

Recommandation UIT-R P.840-9

(08/2023)

Série P: Propagation des ondes radioélectriques

Affaiblissement dû aux nuages et au brouillard



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 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: <https://www.itu.int/publ/R-REC/fr>)

Séries	Titre
BO	Diffusion par satellite
BR	Enregistrement pour la production, l'archivage et la diffusion; films pour la télévision
BS	Service de radiodiffusion sonore
BT	Service de radiodiffusion télévisuelle
F	Service fixe
M	Services mobile, de radiorepérage et d'amateur y compris les services par satellite associés
P	Propagation des ondes radioélectriques
RA	Radio astronomie
RS	Systèmes de télédétection
S	Service fixe par satellite
SA	Applications spatiales et météorologie
SF	Partage des fréquences et coordination entre les systèmes du service fixe par satellite et du service fixe
SM	Gestion du spectre
SNG	Reportage d'actualités par satellite
TF	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, 2024

© UIT 2024

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.840-9

Affaiblissement dû aux nuages et au brouillard

(Question UIT-R 201/3)

(1992-1994-1997-1999-2009-2012-2013-2017-2019-2023)

Domaine d'application

La présente Recommandation décrit:

- a) une méthode pour estimer l'affaiblissement instantané dû aux nuages le long de trajets obliques pour la gamme de fréquences allant de 1 à 200 GHz lorsqu'on connaît la densité instantanée en eau liquide des nuages intégrée¹ grâce aux données locales, à un profil de référence ou à des cartes numériques référencées;
- b) une méthode pour estimer les statistiques d'affaiblissement dû aux nuages le long de trajets obliques pour la gamme de fréquences allant de 1 à 200 GHz lorsqu'on connaît les statistiques de densité en eau liquide des nuages intégrée grâce aux données locales, à un profil de références ou à des cartes numériques référencées;
- c) une approximation log-normale de l'affaiblissement dû aux nuages le long de trajets obliques à utiliser dans la Recommandation UIT-R P.1853.

Mots clés

Affaiblissement dû aux nuages, densité en eau liquide des nuages, contenu d'une colonne d'air en eau liquide des nuages intégrée, affaiblissement spécifique dû à l'eau liquide de nuage

Acronymes/Abréviations/Glossaire

ASCII	code américain normalisé pour l'échange d'informations (<i>american standard code for information interchange</i>)
CCDF	fonction de distribution cumulative complémentaire (<i>complementary cumulative distribution function</i>)
ECMWF	Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (<i>European centre for medium-range weather forecasts</i>)

Recommandations et Manuel de l'UIT-R connexes

Recommandation UIT-R P.530

Recommandation UIT-R P.618

Recommandation UIT-R P.619

Recommandation UIT-R P.840

Recommandation UIT-R P.1853

Recommandation UIT-R P.2041

Recommandation UIT-R P.2145

¹ La densité en eau liquide des nuages intégrée désigne la quantité totale d'eau liquide des nuages dans une colonne verticale qui s'étend de la surface de la Terre jusqu'à la couche supérieur de l'atmosphère. Les termes de densité en eau liquide des nuages intégrée, teneur totale en eau liquide des nuages, colonne d'eau liquide des nuages totale, contenu d'une colonne d'air en eau liquide des nuages intégrée et contenu total d'une colonne d'air en eau liquide des nuages sont synonymes.

Manuel de radiométéorologie

NOTE – La dernière édition de la Recommandation/du Rapport devrait être utilisée dans tous les cas.

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) qu'il est nécessaire de fournir des indications aux ingénieurs chargés de concevoir des systèmes de télécommunication Terre vers espace à des fréquences supérieures à 10 GHz;
- b) que l'affaiblissement dû aux nuages peut constituer un facteur important, s'agissant en particulier de systèmes hyperfréquences fonctionnant à des fréquences largement supérieures à 10 GHz ou de systèmes à faible disponibilité;
- c) qu'une approximation log-normale de l'affaiblissement dû aux nuages le long de trajets obliques à utiliser dans la Recommandation UIT-R P.1853 est nécessaire;
- d) que des données locales de mesure du contenu total d'une colonne d'air en eau liquide des nuages peuvent ne pas être disponibles;
- e) que des données provenant de systèmes de prévision numérique du temps peuvent fournir des informations sur les paramètres propres aux nuages,

recommande

- 1 pour des valeurs instantanées de la densité en eau liquide des nuages intégrée connues grâce aux données locales, d'utiliser la méthode décrite au § 3.1 pour estimer l'affaiblissement instantané dû aux nuages le long de trajets obliques pour la gamme de fréquences allant de 1 à 200 GHz;
- 2 pour des valeurs de statistiques de densité en eau liquide des nuages intégrée connues grâce à des données historiques portant sur une longue période ou aux cartes figurant dans le § 4, d'utiliser la méthode décrite au § 3.2 pour estimer les statistiques d'affaiblissement dû aux nuages le long de trajets obliques pour la gamme de fréquences allant de 1 à 200 GHz;
- 3 pour une utilisation dans la Recommandation UIT-R P.1853, d'utiliser la méthode décrite au § 3.3 pour effectuer une approximation log-normale de l'affaiblissement dû aux nuages le long de trajets obliques.

Annexe 1

1 Introduction

Dans le cas de nuages ou de brouillard composés entièrement de gouttelettes minuscules, d'un diamètre généralement inférieur à 0,01 cm, l'approximation de Rayleigh est valable pour les fréquences allant jusqu'à 200 GHz, et l'affaiblissement linéique dans de tels nuages ou un tel brouillard s'exprime alors par la formule:

$$\gamma_c(f, T) = K_l(f, T)\rho_l \quad (\text{dB/km}) \quad (1)$$

où:

- γ_c : affaiblissement linéique (dB/km) à l'intérieur du nuage
 K_l : affaiblissement linéique spécifique dû à l'eau liquide de nuage ((dB/km)/(g/m³))
 ρ_l : concentration en eau liquide dans les nuages ou le brouillard (g/m³)
 f : fréquence (GHz)
 T : température de l'eau liquide de nuage (K).

Aux fréquences de l'ordre de 100 GHz et aux fréquences supérieures, l'affaiblissement par le brouillard peut devenir important. La concentration en eau liquide dans le brouillard est en général égale à environ 0,05 g/m³ pour un brouillard modéré (visibilité de l'ordre de 300 m) et de 0,5 g/m³ pour un brouillard épais (visibilité de l'ordre de 50 m).

2 Affaiblissement linéique spécifique dû à l'eau liquide de nuage

On peut utiliser un modèle mathématique basé sur la diffusion de Rayleigh, qui utilise un modèle de Debye double pour la permittivité diélectrique $\varepsilon(f)$ de l'eau pour calculer la valeur de K_l pour les fréquences inférieures à 200 GHz:

$$K_l(f, T) = \frac{0,819f}{\varepsilon''(f)(1+\eta(f)^2)} \quad (\text{dB/km})/(\text{g/m}^3) \quad (2)$$

où f est la fréquence (GHz) et:

$$\eta(f) = \frac{2+\varepsilon'(f)}{\varepsilon''(f)} \quad (3)$$

La permittivité diélectrique complexe de l'eau est donnée par la formule:

$$\varepsilon''(f) = \frac{f(\varepsilon_0-\varepsilon_1)}{f_p[1+(f/f_p)^2]} + \frac{f(\varepsilon_1-\varepsilon_2)}{f_s[1+(f/f_s)^2]} \quad (4)$$

$$\varepsilon'(f) = \frac{\varepsilon_0-\varepsilon_1}{[1+(f/f_p)^2]} + \frac{\varepsilon_1-\varepsilon_2}{[1+(f/f_s)^2]} + \varepsilon_2 \quad (5)$$

où:

$$\varepsilon_0 = 77,66 + 103,3 \left(\frac{300}{T} - 1 \right) \quad (6)$$

$$\varepsilon_1 = 0,0671\varepsilon_0 \quad (7)$$

$$\varepsilon_2 = 3,52 \quad (8)$$

et T est la température de l'eau liquide (K).

Les fréquences de relaxation principale et secondaire, respectivement f_p et f_s , sont:

$$f_p = 20,20 - 146 \left(\frac{300}{T} - 1 \right) + 316 \left(\frac{300}{T} - 1 \right)^2 \quad (\text{GHz}) \quad (9)$$

$$f_s = 39,8f_p \quad (\text{GHz}) \quad (10)$$

3 Méthode de prévision de l'affaiblissement dû aux nuages le long de trajets obliques

Il existe trois méthodes de prévision de l'affaiblissement dû aux nuages le long de trajets obliques:

- 1) Comme décrite au § 3.1, une méthode de prévision instantanée, pour laquelle la densité en eau liquide des nuages intégrée est connue grâce à des données mesurées de manière instantanée au niveau local.

- 2) Comme décrite au § 3.2, une méthode de prévision statistique, pour laquelle les statistiques de la densité en eau liquide des nuages intégrée sont connues grâce à:
- des données locales ou;
 - aux cartes intégrales pour l'emplacement souhaité figurant au § 4.1.
- 3) Comme décrite au § 3.3, la méthode de prévision statistique utilisant l'approximation log-normale le long de trajets obliques, pour laquelle les paramètres de la moyenne et de l'écart type log-normaux sont connus grâce:
- à des données locales ou;
 - aux cartes intégrales pour l'emplacement souhaité figurant au § 4.1.

3.1 Méthode de prévision de l'affaiblissement instantané dû aux nuages le long de trajets obliques

L'affaiblissement instantané dû aux nuages prévu le long de trajets obliques, A_C , vaut:

$$A_C(f) = \frac{K_L(f) \cdot L}{\sin \theta} \quad (\text{dB}) \quad (11)$$

où:

f : fréquence considérée, en GHz

K_L : coefficient d'absorption massique d'eau liquide de nuage, en dB/(kg/m²) ou dB/mm

L : densité en eau liquide des nuages intégrée, en kg/m² ou mm, depuis la surface de la Terre à l'emplacement souhaité

θ : angle d'élévation.

et

$$K_L(f) = K_l(f, T = 273,75K) \cdot \left(A_1 e^{-\frac{(f-f_1)^2}{\sigma_1}} + A_2 e^{-\frac{(f-f_2)^2}{\sigma_2}} + A_3 \right) \quad (12)$$

avec:

$$\begin{cases} A_1 = 0,1522, A_2 = 11,51, A_3 = -10,4912 \\ f_1 = -23,9589, f_2 = 219,2096 \\ \sigma_1 = 3,2991 \times 10^3, \sigma_2 = 2,7595 \times 10^6 \end{cases}$$

3.2 Méthode de prévision de l'affaiblissement statistique dû aux nuages le long de trajets obliques

L'affaiblissement statistique dû aux nuages prévu le long de trajets obliques, A_C , vaut:

$$A_C(f, p) = \frac{K_L(f) \cdot L(p)}{\sin \theta} \quad (\text{dB}) \quad (13)$$

où:

f : fréquence considérée, en GHz

K_L : coefficient d'absorption massique d'eau liquide de nuage, en dB/(kg/m²) ou dB/mm

p : probabilité de dépassement (CCDF) considérée, en %

$L(p)$: densité en eau liquide des nuages intégrée pour la probabilité de dépassement, p , en kg/m² ou en mm, depuis la surface de la Terre à l'emplacement souhaité

θ : angle d'élévation.

et

$$K_L(f) = K_l(f, T = 273,75K) \cdot \left(A_1 e^{-\frac{(f-f_1)^2}{\sigma_1}} + A_2 e^{-\frac{(f-f_2)^2}{\sigma_2}} + A_3 \right) \quad (14)$$

avec:

$$\begin{cases} A_1 = 0,1522, A_2 = 11,51, A_3 = -10,4912 \\ f_1 = -23,9589, f_2 = 219,2096 \\ \sigma_1 = 3,2991 \times 10^3, \sigma_2 = 2,7595 \times 10^6 \end{cases}$$

3.3 Approximation log-normale de l'affaiblissement statistique dû aux nuages le long de trajets obliques

L'approximation log-normale de l'affaiblissement statistique dû aux nuages prévu le long de trajets obliques, A_c , vaut:

$$A_c(f, p) = \begin{cases} \frac{K_L(f) e^{m_L + \sigma_L Q^{-1}\left(\frac{p}{P_L}\right)}}{\sin \theta} & \text{pour } p < P_L \quad (\text{dB}) \\ 0 & \text{pour } p \geq P_L \end{cases} \quad (15)$$

où:

f : fréquence considérée, en GHz

p : probabilité de dépassement (CCDF) considérée, en %

m_L : paramètre de moyenne log-normale à l'emplacement souhaité

s_L : paramètre d'écart type log-normal à l'emplacement souhaité

P_L : probabilité de nuages à l'emplacement souhaité, en %

θ : angle d'élévation

$Q^{-1}(x)$: fonction de distribution cumulative complémentaire normale standard inverse définie dans la Recommandation UIT-R P.1057.

et

$$K_L(f) = K_l(f, T = 273,75K) \cdot \left(A_1 e^{-\frac{(f-f_1)^2}{\sigma_1}} + A_2 e^{-\frac{(f-f_2)^2}{\sigma_2}} + A_3 \right) \quad (16)$$

avec:

$$\begin{cases} A_1 = 0,1522, A_2 = 11,51, A_3 = -10,4912 \\ f_1 = -23,9589, f_2 = 219,2096 \\ \sigma_1 = 3,2991 \times 10^3, \sigma_2 = 2,7595 \times 10^6 \end{cases}$$

NOTE – Si l'emplacement souhaité se situe sur un point de grille de la carte numérique pour P_L où $P_L \leq 0,02$, alors $A_c(f, p) = 0$ dB; si l'emplacement souhaité se situe entre des points de grille de la carte numérique pour P_L où $P_L \leq 0,02$ en l'un quelconque des quatre points de grille environnants, alors $A_c(f, p) = 0$ dB.

4 Cartes numériques relatives au calcul de l'affaiblissement dû aux nuages

4.1 Paramètres statistiques de météorologie annuels et mensuels

Les cartes numériques illustrant les statistiques annuelles et mensuelles mondiales concernant la densité en eau liquide des nuages intégrée, L , en kg/m^2 , ou équivalent en mm, font partie intégrante de la présente Recommandation et figurent dans les parties supplémentaires de celle-ci.

Les cartes numériques illustrant les statistiques annuelles mondiales concernant la densité en eau liquide des nuages intégrée, L , dont on obtient une approximation par une distribution log-normale, font partie intégrante de la présente Recommandation et figurent dans les parties supplémentaires de celle-ci.

4.2 Interpolation

On trouvera au § 4.2.1 une méthode d'interpolation statistique et spatiale permettant de calculer les valeurs annuelles et mensuelles de la densité en eau liquide des nuages intégrée en fonction de la probabilité de dépassement (CCDF) en un emplacement souhaité quelconque à la surface de la Terre.

On trouvera au § 4.2.2 une méthode d'interpolation statistique et spatiale permettant de calculer les valeurs moyennes et les valeurs de l'écart type annuelles et mensuelles de la densité en eau liquide des nuages intégrée, ainsi que les paramètres de la moyenne ou de l'écart type log-normaux de la densité en eau liquide des nuages intégrée en un emplacement souhaité quelconque à la surface de la Terre.

4.2.1 Interpolation spatiale et statistique (CCDF)

Les statistiques annuelles et mensuelles relatives à la densité en eau liquide des nuages intégrée, $L(p)$, en un emplacement souhaité quelconque à la surface de la Terre et la probabilité de dépassement (CCDF), p , à l'intérieur de la plage de probabilité de dépassement des cartes numériques intégrales, peuvent être calculées à l'aide de la méthode d'interpolation suivante:

- a) Déterminer les deux probabilités p_{above} et p_{below} , supérieure et inférieure à la probabilité de dépassement considérée, p , à partir de la série 0,01, 0,02, 0,03, 0,05, 0,1, 0,2, 0,3, 0,5, 1, 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50, 60, 70, 80, 90, 95, 99 et 100% pour les statistiques annuelles et à partir de la série 0,1, 0,2, 0,3, 0,5, 1, 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50, 60, 70, 80, 90, 95, 99 et 100% pour les statistiques mensuelles.
- b) Pour chacun des quatre points de grille environnants, $i = 1, 2, 3$ et 4 , et pour les deux probabilités de dépassement, p_{above} et p_{below} , déterminer la densité en eau liquide des nuages intégrée, L_i , à partir de la carte annuelle ou mensuelle appropriée relative à $L(p)$.
- c) Déterminer L_{above} et L_{below} à l'emplacement souhaité et les deux probabilités p_{above} et p_{below} en réalisant une interpolation bilinéaire de L_i , $i = 1, 2, 3$ et 4 au niveau des quatre points de grille environnants à l'aide de la méthode d'interpolation bilinéaire spécifiée dans l'Annexe 1 de la Recommandation UIT-R P.1144.
- d) Déterminer la densité en eau liquide des nuages intégrée, L , à l'emplacement souhaité et la probabilité de dépassement, p , par interpolation de L_{above} et L_{below} en fonction de p_{above} et p_{below} jusqu'à p sur une échelle linéaire L en fonction de $\log_{10} p$.

4.2.2 Interpolation spatiale et statistique (moyenne et écart type)

Les valeurs annuelles ou mensuelles de la moyenne ou de l'écart type de la densité en eau liquide des nuages intégrée, \bar{L} ou σ_L , les paramètres annuels de la moyenne ou de l'écart type log-normaux de la densité en eau liquide des nuages intégrée, m_L ou s_L , ou la probabilité annuelle de nuages, P_L , en un emplacement souhaité quelconque à la surface de la Terre, peuvent être calculées à l'aide de la méthode d'interpolation bilinéaire spécifiée dans l'Annexe 1 de la Recommandation UIT-R P.1144 aux quatre points environnants du paramètre d'intérêt souhaité X , où $X = \bar{L}, \sigma_L, m_L, s_L$ ou P_L à l'emplacement souhaité.