o' (km)	5,242	5,242	5,242	5,242
13	Ogamma (dB/km)	0,005	0,007	0,010	0,018
14	H_w' (km)	1,611	1,632	2,088	1,673
15	Wgamma (dB/km)	0,000	0,007	0,101	0,080
16					
17	Temp galact @ 408 MHz (K)	30			
18	Temp galact (K)	2,549	0,005	0,001	0,000
19	Bruit cosmique (W/Hz)	3,69E-23	3,41E-23	3,10E-23	2,82E-23
20	Temp cosmique (K)	2,676	2,467	2,248	2,044
21	Cosmique + galactique (K)	5,225	2,472	2,249	2,044
22					
23	Aff zénith (dB)	0,03	0,05	0,26	0,23
24	Bruit atmos zénith (K)	1,68	3,06	16,57	14,47
25	Cosmique + galactique zénith (K)	5,19	2,44	2,12	1,94
26	Bruit total zénith (K)	6,88	5,50	18,68	16,41
27					
28					
29	Angle élév (degrés)	15,00			
30	Aff atmos élév (dB)	0,10	0,18	1,02	0,89
31	Bruit atmos élév (K)	6,44	11,62	58,79	51,90
32	Cosmique + galactique élév (K)	5,11	2,37	1,78	1,66
33	Bruit total élév (K)	11,55	13,99	60,56	53,56
34	Puissance bruit élév (dB(W/Hz))	-217,98	-217,14	-210,78	-211,31
35					
36					
37	Angle élév (degrés)	30,00			
38	Aff atmos élév (dB)	0,05	0,10	0,53	0,46
39	Bruit atmos élév (K)	3,35	6,08	32,16	28,19
40	Cosmique + galactique élév (K)	5,16	2,42	1,99	1,84
41	Bruit total élév (K)	8,52	8,50	34,15	30,03
42	Puissance bruit élév (dB(W/Hz))	-219,30	-219,31	-213,27	-213,82
43					
44					
45	Angle élév (degrés)	75,00			
46	Aff atmos élév (dB)	0,03	0,05	0,27	0,24
47	Bruit atmos élév (K)	1,74	3,16	17,13	14,97
48	Cosmique + galactique élév (K)	5,19	2,44	2,11	1,93
49	Bruit total élév (K)	6,93	5,61	19,25	16,90
50	Puissance totale élév (dB(W/Hz))	-220,19	-221,11	-215,76	-216,32

3 Calcul des effets de la pluie

Le Tableau 2 contient des données relatives à l'affaiblissement et à la température de bruit résultant des effets de la pluie (hydrométéores) seule, compte non tenu des effets des gaz de l'atmosphère. Les calculs, correspondant aux numéros de ligne situés à gauche du tableau, se font de la manière suivante:

Ligne 7 Latitude station (degrés)

Latitude de la station terrienne. L'exemple donné dans le Tableau 2 est une latitude de 40° correspondant à la station terrienne de recherche dans l'espace lointain située à Madrid (Espagne).

Ligne 8 Altitude station (km)

Altitude de la station terrienne au-dessus du niveau de la mer: 0,81 km pour Madrid (Espagne).

Ligne 9 Taux pluie (mm/h)

Taux de pluie dépassé pendant 0,01% de l'année soit, dans le cas de cet exemple, 32 mm/h pour Madrid (Espagne) (zone hydrométéorologique H).

Voir le § 2.2.1.1 Etape 5, de la Recommandation UIT-R P.618 ainsi que la Fig. 1 et le Tableau 1 de la Recommandation UIT-R P.837.

Ligne 10 Hauteur pluie (km)

Elle est donnée par:

$$3,0 + 0,028 \text{ lat} \quad \text{pour} \quad 0^\circ < \text{lat} < 36^\circ$$

$$4,0 - 0,075 (\text{lat} - 36) \quad \text{pour} \quad \text{lat} \geq 36^\circ$$

où lat est la latitude de la station terrienne.

Voir le § 2.2.1.1, Etape 1, de la Recommandation UIT-R P.618.

Ligne 12 Fréquence (GHz)

Ligne 14 Coeff kH

Coefficient utilisé pour estimer l'affaiblissement linéique dû à la pluie.

Voir la Recommandation UIT-R P.838.

Pour les valeurs de kH qui ne figurent pas dans le tableau, la formule d'interpolation est:

$$\log kH = \left(\frac{\log f - \log f_1}{\log f_2 - \log f_1} \right) (\log kH_2 - \log kH_1) + \log kH_1$$

où les indices 2 et 1 se réfèrent aux valeurs supérieure et inférieure du tableau entre lesquelles se situe la valeur inconnue.

Ligne 15 Coeff aH

Coefficient utilisé pour estimer l'affaiblissement linéique dû à la pluie.

Voir la Recommandation UIT-R P.838.

Pour les valeurs de aH qui ne figurent pas dans le tableau, la formule d'interpolation est:

$$aH = \left(\frac{\log f - \log f_2}{\log f_2 - \log f_1} \right) (aH_2 - aH_1) + aH_1$$

où les indices 2 et 1 se réfèrent aux valeurs supérieure et inférieure du tableau entre lesquelles se situe la valeur inconnue.

Ligne 16 rGamma (dB/km)

Affaiblissement linéique dû à la pluie, donné par:

$$kH \times \text{taux de pluie}^{(aH)} \quad \text{dB/km}$$

Voir la Recommandation UIT-R P.838, Etape 6, de la Recommandation UIT-R P.618.

Ligne 19 Angle élev (degrés)

Ligne 20 Trajet oblique (km)

Longueur du trajet oblique à travers la pluie depuis la station terrienne jusqu'à la hauteur de pluie, donnée par:

$$(\text{Hauteur pluie} - \text{altitude station}) / \sin(\text{angle d'élévation}) \quad \text{km}$$

Voir le § 2.2.1.1, Etape 2, de la Recommandation UIT-R P.618.

Ligne 21 Proj horiz (km)

Projection horizontale du trajet oblique, donnée par:

$$\text{Trajet oblique} \times \cos(\text{angle d'élévation}) \quad \text{km}$$

Voir le § 2.2.1.1, Etape 3, de la Recommandation UIT-R P.618.

Ligne 22 Réduction 0,01%

Facteur de réduction pour 0,01% du temps, donné par:

$$\frac{1}{1 + (0,05 \text{ projection horizontale})}$$

Voir le § 2.2.1.1, Etape 4, de la Recommandation UIT-R P.618.

Ligne 24 Aff 0,01% (dB)

Affaiblissement dû à la pluie dépassé pendant 0,1% de l'année, donné par:

$$r\text{Gamma} \times \text{trajet oblique} \times \text{réduction (0,01\%)} \quad \text{dB}$$

Voir le § 2.2.1.1, Etape 7, de la Recommandation UIT-R P.618.

Ligne 25 Aff 0,1% (dB)

Affaiblissement dû à la pluie dépassé pendant 0,1% de l'année, donné par:

$$0,38 \text{ aff (0,1\%)} \quad \text{dB}$$

NOTE 1 – Le choix d'un pourcentage de temps particulier est fondé sur des considérations d'exploitation. La valeur 0,1% est appropriée à certaines missions de recherche spatiale et on l'a retenue pour cet exemple afin d'illustrer la méthode de calcul.

Voir le § 2.2.1.1, Etape 8, de la Recommandation UIT-R P.618.

Les lignes 28 à 34 et 37 à 43 sont similaires aux lignes 19 à 25, sauf en ce qui concerne les effets des angles d'élévation différents.

TABLEAU 2

Données pour le choix des fréquences préférées
Affaiblissement causé par la pluie seule, sans affaiblissement dû à l'atmosphère

1					
2					
3					
4					
5					
6					
7	Latitude station (degrés)	40			
8	Altitude station (km)	0,81			
9	Taux pluie (mm/h) 0,01%	32			
10	Hauteur pluie (km)	3,7			
11					
12	Fréquence (GHz)	1	10	20	30
13					
14	Coeff kH	3,87E-05	1,01E-02	7,51E-02	1,87E-01
15	Coeff aH	0,912	1,276	1,099	1,021
16	rGamma (dB/km)	9,13E-04	8,41E-01	3,39E+00	6,44E+00
17					
18					
19	Angle élév (degrés)	15			
20	Trajet oblique (km)	11,17			
21	Proj horiz (km)	10,79			
22	Réduction 0,01%	0,67			
23					
24	Aff 0,01% (dB)	0,007	6,324	25,462	48,383
25	Aff 0,1% (dB)	0,003	2,466	9,930	18,869
26					
27					
28	Angle élév (degrés)	30			
29	Trajet oblique (km)	5,78			
30	Proj horiz (km)	5,01			
31	Réduction 0,01%	0,82			
32					
33	Aff 0,01% (dB)	0,004	3,968	15,978	30,362
34	Aff 0,1% (dB)	0,002	1,548	6,231	11,841
35					
36					
37	Angle élév (degrés)	75			
38	Trajet oblique (km)	2,99			
39	Proj horiz (km)	0,77			
40	Réduction 0,01%	0,97			
41					
42	Aff 0,01% (dB)	0,003	2,432	9,792	18,607
43	Aff 0,1% (dB)	0,001	0,949	3,819	7,257

4 Calculs pour une atmosphère claire plus pluie

Le Tableau 3 contient les valeurs calculées de l'affaiblissement causé par une atmosphère claire plus pluie et de la température de bruit causée par les effets du bruit de fond cosmique, le bruit de fond galactique ainsi que de la température de bruit liée à l'affaiblissement dû à la combinaison d'atmosphère claire et de pluie. Les calculs, correspondant aux numéros de ligne situés à gauche du tableau, se font de la manière suivante:

Les explications relatives aux lignes 1 à 30 sont les mêmes que pour le Tableau 1.

Ligne 31 Aff pluie élev (dB)

Affaiblissement dû à la pluie le long du trajet à l'angle d'élévation spécifié. La valeur donnée est l'affaiblissement qui est dépassé pendant 0,1% du temps à Madrid (Espagne); elle est tirée du Tableau 2.

Ligne 32 Aff total élev (dB)

Somme de l'affaiblissement dû à l'atmosphère et de l'affaiblissement dû à la pluie.

Ligne 33 Atm élev + bruit pluie (K)

Température de bruit due à l'affaiblissement total à l'angle d'élévation considéré, donnée par:

$$280 (1 - 10^{-B/10}) \quad \text{K}$$

où 280 est la température rayonnante moyenne de l'atmosphère (K) et B l'affaiblissement (dB) dans un seul sens le long du trajet.

Ligne 34 Cosmique + galactique élev (K)

Somme des températures de bruit cosmique et galactique, telles que réduites par l'affaiblissement le long du trajet à un angle d'élévation particulier (voir la ligne 19 du Tableau 1).

Ligne 35 Bruit total élev (K)

Somme du bruit atmosphérique, du bruit dû à la pluie et du bruit cosmique + galactique pour l'angle d'élévation en question.

Ligne 36 Puissance bruit élev (dB(W/Hz))

Densité spectrale de puissance du bruit correspondant au bruit total élev, donnée par:

$$-228,6 + 10 \log (\text{bruit total élev (K)}) \quad \text{dB(W/Hz)}$$

où $-228,6$ est l'expression logarithmique de la constante de Boltzmann, soit $1,3806 \times 10^{-23}$ (J/K).

Les lignes 39 à 46 sont similaires aux lignes 29 à 36, sauf en ce qui concerne les effets des angles d'élévation d'élévation différents.

TABLEAU 3
Données pour le choix des fréquences préférées
Affaiblissement et température de bruit, atmosphère claire plus pluie

1					
2					
3					
4					
5					
6					
7	Densité vapeur (gm/m ³)	7,50			
8	Altitude station (km)	0,81			
9					
10	Fréquence (GHz)	1	10	20	30
11					
12	<i>Ho'</i> (km)	5,242	5,242	5,242	5,242
13	Ogamma (dB/km)	0,005	0,007	0,010	0,018
14	<i>Hw'</i> (km)	2,114	2,141	2,741	2,196
15	Wgamma (dB/km)	0,000	0,006	0,081	0,076
16					
17	Temp galact @ 408 MHz (K)	30			
18	Temp galact (K)	2,549	0,005	0,001	0,000
19	Bruit cosmique (W/Hz)	3,69E-23	3,41E-23	3,10E-23	2,82E-23
20	Temp cosmique (K)	2,676	2,467	2,248	2,044
21	Cosmique + galactique (K)	5,225	2,472	2,249	2,044
22					
23	Aff zénith (dB)	0,03	0,05	0,28	0,26
24	Bruit atmos zénith (K)	1,68	3,23	17,24	16,51
25	Cosmique + galactique zénith (K)	5,19	2,44	2,11	1,92
26	Bruit total zénith (K)	6,88	5,67	19,35	18,43
27					
28					
29	Angle élev (degrés)	15,00			
30	Aff atmos élev (dB)	0,10	0,19	1,07	1,02
31	Aff pluie élev (dB)	0,00	2,47	9,93	18,87
32	Aff total élev dB	0,10	2,66	11,00	19,89
33	Atmos élev + bruit pluie (K)	6,61	128,27	257,74	277,13
34	Cosmique + galactique élev (K)	5,10	1,34	0,18	0,02
35	Bruit total élev (K)	11,72	129,60	257,92	277,15
36	Puissance bruit élev (dB(W/Hz))	-217,91	-207,47	-204,49	-204,17
37					
38					
39	Angle élev (degrés)	30,00			
40	Aff atmos élev (dB)	0,05	0,10	0,55	0,53
41	Aff pluie élev (dB)	0,00	1,55	6,23	11,84
42	Aff total élev (dB)	0,05	1,65	6,78	12,37
43	Atmos élev + bruit pluie (K)	3,46	88,43	221,28	263,77
44	Cosmique + galactique élev (K)	5,16	1,69	0,47	0,12
45	Bruit total élev K	8,62	90,12	221,75	263,89
46	Puissance bruit élev (dB(W/Hz))	-219,24	-209,05	-205,14	-204,39
47					

5 Qualité de fonctionnement de liaison par atmosphère claire

Le Tableau 4 présente les données de fonctionnement d'une liaison calculée pour une série hypothétique de paramètres relatifs aux équipements et à la distance, sur la base des valeurs d'affaiblissement et de température de bruit correspondant à une propagation par atmosphère claire. Les calculs, correspondant aux numéros de ligne situés à gauche du tableau, se font de la manière suivante:

Ligne 9 Fréquence (GHz)

Fréquence radioélectrique pour laquelle on effectue le calcul.

Ligne 11 P_0 engin spatial (dBW)

Puissance supposée du répéteur de l'engin spatial, dans le cas présent 25 W, donnée par:

$$P_0 = 10 \log 25$$

Ligne 12 Gain, diam 3,7 m (dBi)

Gain supposé de l'antenne d'émission de l'engin spatial, dans le cas présent une antenne parabolique de 3,7 m de diamètre avec un rendement supposé de 100%, donné par:

$$20,40 + 20 \log (\text{diamètre (m)}) + 20 \log (\text{fréquence (GHz)}) \quad \text{dBi}$$

Ligne 13 Aff espace libre (dB)

Affaiblissement pour un trajet en espace libre, dans le cas présent d'une longueur de 8×10^6 km, donné par:

$$230,51 + 20 \log (\text{fréquence (GHz)}) \quad \text{dB}$$

Ligne 14 Gain, diam 70 m (dBi)

Gain de l'antenne de réception de la station terrienne, dans le cas présent une antenne parabolique de 70 m de diamètre avec un rendement supposé de 100%, donné par:

$$20,40 + 20 \log (\text{diamètre (m)}) + 20 \log (\text{fréquence (GHz)}) \quad \text{dBi}$$

Ligne 16 Angle élev (degrés)

Angle d'élévation de l'antenne de réception de la station terrienne et du trajet de propagation à travers l'atmosphère, dans le cas présent 15° .

Ligne 17 Aff atmos (dB)

Affaiblissement dû à l'atmosphère à l'angle d'élévation spécifié; il est repris du Tableau 1.

Ligne 18 Puissance reçue (dBW)

Puissance reçue aux bornes de l'antenne de la station terrienne, donnée par:

$$\text{Ligne 11} + \text{Ligne 12} - \text{Ligne 13} + \text{Ligne 14} - \text{Ligne 17}$$

Ligne 19 Puissance bruit (dB(W/Hz))

Densité spectrale de puissance du bruit reçue; elle est tirée du Tableau 1. Pour l'exemple du Tableau 4, on suppose que la contribution du système de réception de la station terrienne à la température de bruit est égale à zéro.

Ligne 20 P_r/N_0 (dB(W/(W/Hz))) (souvent exprimé en dBHz)

Rapport de la puissance reçue à la densité spectrale du bruit, donné par (ligne 18, Ligne 19). On se fonde sur la variation du rapport P_r/N_0 en fonction de la fréquence pour choisir les bandes de fréquences préférées en terme de qualité de fonctionnement des liaisons. Les fréquences correspondant au rapport P_r/N_0 le plus élevé permettent d'obtenir la meilleure qualité de fonctionnement pour un ensemble donné de conditions et de caractéristiques d'équipements supposées.

Les lignes 22 à 26 et 28 à 32 sont similaires aux lignes 16 à 20 sauf en ce qui concerne les valeurs différentes de l'angle d'élévation.

TABLEAU 4				
Données pour le choix des fréquences préférées				
Qualité de fonctionnement de liaison idéale, espace-Terre, atmosphère claire, sans pluie				
Fréquence (GHz)	1	10	20	30
P_0 engin spatial (dBW)	13,98			
Gain, diam 3,7 m (dBi)	31,77	51,77	57,79	61,31
Aff espace libre (dB)	270,51	290,51	296,53	300,05
Gain, diam 70 m (dBi)	57,30	77,30	83,32	86,84
Angle élév (degrés)	15			
Aff atmos (dB)	0,10	0,18	1,02	0,89
Puissance reçue (dBW)	-167,56	-147,64	-142,46	-138,81
Puissance bruit (dB(W/Hz))	-217,98	-217,14	-210,78	-211,31
P_r/N_0 (dB(W/(W/Hz)))	50,41	69,50	68,31	72,50
Angle élév (degrés)	30			
Aff atmos (dB)	0,05	0,10	0,53	0,46
Puissance reçue (dBW)	-167,51	-147,56	-141,97	-138,38
Puissance bruit (dB(W/Hz))	-219,30	-219,31	-213,27	-213,82
P_r/N_0 (dB(W/(W/Hz)))	51,79	71,75	71,30	75,45
Angle élév (degrés)	75			
Aff atmos (dB)	0,03	0,05	0,27	0,24
Puissance reçue (dBW)	-167,49	-147,51	-141,71	-138,16
Puissance bruit (dB(W/Hz))	-220,19	-221,11	-215,76	-216,32
P_r/N_0 (dB(W/(W/Hz)))	52,70	73,60	74,04	78,16

6 Qualité de fonctionnement de liaison par atmosphère claire plus pluie

Le calcul de qualité de fonctionnement de liaison par atmosphère claire plus pluie est présenté dans le Tableau 5. Les Tableaux 4 et 5 sont similaires sauf que, dans ce dernier, les valeurs d'affaiblissement et de température du bruit sont tirées du Tableau 3. Noter également que le Tableau 5 comprend les effets de la fréquence sur le matériel de la station terrienne: variation du gain d'antenne et contributions à la puissance de bruit totale.

TABLEAU 5

Données pour le choix des fréquences préférées
Qualité de fonctionnement de liaison idéale, espace-Terre, atmosphère claire plus pluie
y compris les effets sur le matériel de la station terrienne

Fréquence (GHz)	1	10	20	30
P_0 engin spatial (dBW)	13,98			
Gain, diam 3,7 m (dBi)	29,55	49,55	55,57	59,09
Aff espace libre (dB)	270,51	290,51	296,53	300,05
Angle élév (degrés)	15			
Gain, diam 70 m (dBi)	55,67	75,35	80,40	82,30
Aff atmos (dB)	0,10	0,18	1,02	0,89
Puissance reçue (dBW)	-171,41	-151,81	-147,60	-145,57
Bruit du ciel (K)	11,55	13,99	60,56	53,56
Bruit réseau DSN* (K)	10,01	16,13	20,97	26,16
Bruit station (K)	-215,26	-213,81	-209,49	-209,58
P_r/N_0 (dB)	43,85	62,00	61,88	64,02
Angle élév (degrés)	30			
Gain, diam 70 m (dBi)	55,67	75,42	80,69	82,95
Aff atmos (dB)	0,05	0,10	0,53	0,46
Puissance reçue (dBW)	-171,36	-151,65	-146,82	-144,49
Bruit du ciel (K)	8,52	8,50	34,15	30,03
Bruit station (K)	8,71	14,83	19,67	24,86
Puissance bruit (dB(W/Hz)) (kTB)	-216,24	-214,92	-211,29	-211,21
P_r/N_0 (dB)	44,88	63,27	64,47	66,72
		-214,97	-211,33	-211,26
Angle élév (degrés)	75			
Gain, diam 70 m (dBi)	55,67	75,32	80,29	82,06
Att atmos (dB)	0,03	0,05	0,27	0,24
Puissance reçue (dBW)	-171,34	-151,71	-146,96	-145,15
Bruit du ciel (K)	6,93	5,61	19,25	16,90
Bruit station (K)	6,41	12,53	17,37	22,56
Puissance bruit (dB(W/Hz))	-217,35	-216,01	-212,96	-212,64
P_r/N_0 (dB(W/(W/Hz)))	46,01	64,31	66,00	67,49

*DSN: réseau pour l'espace lointain