

Union internationale des télécommunications

**UIT-R**

Secteur des Radiocommunications de l'UIT

**Recommandation UIT-R P.1622-1**  
(08/2022)

**Méthodes de prévision requises pour la  
conception des systèmes Terre-espace  
fonctionnant entre 20 et 375 THz**

**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 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

(Également disponible en ligne: <http://www.itu.int/publ/R-REC/fr>)

Séries	Titre
<b>BO</b>	Diffusion par satellite
<b>BR</b>	Enregistrement pour la production, l'archivage et la diffusion; films pour la télévision
<b>BS</b>	Service de radiodiffusion sonore
<b>BT</b>	Service de radiodiffusion télévisuelle
<b>F</b>	Service fixe
<b>M</b>	Services mobile, de radiorepérage et d'amateur y compris les services par satellite associés
<b>P</b>	<b>Propagation des ondes radioélectriques</b>
<b>RA</b>	Radio astronomie
<b>RS</b>	Systèmes de télédétection
<b>S</b>	Service fixe par satellite
<b>SA</b>	Applications spatiales et météorologie
<b>SF</b>	Partage des fréquences et coordination entre les systèmes du service fixe par satellite et du service fixe
<b>SM</b>	Gestion du spectre
<b>SNG</b>	Reportage d'actualités par satellite
<b>TF</b>	Emissions de fréquences étalon et de signaux horaires
<b>V</b>	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, 2023

© UIT 2023

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.1622-1

**Méthodes de prévision requises pour la conception des systèmes  
Terre-espace fonctionnant entre 20 et 375 THz**

(2003-2022)

**Domaine d'application**

La présente Recommandation décrit les effets de la propagation applicables à la planification des systèmes Terre-espace fonctionnant entre 20 et 375 THz. Elle contient des méthodes de prévision de la propagation concernant les effets de la diffusion de Rayleigh et de Mie et des turbulences de l'atmosphère. Elle fait également mention de la Recommandation UIT-R P.676, qui fournit des méthodes de prévision concernant l'affaiblissement dû à l'absorption atmosphérique.

**Mots clés**

Absorption atmosphérique, turbulences, scintillation d'amplitude, diffusion de Rayleigh, diffusion de Mie.

**Recommandations connexes de l'UIT-R**

Recommandation UIT-R P.676

Recommandation UIT-R P.1621

NOTE – Il convient d'utiliser la dernière révision/édition de la Recommandation.

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

*considérant*

- a) que les fréquences comprises entre 20 et 375 THz conviennent pour certaines communications spatiales au voisinage de la Terre ou en espace lointain;
- b) qu'il est nécessaire de disposer de techniques appropriées de prévision de la propagation pour pouvoir bien planifier les systèmes Terre-espace fonctionnant entre 20 et 375 THz;
- c) que l'on a élaboré des méthodes de prévision des principaux effets de la propagation sur les systèmes Terre-espace fonctionnant entre 20 et 375 THz;
- d) que, dans la mesure du possible, les résultats obtenus avec ces méthodes ont été comparés avec les données disponibles, et qu'il s'est avéré que la précision obtenue était à la fois compatible avec la variabilité naturelle des phénomènes de propagation et suffisante pour la plupart des applications actuelles pour la planification des systèmes fonctionnant entre 20 et 375 THz,

*reconnaissant*

que le numéro 78 de l'article 12 de la Constitution de l'UIT déclare que le Secteur des radiocommunications a pour fonction, entre autres, de procéder «à des études sans limitation quant à la gamme de fréquences et d'adopter des recommandations ...»,

*recommande*

d'utiliser les méthodes (données dans les Annexes 1 et 2) de prévision des effets de la propagation sur les systèmes pour la planification des systèmes Terre-espace dans leurs domaines de validité respectifs indiqués dans les Annexes 1 et 2.

NOTE 1 – On trouvera dans la Recommandation UIT-R P.1621 des informations supplémentaires sur les données fondamentales de propagation pour les fréquences comprises entre 20 et 375 THz.

## Annexe 1

### 1 Introduction

L'atmosphère de la Terre, par sa nature complexe et dynamique, influe sur le fonctionnement des communications entre la Terre et un engin spatial en orbite dans la gamme des fréquences comprises entre 20 et 375 THz. Cette influence se traduit par:

- un affaiblissement général de l'amplitude du signal en raison de l'absorption due aux molécules des gaz de l'atmosphère présents le long du trajet de propagation;
- un affaiblissement général de l'amplitude du signal et un accroissement du bruit de fond dus à la diffusion le long du trajet de propagation par des particules dont le diamètre varie de quelques fractions de longueur d'onde à plusieurs longueurs d'onde;
- des fluctuations de l'amplitude et de la phase du signal reçu en raison de turbulences causées par des variations thermiques dans l'atmosphère.

Les principales techniques et équations nécessaires à l'établissement des méthodes de prévision sont présentées dans les différents paragraphes ci-après.

### 2 Affaiblissements par absorption

Il est possible de calculer l'absorption dans l'atmosphère en utilisant une méthode de calcul par sommation semblable à celle fournie dans la Recommandation UIT-R P.676. Celle-ci nécessiterait cependant des calculs longs et fastidieux, en raison de la présence de milliers de raies d'absorption dans la gamme de fréquences allant de 10 THz à 1 000 THz (30  $\mu\text{m}$  à 0,3  $\mu\text{m}$ ). Les astronomes ont identifié des fenêtres de faible absorption atmosphérique à l'aide des filtres normalisés décrits dans le Tableau 1. Les fréquences centrales de ces filtres permettent de déterminer les régions du spectre utilisables pour les communications le long des trajets Terre vers espace, en termes de caractéristiques d'absorption atmosphérique uniquement. Cette absorption dépendant en partie de la température, de la pression et de la composition chimique locales de l'atmosphère, la largeur de bande de ces filtres ne correspond pas nécessairement à celle des régions à faible absorption dans l'atmosphère. Les quatre bandes de fréquences les plus élevées forment un continuum du spectre visible et ultraviolet caractérisé par une absorption atmosphérique relativement faible, plutôt que des régions distinctes à faible absorption atmosphérique. Les mesures d'absorption atmosphérique doivent être réalisées dès que cela est possible, préalablement à la mise en place d'une station terrienne.

TABLEAU 1

**Filtres astronomiques normalisés pour les fréquences supérieures à 15 THz**

Filtre	Q	N	M	L'	L	K	H
Fréquence centrale (THz)	15	30	63	79	86	136	180
Longueur d'onde ( $\mu\text{m}$ )	20,25	10,1	4,80	3,80	3,50	2,20	1,65
Largeur de bande (THz)	15,2	18,2	15,9	14,7	17,3	30,1	33,3
( $\mu\text{m}$ )	6,50	5,70	1,20	0,70	0,70	0,48	0,30

Filtre	J	I <sub>J</sub>	I <sub>S</sub>	R	V	B	U
Fréquence centrale (THz)	240	330	370	430	560	700	830
Longueur d'onde ( $\mu\text{m}$ )	1,25	0,90	0,80	0,70	0,54	0,43	0,36
Largeur de bande (THz)	74,7	90,5	115,1	138,1	93,2	164,5	163,6
( $\mu\text{m}$ )	0,38	0,24	0,24	0,22	0,09	0,10	0,07

**3 Affaiblissements par diffusion**

On définit généralement la diffusion comme un changement de direction d'énergie causé par des particules présentes le long du trajet de propagation. Les effets se font uniquement sentir sur les systèmes de communication fonctionnant en espace libre aux fréquences comprises entre 20 et 375 THz lorsque:

- des particules sur le trajet de propagation ont un diamètre sensiblement égal à la longueur d'onde du signal émis et détournent de son trajet d'origine une partie de l'énergie de ce signal;
- des particules dans le milieu de propagation ont un diamètre beaucoup plus petit que la longueur d'onde du signal émis et redirigent vers le récepteur un surplus d'énergie.

**3.1 Affaiblissement du signal émis dû à la diffusion de Mie**

La diffusion de Mie est la cause principale des affaiblissements constatés aux fréquences inférieures à 375 THz. Elle est due pour l'essentiel à des particules d'eau microscopiques.

En l'absence de mesures locales caractérisant l'atmosphère, on pourra utiliser la méthode décrite ci-dessous pour calculer l'affaiblissement dû à la diffusion le long des trajets Terre-espace. Si des mesures sont disponibles, on pourra procéder au calcul détaillé explicité dans l'Annexe 2.

La méthode suivante est applicable aux stations terriennes situées entre 0 et 5 km au-dessus du niveau de la mer et fonctionnant entre 150 et 375 THz (fréquences les plus souvent utilisées pour des télécommunications en espace libre). Dans l'hypothèse où l'angle d'élévation de cette station est supérieur à 45°, la précision de la méthode est d'environ 0,1 dB. Toutefois, certaines conditions atmosphériques locales peuvent conduire à des variations de plusieurs dB.

Les paramètres suivants doivent être connus:

$\lambda$ : longueur d'onde ( $\mu\text{m}$ )

$h_E$ : altitude de la station terrienne au-dessus du niveau moyen de la mer (km)

$\theta$ : angle d'élévation (degrés)

Étape 1: Calculer la valeur des coefficients empiriques suivants qui dépendent de la longueur d'onde:

$$a = 0,000487\lambda^3 - 0,002237\lambda^2 + 0,003864\lambda - 0,004442 \quad (1a)$$

$$b = -0,00573\lambda^3 + 0,02639\lambda^2 - 0,04552\lambda + 0,05164 \quad (1b)$$

$$c = 0,02565\lambda^3 - 0,1191\lambda^2 + 0,20385\lambda - 0,216 \quad (1c)$$

$$d = -0,0638\lambda^3 + 0,3034\lambda^2 - 0,5083\lambda + 0,425 \quad (1d)$$

Étape 2: Calculer le coefficient d'extinction  $\tau'$  entre  $h_E$  et  $\infty$ :

$$\tau' = a h_E^3 + b h_E^2 + c h_E + d \quad \text{km}^{-1} \quad (2)$$

Étape 3: Calculer  $A_S$ , affaiblissement dans l'atmosphère dû à la diffusion le long du trajet:

$$A_S = \frac{4,3429\lambda'}{\sin(\theta)} \quad \text{dB} \quad (3)$$

### 3.2 Augmentation du bruit de fond par diffusion de Rayleigh de l'énergie solaire

La diffusion de Rayleigh est négligeable pour les systèmes fonctionnant au-dessous de 375 THz. Il se traduit essentiellement dans les systèmes fonctionnant à plus de 375 THz par l'apparition d'un bruit de fond dans les récepteurs, tant dans le sens Terre vers espace que dans le sens espace vers Terre. La diffusion de Rayleigh de la lumière solaire en exploitation diurne est la source principale du bruit subi par une station terrienne associée à un engin spatial. Un engin spatial pointant en direction de la Terre sera également bruité par la lumière solaire diffusée par la surface de la Terre.

## 4 Effets d'une turbulence sur les systèmes fonctionnant entre 20 et 375 THz

Comme on l'indique dans la Recommandation UIT-R P.1621, l'intensité des turbulences est mesurée en termes de profil  $C_n^2$ .

Les incidences d'une turbulence peuvent généralement être classées comme suit:

- scintillations d'amplitude causées par une redistribution de l'énergie au sein du faisceau;
- modifications apparentes de l'angle d'incidence du signal entrant;
- déplacement du faisceau conduisant à une déviation de son centre par rapport à l'axe de propagation;
- étalement de faisceau dû à la réfraction inégale du front d'onde, ce qui induit une diminution de la puissance parvenant dans le plan d'ouverture de l'antenne réceptrice.

### 4.1 Scintillation d'amplitude

Les turbulences aux fréquences entre 150 et 375 THz engendrent des fluctuations gaussiennes – appelées scintillation d'amplitude – du logarithme de l'éclairement  $N$  de l'onde incidente, par redistribution spatiale et aléatoire dans le temps de la puissance de l'onde à la surface du plan d'onde.

On mesure l'intensité de scintillation en termes de variance de l'amplitude du faisceau. Les paramètres nécessaires à ce calcul sont les suivants:

$h_0$ : altitude de la station terrienne au-dessus du sol (m)

$\lambda$ : longueur d'onde

$\theta$ : angle d'élévation

$Z$ : altitude effective de la turbulence (20 000 m en général).

La scintillation est généralement donnée par la variance  $\sigma^2$  de la grandeur  $\ln(N)$ :

$$\sigma_{\ln N}^2 = 2,253k^{7/6} \sec^{11/6} \varphi \int_{h_0}^Z C_n^2(h) h^{5/6} dh \quad \text{Np}^2 \quad (4a)$$

où:

$k$ : nombre d'onde ( $= 2\pi/\lambda$ )

$\lambda$ : longueur d'onde (m)

$\varphi$ : angle au zénith

$h$ : altitude au-dessus du sol (m).

Ce qui est équivalent à:

$$\sigma_{\ln N}^2 = \frac{1,924 \times 10^8 \int_{h_0}^Z C_n^2(h) (h - h_0)^{5/6} dh}{\lambda^{7/6} \sin^{11/6} \theta} \quad \text{Np}^2 \quad (4b)$$

où la longueur d'onde,  $\lambda$ , est en  $\mu\text{m}$ , et les autres paramètres sont tels que donnés ci-dessus.

On peut convertir le terme précédent en  $\text{dB}N$  grâce à une multiplication par le coefficient dans le numérateur par le rapport de changement de base et un facteur 10, on obtient alors:

$$\sigma_{\text{dB}N}^2 = \left( \frac{10}{\ln(10)} \right)^2 \sigma_{\ln N}^2 = \frac{3,622 \times 10^9 \int_{h_0}^Z C_n^2(h) (h - h_0)^{5/6} dh}{\lambda^{7/6} \sin^{11/6} \theta} \quad \text{dB}^2 \quad (4c)$$

En l'absence de mesures locales de  $C_n^2$ , on pourra utiliser le profil de  $C_n^2(h)$  fourni au § 5.1.1 de la Recommandation UIT-R P.1621.

Le Tableau 2 donne des valeurs de la scintillation d'amplitude pour des fréquences choisies entre 10 THz et 1 000 THz (entre 30  $\mu\text{m}$  et 0,3  $\mu\text{m}$ ). On donne dans chaque cas les valeurs de  $\sigma_{\ln N}^2$  et  $\sigma_{\text{dB}N}^2$ , en supposant que le profil de turbulence est celui du § 5.1.1 de la Recommandation UIT-R P.1621, que l'ouverture d'antenne est inférieure à la longueur de cohérence de l'atmosphère,  $r_0$ , que l'angle d'élévation est égal à  $75^\circ$ , que l'antenne de la station terrienne est placée à 5,5 m au-dessus du sol et que la valeur quadratique moyenne de la vitesse du vent le long du trajet vertical,  $v_{rms}$ , vaut 21 m/s ou 30 m/s.

TABLEAU 2

Exemple de scintillations d'amplitude pour  $C_0 = 1,7 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 

Fréquence (THz)	Longueur d'onde ( $\mu\text{m}$ )	$\sigma_{\ln N}^2$	$\sigma_{\text{dB}N}^2$	$\sigma_{\ln N}^2$	$\sigma_{\text{dB}N}^2$
		$(v_{\text{rms}} = 21 \text{ m/s})$		$(v_{\text{rms}} = 30 \text{ m/s})$	
563,9	0,532	0,23	4,41	0,36	6,88
352,9	0,850	0,14	2,58	0,21	3,98
282,0	1,064	0,10	1,93	0,16	3,12
193,5	1,55	0,07	1,29	0,10	1,93

#### 4.1.1 Scintillation d'amplitude sur les trajets Terre vers espace

La variance  $\sigma_{E-s}^2$  du logarithme de l'éclairement sur les trajets dans le sens Terre vers espace reste faible ( $\ll 4$ ). Des expériences ont confirmé que la probabilité de dépasser cette limite était faible.  $\sigma_{\ln N}^2$  diminue en général d'environ deux ordres de grandeur lorsque la fréquence passe de 24 à 750 THz (lorsque la longueur d'onde diminue de 12,5  $\mu\text{m}$  à 0,4  $\mu\text{m}$ ).

L'effet de moyenne sur l'ouverture d'antenne n'est généralement pas pris en considération sur les trajets Terre vers espace. Dans un front d'onde sortant de l'atmosphère on observe la même redistribution spatiale d'énergie à sa surface que dans le sens espace vers Terre. Toutefois, la diffraction du front d'onde, à mesure que ce dernier se propage dans l'espace, s'accompagne de perturbations ponctuelles d'amplitude et de phase sur de larges zones. Le rayon de cohérence de phase au niveau de l'ouverture de l'antenne de réception de l'engin spatial considéré est donc beaucoup plus grand que la valeur probable de cette ouverture ( $< 1 \text{ m}$ ). Il n'y a par conséquent pas d'effet de moyenne sur l'ouverture d'antenne et la scintillation apparaissant au niveau du récepteur est donnée par:

$$\sigma_{E-s}^2 = \sigma_{\ln N}^2 \quad Np^2 \quad (5)$$

Lorsque la fréquence de fonctionnement est de 150 THz (2,0  $\mu\text{m}$ ) et que  $\sigma_{\ln N}^2$  vaut environ 0,15, on observe un évanouissement de 4 dB pendant environ 1% du temps à une fréquence d'environ 150 Hz pendant environ  $10^{-5} \text{ s}$ .

#### 4.1.2 Scintillation d'amplitude sur les trajets espace vers Terre

La scintillation sur les trajets espace vers Terre peut avoir un effet suffisant pour altérer fortement le fonctionnement des récepteurs. Si l'ouverture d'antenne du récepteur est plus grande que la longueur de cohérence dans l'atmosphère,  $r_0$ , l'effet de la scintillation est spatialement moyenné sur l'ouverture, ce qui diminue la variance  $\sigma_{\ln N}^2$ . Si cet effet de moyenne sur l'ouverture est susceptible de diminuer la scintillation d'amplitude, il n'en demeure pas moins que le bruitage de la phase peut considérablement altérer le fonctionnement d'un système de réception optique à mode spatial unique tel qu'un système à détection cohérente ou un système à détection directe préamplifiée.

La valeur de  $\sigma_{\ln N}^2$  sur un trajet espace vers Terre,  $\sigma_{s-E}^2$ , est modifiée par un facteur de moyennage d'ouverture,  $A$ . On le définit comme le rapport entre la variance du logarithme de l'éclairement calculée pour une ouverture réceptrice de dimensions finies et la valeur de cette même grandeur calculée pour une ouverture ponctuelle. Les étapes du calcul sont les suivantes:



Étape 1: Calculer la valeur de  $z_0$ , altitude d'échelle de turbulence:

$$z_0 = \left[ \frac{\int_{h_0}^Z C_n^2(h) h^2 dh}{\int_{h_0}^Z C_n^2(h) h^{5/6} dh} \right]^{6/7} \quad \text{m} \quad (6)$$

où:

$h_0$ : altitude de la station terrienne au-dessus du sol (m)

$h$ : altitude au-dessus du sol (m)

$Z$ : altitude effective de la turbulence au-dessus du sol (20 000 m en général).

Étape 2: Calculer la valeur de  $A$ , facteur de l'effet de moyenne sur l'ouverture:

$$A = \frac{1}{1 + 1,1 \times 10^7 \left( \frac{D^2 \sin \theta}{z_0 \lambda} \right)^{7/6}} \quad (7)$$

où:

$D$ : diamètre de l'ouverture d'antenne de la station terrienne (m)

$\theta$ : angle d'élévation

$\lambda$ : longueur d'onde ( $\mu\text{m}$ ).

Étape 3: Calculer la valeur de  $\sigma_{s-E}^2$ , variance du logarithme de l'éclairement sur un trajet espace vers Terre:

$$\sigma_{s-E}^2 = A \sigma_{\ln N}^2 \quad \text{Np}^2 \quad (8)$$

## 4.2 Angle d'arrivée

Les fluctuations de l'angle d'arrivée apparent du faisceau reçu, dues aux turbulences, ont pour origine les variations des indices de réfraction des couches d'air présentes le long du trajet de propagation. Ces effets sont négligeables dans le sens Terre vers espace, l'écart quadratique moyen de l'angle d'arrivée étant généralement de l'ordre de 1  $\mu\text{rad}$ . Dans le sens espace vers Terre par contre, cet écart quadratique moyen est en revanche de l'ordre de plusieurs  $\mu\text{rad}$  et doit par conséquent être pris en compte.

On peut utiliser la méthode susmentionnée pour calculer la variance  $\sigma_\beta^2$  de l'angle d'arrivée pour un trajet dans le sens espace vers Terre à travers un profil de turbulence  $C_n^2$  donné et un angle d'élévation supérieur à  $45^\circ$ . Les paramètres suivants sont requis:

$h_0$ : altitude de la station terrienne au-dessus du sol (m)

$\theta$ : angle d'élévation

$D_R$ : diamètre d'ouverture de l'antenne de réception (m)

$Z$ : altitude effective de la turbulence (20 000 m en général).

*Étape 1:* Obtenir le profil vertical de turbulence dans l'atmosphère. Si des données locales ne permettent pas de disposer de statistiques à long terme, on peut évaluer cette grandeur grâce à la méthode décrite au § 5.1.1 de la Recommandation UIT-R P.1621.

*Étape 2:* Calculer la valeur de  $\zeta$ , obtenue par intégration du profil de turbulence:

$$\zeta = \int_{h_0}^Z C_n^2(h) dh \quad \text{m}^{1/3} \quad (9)$$

où  $h$  est l'altitude au-dessus du sol (m).

Si des mesures locales du profil  $C_n^2$  intégré ne sont pas disponibles, l'approximation empirique donnée par les équations (9) à (12) de la Recommandation UIT-R P.1621 permet d'obtenir des résultats satisfaisants dans la plupart des cas.

*Étape 3:* Calculer la valeur de  $\sigma_\beta^2$ , variance de l'angle d'arrivée:

$$\sigma_\beta^2 = \frac{2,914 \zeta D_R^{-1/3}}{\sin \theta} \quad \text{rad}^2 \quad (10)$$

Au moment où il atteint une turbulence le long d'un trajet dans le sens espace vers Terre, le front d'onde est bien plus grand que  $r_0$ , en raison de la divergence du faisceau et de la grande distance de propagation en espace libre. On observe donc un «moyennage» des effets de l'atmosphère sur la largeur du faisceau. Le terme de l'équation (11) relatif au diamètre d'antenne correspond à la fraction du faisceau vue depuis la station terrienne.

### 4.3 Excursion du faisceau

L'excursion du faisceau mesure l'écart du faisceau par rapport à la direction de propagation nominale. Elle est importante dans le sens Terre vers espace et peut être de l'ordre d'une largeur de faisceau. La valeur quadratique moyenne de cette excursion  $r_c$  à une distance  $L$  est donnée par:

$$\sigma_{rc} = 2080 \cdot L \sqrt{\frac{\int_{h_0}^Z C_n^2(h) dh}{D_T^{1/3} \sin(\theta)}} \quad \text{m} \quad (11a)$$

où:

- $L$ : distance de propagation entre la station terrienne et le satellite (km)
- $D_T$ : diamètre d'ouverture de l'antenne d'émission (m)
- $h_0$ : altitude de la station terrienne au dessus du sol (m)
- $Z$ : altitude effective de la turbulence (20 000 m en général).

La division par la distance de propagation permet d'obtenir la valeur quadratique moyenne de l'excursion angulaire,  $\omega_c$ , du faisceau:

$$\sigma_{\omega c} = \frac{\sigma_{rc}}{L \times 10^3} = 2,08 \sqrt{\frac{\int_{h_0}^Z C_n^2(h) dh}{D_T^{1/3} \sin(\theta)}} \quad \text{rad} \quad (11b)$$

Si des mesures locales du profil  $C_n^2$  intégré ne sont pas disponibles, l'approximation empirique donnée par les équations (9) à (12) de la Recommandation UIT-R P.1621 fournit des résultats satisfaisants dans la plupart des cas.

L'excursion de faisceau dans le sens Terre vers espace peut en principe être réduite en utilisant des faisceaux multiples ou un émetteur commandé par un dispositif de poursuite. Elle n'est pas importante dans le sens Terre vers espace, car le faisceau ne peut rencontrer de turbulences que dans les 10 à 20 derniers km du trajet.

#### 4.4 Étalement du faisceau

L'étalement du faisceau correspond à l'accroissement du diamètre du faisceau au-delà des limites dues à la divergence, en raison de la propagation au travers des turbulences de l'atmosphère. Le niveau de puissance parvenant au capteur est donc réduit du fait de l'étalement spatial de l'énergie émise. Toutefois, cet étalement induit par l'atmosphère est généralement très faible comparé à l'effet de la divergence du faisceau et n'engendre pas un affaiblissement notable du signal, que ce soit dans le sens Terre vers espace ou espace vers Terre.

## Annexe 2

### Calculs détaillés de l'affaiblissement dû aux diffusions de Rayleigh et de Mie

On peut utiliser la méthode ci-dessous pour calculer l'affaiblissement le long d'un trajet Terre vers espace si des mesures locales caractérisant l'atmosphère sont disponibles. Les paramètres requis pour ce modèle sont les suivants:

$\lambda$ : longueur d'onde ( $\mu\text{m}$ )

$h_E$ : altitude de la station terrienne au-dessus du niveau de la mer (km)

$\theta$ : angle d'élévation.

*Étape 1:* Calculer la valeur de  $\beta_R$ , coefficient de diffusion de Rayleigh, par pas de 1 km entre l'altitude de la station terrienne et une altitude de 30 km au-dessus du niveau de la mer:

$$\beta_R(h) = \sigma_R n_R(h) \times 10^3 \quad \text{km}^{-1} \quad (12)$$

où:

$\sigma_R$ : section de la diffusion de Rayleigh ( $\text{m}^2$ )

$n_R(h)$ : densité volumique de l'atmosphère ( $\text{m}^{-3}$ ).

Au-dessus de 30 km, les effets de la diffusion de Rayleigh sont négligeables. En l'absence de mesures pour  $\sigma_R$  ou  $n_R$ , il convient d'utiliser les valeurs pour l'atmosphère de référence normalisée données respectivement aux Tableaux 3 et 4.

Étape 2: Calculer la valeur de  $\beta_A$ , coefficient de diffusion de Mie (cas d'un aérosol par exemple) par pas de 1 km entre l'altitude de la station terrienne et une altitude de 30 km au-dessus du niveau de la mer:

$$\beta_A(h) = \frac{\beta_A(0) n_A(h)}{n_A(0)} \quad \text{km}^{-1} \quad (13)$$

où:

$\beta_A(0)$ : coefficient de diffusion de l'aérosol au niveau de la mer ( $\text{km}^{-1}$ )

$n_A(h)$ : densité volumique du nombre d'aérosols à l'altitude  $h$  km au-dessus du niveau de la mer ( $\text{m}^{-3}$ )

En l'absence de mesures pour  $\beta_A$  ou  $n_A$ , il convient d'utiliser les valeurs pour l'atmosphère de référence normalisée données respectivement aux Tableaux 3 et 4.

TABLEAU 3

Sections de diffusion de Rayleigh,  $\sigma_R$ , et coefficient de diffusion de Mie au niveau de la mer,  $\beta_A(0)$ , pour plusieurs longueurs d'onde

Longueur d'onde ( $\mu\text{m}$ )	$\sigma_R^{(1)}$ ( $\text{m}^2$ )	$\beta_A(0)^{(2)}$ ( $\text{km}^{-1}$ )	Longueur d'onde ( $\mu\text{m}$ )	$\sigma_R^{(1)}$ ( $\text{m}^2$ )	$\beta_A(0)^{(2)}$ ( $\text{km}^{-1}$ )
0,50	$6,735 \times 10^{-31}$	0,167	1,06	$3,320 \times 10^{-32}$	0,113
0,55	$4,563 \times 10^{-31}$	0,158	1,26	$1,600 \times 10^{-32}$	0,108
0,60	$3,202 \times 10^{-31}$	0,150	1,67	$5,210 \times 10^{-33}$	0,098
0,65	$2,313 \times 10^{-31}$	0,142	2,17	$1,800 \times 10^{-33}$	0,085
0,70	$1,713 \times 10^{-31}$	0,135	3,50	$2,681 \times 10^{-34}$	0,070
0,80	$9,989 \times 10^{-32}$	0,127	4,00	$1,571 \times 10^{-34}$	0,063
0,90	$6,212 \times 10^{-32}$	0,120			

(1) Les valeurs de  $\sigma_R$  pour les longueurs d'onde ne figurant pas dans ce Tableau peuvent être obtenues par une interpolation logarithmique linéaire.

(2) Les valeurs de  $\beta_A(0)$  pour les longueurs d'onde ne figurant pas dans ce Tableau peuvent être obtenues par une interpolation en loi de puissance.

TABLEAU 4

Densités volumiques du nombre d'aérosols,  $n_A$ , et de l'atmosphère,  $n_R$ , pour plusieurs altitudes au-dessus du niveau de la mer

Altitude (km)	$n_A$ (m <sup>-3</sup> )	$n_R$ (m <sup>-3</sup> )	Altitude (km)	$n_A$ (m <sup>-3</sup> )	$n_R$ (m <sup>-3</sup> )
0	$2,0 \times 10^8$	$2,548 \times 10^{25}$	16	$6,7 \times 10^4$	$3,462 \times 10^{24}$
1	$8,7 \times 10^7$	$2,312 \times 10^{25}$	17	$7,3 \times 10^4$	$2,959 \times 10^{24}$
2	$3,8 \times 10^7$	$2,093 \times 10^{25}$	18	$8,0 \times 10^4$	$2,530 \times 10^{24}$
3	$1,6 \times 10^7$	$1,891 \times 10^{25}$	19	$9,0 \times 10^4$	$2,163 \times 10^{24}$
4	$7,2 \times 10^6$	$1,704 \times 10^{25}$	20	$8,6 \times 10^4$	$1,849 \times 10^{24}$
5	$3,1 \times 10^6$	$1,532 \times 10^{25}$	21	$8,2 \times 10^4$	$1,574 \times 10^{24}$
6	$1,3 \times 10^6$	$1,373 \times 10^{25}$	22	$8,0 \times 10^4$	$1,341 \times 10^{24}$
7	$4,0 \times 10^5$	$1,227 \times 10^{25}$	23	$7,6 \times 10^4$	$1,144 \times 10^{24}$
8	$1,4 \times 10^5$	$1,093 \times 10^{25}$	24	$5,2 \times 10^4$	$9,760 \times 10^{23}$
9	$5,0 \times 10^4$	$9,713 \times 10^{24}$	25	$3,6 \times 10^4$	$8,335 \times 10^{23}$
10	$2,6 \times 10^4$	$8,599 \times 10^{24}$	26	$2,5 \times 10^4$	$7,123 \times 10^{23}$
11	$2,3 \times 10^4$	$7,586 \times 10^{24}$	27	$2,4 \times 10^4$	$6,092 \times 10^{23}$
12	$2,1 \times 10^4$	$6,487 \times 10^{24}$	28	$2,2 \times 10^4$	$5,214 \times 10^{23}$
13	$2,3 \times 10^4$	$5,544 \times 10^{24}$	29	$2,0 \times 10^4$	$4,466 \times 10^{23}$
14	$2,5 \times 10^4$	$4,739 \times 10^{24}$	30	$1,9 \times 10^4$	$3,848 \times 10^{23}$
15	$4,1 \times 10^4$	$4,050 \times 10^{24}$			

NOTE 1 – Les valeurs de  $n_A$  et  $n_R$  à des altitudes ne figurant pas dans ce Tableau peuvent être obtenues par une interpolation linéaire.

Étape 3: Calculer la valeur de  $\beta_T$ , coefficient d'extinction dans l'atmosphère, pour chacun des pas entre l'altitude de la station terrienne et l'altitude de 30 km au-dessus du niveau de la mer:

$$\beta_T(h) = \beta_R(h) + \beta_A(h) \quad \text{km}^{-1} \quad (14)$$

Étape 4: Calculer la valeur de  $\tau'_T$ , coefficient d'extinction de l'atmosphère, entre l'altitude de la station terrienne et l'altitude de 30 km au-dessus du niveau de la mer:

$$\tau'_T = \sum_{h=h_0}^{30} \overline{\beta_T(h)} \Delta h \quad (15)$$

où:

$h_E$ : altitude de la station terrienne au-dessus du niveau de la mer (km)

$\overline{\beta_T(h)}$ : moyenne de  $\beta_T(h)$  et de  $\beta_T(h - 1)$  (km<sup>-1</sup>)

$\Delta h$ : distance entre  $h$  et  $h - 1$  (km).

Étape 5: Calculer la valeur de  $A_S$ , affaiblissement total dû à la diffusion le long du trajet Terre vers espace:

$$A_S = 10 \cdot \log_{10} \left( e^{-\tau'_T / \sin \theta} \right) \approx \frac{4,3429}{\sin \theta} \tau'_T \quad \text{dB} \quad (16)$$