

Recommandation UIT-R P.1814-1

(09/2025)

Série P: Propagation des ondes radioélectriques

**Méthodes de prévision nécessaires
pour la conception de liaisons optiques
de Terre en espace libre**



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 <https://www.itu.int/ITU-R/go/patents/fr>, où l'on trouvera également les Lignes directrices pour la mise en œuvre 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: <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 radiopéage 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	Émissions 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, 2025*

© UIT 2025

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.1814-1*

**Méthodes de prévision nécessaires pour la conception
de liaisons optiques de Terre en espace libre**

(Question UIT-R 228-3/3)

(2007-2025)

Domaine d'application

La présente Recommandation contient des méthodes de prévision de la propagation applicables à la planification des systèmes optiques de Terre en espace libre et des méthodes permettant d'estimer l'affaiblissement par temps clair, de brouillard ou de pluie. Elle traite également de la scintillation et des problèmes liés à la lumière solaire.

Mots clés

Propagation optique, optique en espace libre, affaiblissement dû à la pluie, affaiblissement dû au brouillard, turbulence en air clair, modélisation statistique, marge de liaison

Abréviations/Glossaire

CCDF	fonction de distribution cumulative complémentaire (<i>complementary cumulative distribution function</i>)
DSD	distribution des dimensions des gouttes de pluie (<i>drop size distribution</i>)
FSO	optique en espace libre (<i>free-space optics</i>)
IFOV	champ de visibilité instantané (<i>instantaneous field of view</i>)
IR	infrarouge
LOS	visibilité directe (<i>line of sight</i>)
OMM	Organisation météorologique mondiale
POM	portée optique météorologique
PSD	distribution des dimensions des particules (<i>particle size distribution</i>)
RF	fréquence radioélectrique (<i>radio frequency</i>)

Recommandations de l'UIT connexes

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

Recommandation UIT-R P.1817 – Données de propagation nécessaires pour la conception de liaisons optiques de Terre en espace libre

NOTE – Il convient d'utiliser l'édition la plus récente de la Recommandation en vigueur.

* La présente Recommandation devrait être portée à l'attention des Commissions d'études 1 et 5 des radiocommunications.

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que le spectre optique visible et le spectre infrarouge sont disponibles pour les radiocommunications sur Terre;
- b) qu'il est nécessaire de disposer de données de propagation appropriées pour planifier comme il convient les systèmes de radiocommunication optiques en espace libre (FSO, *free-space optical*) fonctionnant dans le spectre optique visible et dans le spectre infrarouge;
- c) qu'on a élaboré des méthodes permettant de calculer les paramètres de propagation les plus importants nécessaires à la planification des systèmes FSO fonctionnant dans le spectre optique visible et dans le spectre infrarouge;
- d) que ces méthodes ont été testées par rapport aux données disponibles et qu'elles se sont révélées être d'une précision à la fois compatible avec la variabilité naturelle des phénomènes de propagation et suffisante pour la plupart des applications actuelles lors de la planification des systèmes fonctionnant dans le spectre optique visible et dans le spectre infrarouge,

reconnaissant

que le numéro 78 de l'article 12 de la Constitution de l'UIT dispose qu'une des fonctions du Secteur des radiocommunications consiste à procéder «... à des études sans limitation quant à la gamme de fréquences et en adoptant des Recommandations ...»,

recommande

que les méthodes de prévision des paramètres de propagation données dans l'Annexe soient utilisées pour la planification des systèmes optiques en espace libre dans les intervalles de validité respectivement indiqués dans cette annexe.

Annexe

TABLE DES MATIÈRES

	<i>Page</i>
1 Introduction	5
2 Premiers éléments à prendre en considération lors de la conception de liaisons FSO ...	6
2.1 Facteurs météorologiques	6
2.2 Caractéristiques du trajet	6
2.3 Montage de l'émetteur-récepteur	6
3 Affaiblissement géométrique.....	6
4 Affaiblissement atmosphérique	7
4.1 Affaiblissement atmosphérique linéique dû à l'absorption et à la diffusion γ_{atmo}	7
4.2 Affaiblissement sur le trajet	13

4.3	Modèle statistique de l'affaiblissement atmosphérique total affectant les liaisons FSO	15
5	Effets de scintillation	15
6	Effet de la lumière ambiante.....	17
7	Calcul de la marge de la liaison.....	18
8	Autres questions	19

1 Introduction

Lors de la conception de liaisons FSO, il faut tenir compte de plusieurs effets, tels que les pertes dues à l'absorption atmosphérique, à la diffusion et aux turbulences, au microclimat et aux effets localisés, à la longueur de la liaison et à un défaut d'alignement. Il faut également prendre en considération la longueur d'onde choisie, le débit de données, les questions liées à la protection des yeux et les rayonnements solaires ambients.

L'exploitation de systèmes FSO doit se faire en visibilité directe (LoS). Lors des essais de LoS, étant donné que ces systèmes ont recours à un élargissement du faisceau et à un faisceau collimaté, le dégagement requis entre le centre du faisceau et un obstacle est en général égal au rayon du faisceau, ce qui diffère des systèmes radioélectriques qui nécessitent un dégagement de la zone de Fresnel.

Le principal inconvénient des systèmes FSO est qu'ils sont sensibles aux effets atmosphériques comme l'affaiblissement et la scintillation, lesquels réduisent la disponibilité des liaisons. En outre, avec un faisceau étroit, l'alignement du terminal de communication laser prend encore plus d'importance que lorsqu'il s'agit de systèmes radioélectriques.

Pour concevoir des liaisons FSO, il est essentiel d'examiner le bilan de puissance. La marge de liaison M_{link} (dB), qui est la puissance disponible au-dessus de la sensibilité du récepteur, peut être calculée avec l'équation (1):

$$M_{link} = P_e - S_r - A_{geo} - A_{atmo} - A_{scintillation} - A_{system} \quad (1)$$

où:

- P_e (dBm): puissance totale de l'émetteur
- S_r (dBm): sensibilité du récepteur, qui dépend également de la largeur de bande (débit de données)
- A_{geo} (dB): affaiblissement géométrique de la liaison dû à l'étalement du faisceau d'émission en fonction de la distance
- A_{atmo} (dB): affaiblissement atmosphérique dû à l'absorption et à la diffusion
- $A_{scintillation}$ (dB): affaiblissement dû aux turbulences atmosphériques
- A_{system} (dB): toutes les autres pertes liées au système: défaut d'alignement du faisceau, perte optique dans le récepteur, perte due au déplacement du faisceau, diminution de la sensibilité due à la lumière ambiante (rayonnement solaire), etc.

On trouvera dans les paragraphes qui suivent une définition et une méthode de calcul de ces paramètres, ainsi que les premiers éléments à prendre en compte lors de la planification de liaisons FSO.

2 Premiers éléments à prendre en considération lors de la conception de liaisons FSO

Le bon fonctionnement d'un système FSO passe par le choix d'un emplacement adapté pour la liaison. Pour fonctionner de manière optimale, une liaison FSO doit être installée compte tenu des conditions météorologiques, des obstacles physiques et des types de surface que l'on rencontre habituellement le long du trajet, ainsi que de la manière dont est monté l'émetteur-récepteur.

2.1 Facteurs météorologiques

- En fonction des conditions météorologiques, et en particulier du climat local à proximité du trajet choisi pour la liaison, on notera plus ou moins fréquemment la présence de chutes de neige ou de pluie, de bruine, de brume, d'aérosols et de poussière/sable, phénomènes qui entraîneront une absorption et une diffusion du signal émis.

2.2 Caractéristiques du trajet

- Il faut bien sûr éviter les obstacles physiques sur le trajet entre l'émetteur et le récepteur. Il convient de noter qu'à l'âge adulte, un arbre peut grandir de 0,5 à 1 m par an et que la densité de son feuillage varie au cours de l'année.
- Dans le cas d'une liaison entre bâtiments, il faudrait tenir compte des aérations thermiques, du fait de la présence de telles aérations, le trajet de la liaison pourrait être traversé par des remontées d'air chaud, et les turbulences qui en découleraient risqueraient d'entraîner une importante scintillation au niveau du récepteur.
- La topographie et le type de surface au-dessous du trajet en LoS peuvent avoir une incidence notable sur le fonctionnement de la liaison FSO. Les liaisons FSO situées dans des vallées fluviales ou dans des zones maritimes seront souvent amenées à fonctionner par temps de brouillard. La construction de structures sous la liaison risque de provoquer un surplus d'activité thermique dans l'air au-dessus desdites structures, ce qui risque d'accroître la scintillation du signal reçu.

2.3 Montage de l'émetteur-récepteur

- La plupart des systèmes FSO ont des faisceaux très étroits; il est donc essentiel d'aligner correctement l'émetteur et le récepteur, un défaut d'alignement entraînant un affaiblissement du signal important. Le support du télescope doit être stable et on estime qu'il est essentiel qu'il soit monté directement sur un mur épais, ou en haut d'une colonne unique, pour fonctionner de façon fiable. Les mouvements provoqués par la dilatation thermique différentielle ou par des rafales de vent devraient être réduits au minimum.

3 Affaiblissement géométrique

Même par temps clair, le faisceau diverge et le détecteur reçoit donc un signal moins puissant. L'affaiblissement dû à l'étalement du faisceau d'émission en fonction de la distance, appelé affaiblissement géométrique, est donné par l'équation (2):

$$A_{geo}(\text{dB}) = 10 \log_{10} \left(\frac{S_d}{S_{capture}} \right) \quad (2)$$

où:

$S_{capture}$: surface de détection du récepteur (m^2)

S_d : superficie du faisceau d'émission à une distance d , qui correspond à l'approximation suivante:

$$S_d = \frac{\pi}{4}(d \cdot \theta)^2$$

où:

θ : divergence du faisceau (mrad)

d : distance entre l'émetteur et le récepteur (km).

Dans le cas de liaisons courtes, la superficie de la zone de détection peut être supérieure à celle du faisceau. La valeur de A_{geo} devrait alors être fixée à zéro, car la totalité de l'énergie du faisceau est reçue.

4 Affaiblissement atmosphérique

L'affaiblissement atmosphérique A_{atmo} (dB) affectant les liaisons FSO est déterminé selon les étapes de traitement suivantes:

- 1) Calculer l'affaiblissement atmosphérique spécifique pour les facteurs contributifs correspondants (par exemple brouillard, brume, pluie). Cet aspect est traité au § 4.1.
- 2) Fournir une règle permettant de convertir l'affaiblissement linéique en affaiblissement sur le trajet pour chaque facteur contributif. Cet aspect est traité au § 4.2.
- 3) Établir un modèle statistique permettant de calculer l'affaiblissement total sur le trajet à partir de l'affaiblissement sur le trajet pour chaque facteur contributif. Cet aspect est traité au § 4.3.

En ce qui concerne le point 2), lorsque l'on calcule l'affaiblissement sur le trajet A_{path} en multipliant l'affaiblissement linéique par la longueur du trajet, on peut surestimer (statistiquement) A_{path} étant donné que l'affaiblissement linéique est habituellement calculé à partir de mesures en un seul point. L'inhomogénéité spatiale des éléments atmosphériques (par exemple, l'intensité de pluie) le long du trajet et/ou les mécanismes de propagation complexes (par exemple, la diffusion multiple) devraient être pris en compte, par exemple au moyen de facteurs de correction empiriques simples. Cet aspect est traité au § 4.2.

En ce qui concerne le point 3), les différentes composantes de l'affaiblissement sont additionnées au moyen d'une méthode statistique qui combine les fonctions de distribution cumulative complémentaire (CCDF) correspondantes. La fonction CCDF de l'affaiblissement total est ensuite utilisée dans l'équation (25) du bilan de liaison figurant au § 7 pour obtenir la marge de liaison nécessaire pour atteindre une disponibilité cible.

4.1 Affaiblissement atmosphérique linéique dû à l'absorption et à la diffusion γ_{atmo}

L'affaiblissement atmosphérique linéique γ_{atmo} (dB/km), aussi appelé coefficient d'extinction, peut être représenté comme la somme de deux termes:

$$\gamma_{atmo} = \gamma_{clear_air} + \gamma_{excess} \quad (3)$$

où:

γ_{clear_air} : affaiblissement linéique par temps clair dû aux composantes de l'atmosphère

γ_{excess} : affaiblissement linéique dû à la présence occasionnelle d'aérosols, de brume, de brouillard, de pluie, de neige, de grêle, etc.

4.1.1 Affaiblissement linéique par temps clair $\gamma_{clear\ air}$

L'affaiblissement par temps clair est principalement dû à l'absorption par les composantes de l'atmosphère, à savoir des molécules gazeuses. L'absorption atmosphérique à des longueurs d'onde optiques particulières résulte de l'interaction entre des photons et des atomes ou des molécules présentes dans l'air, qui entraîne l'absorption du photon incident et une augmentation de la température. Le coefficient d'absorption dépend:

- du type des molécules de gaz;
- de leur concentration;
- des conditions météorologiques (par exemple la température et la pression).

L'absorption moléculaire est un phénomène lié à la longueur d'onde qui crée des zones de transmission atmosphérique séparées par des régions d'absorption atmosphérique. La vapeur d'eau (H_2O) et le dioxyde de carbone (CO_2) sont des molécules présentes dans l'atmosphère qui entraînent une absorption élevée dans le spectre infrarouge au niveau du sol.

La taille des molécules de gaz étant largement inférieure à la longueur d'onde, l'affaiblissement dû à la diffusion provoqué par les molécules de gaz est négligeable.

En règle générale, on sélectionne des longueurs d'onde laser de sorte qu'elles soient situées dans la zone de transmission atmosphérique; ainsi $\gamma_{clear\ air}$ est négligeable. Les longueurs d'onde généralement utilisées pour les liaisons FSO viables se situent dans le proche infrarouge (c'est-à-dire 780-850 nm ou 1 550 nm). Toutefois, les liaisons en infrarouge lointain qui émettent dans la zone de 10,6 μm peuvent présenter des niveaux d'affaiblissement inférieurs à ceux des liaisons fonctionnant dans le proche infrarouge en présence de particules dont la taille est généralement de l'ordre de quelques microns, comme dans le cas de certains types de brouillard.

4.1.2 Affaiblissement linéique supplémentaire

Les particules occasionnelles (par exemple brouillard, pluie, neige) présentes dans l'atmosphère engendrent un affaiblissement linéique supplémentaire indiqué dans l'équation (3). Ces particules entraînent une redistribution angulaire du flux incident, appelée diffusion, qui provoque une réduction de la propagation du flux dans la direction de départ. Bien que certaines absorbent une partie de l'énergie incidente, ce phénomène diffère de l'absorption gazeuse, qui est un phénomène qui dépend de la longueur d'onde. L'affaiblissement dépend du type et de la taille des particules ainsi que de la longueur d'onde de l'émission laser.

Les particules en suspension les plus courantes dans la troposphère sont les suivantes:

- Les aérosols, c'est-à-dire les systèmes colloïdaux (soit un mélange de deux substances) dans lesquels la phase dispersée comprend des particules solides ou liquides. Le milieu de dispersion est quant à lui un gaz: l'air, dans le cas des aérosols atmosphériques.
- La brume, c'est-à-dire une situation intermédiaire due à l'hydratation des particules d'aérosol lorsque l'humidité relative dépasse le point de déliquescence. Le phénomène d'activation n'est pas enclenché; il n'y a donc pas de gouttelettes d'eau.
- Le brouillard, c'est-à-dire des gouttelettes d'eau qui se développent autour d'une population préexistante de noyaux de condensation (à savoir les particules de brume activées), lorsque la saturation en vapeur d'eau est atteinte.

Certains types de particules en suspension caractéristiques des climats arides et semi-arides provoquent également un affaiblissement non négligeable dans les longueurs d'onde optiques. La poussière et le sable en sont des exemples.

La pluie, la neige et la grêle sont les hydrométéores les plus courants dans l'atmosphère.

Le Tableau 1 présente les plages types de visibilité et de taille pour différentes particules. La taille du diffuseur par rapport à la longueur d'onde du laser détermine les propriétés du phénomène de diffusion, d'où la dépendance à la longueur d'onde de l'affaiblissement linéique d'une population de particules d'un type donné.

La distribution des dimensions des particules (PSD) des aérosols est multimodale et souvent modélisée par autant de fonctions log-normales. Dans le cas de particules bien plus grandes que la longueur d'onde, la diffusion peut être décrite par des paramètres optiques géométriques qui ne dépendent pas de la longueur de l'onde. C'est ce que l'on appelle la représentation optique géométrique de la lumière, c'est-à-dire qu'un front d'onde plan peut être considéré comme composé de plusieurs petits tubes de lumière ou rayons. Selon la théorie de Fresnel sur la diffraction, ces rayons se déplacent indépendamment les uns des autres au-delà d'une certaine distance. L'approche géométrique de l'optique peut être adoptée pour résoudre le problème de la diffusion de la lumière par une particule seulement si la particule est beaucoup plus grande que la longueur d'onde. L'affaiblissement linéique dû à la pluie, à la neige et à la grêle est uniforme entre le visible et l'infrarouge proche et au-delà. La théorie de Mie sur la diffusion peut être appliquée aux particules dont la taille est comparable à la longueur d'onde du laser. Les particules de brouillard, de brume et d'aérosol sont les principaux facteurs contributifs du phénomène de diffusion de Mie. Les deux dernières colonnes du Tableau 1 montrent la dépendance de l'affaiblissement linéique vis-à-vis de la longueur d'onde dans la gamme FSO et la théorie de la diffusion.

TABLEAU 1

Plages types de visibilité et de taille pour différentes particules atmosphériques

Type de diffuseur/particule	Plage type de visibilité	Plage de taille type (rayon des particules)	Affaiblissement linéique en fonction de la longueur d'onde	Diffusion
Gaz atmosphériques	> 100 km	<0,001 µm	$\gamma(\lambda) \sim \lambda^4$	Diffusion de Rayleigh
Aérosols, brume et brouillard léger	$\gtrsim 0,5$ km	Mode de nucléation, mode d'Aitken, mode d'accumulation et mode des grosses particules (0,005-1 µm)	$\gamma(\lambda) \sim \lambda^{-1,6}$ à $\gamma(\lambda) \sim \lambda^0$	Diffusion de Mie
Brouillard épais	$\lesssim 0,5$ km	1-100 µm	$\gamma(\lambda) \sim \lambda^0$	Diffusion optique
Neige	0,3-3 km	1-10 mm		
Pluie	0,5-10 km	0,1-4 mm		

4.1.2.1 Affaiblissement linéique dû aux particules en suspension γ_{sp}

L'affaiblissement linéique d'une particule donnée peut être calculé analytiquement à partir de la section efficace d'extinction des particules prises séparément et de la distribution PSD. Toutefois, la distribution PSD des aérosols, de la brume ou du brouillard est difficile à mesurer et à modéliser. En raison de l'absence de mesures de distribution PSD dans la littérature, on adopte souvent des modèles empiriques. Dans la plupart des cas, l'affaiblissement linéique est lié à la visibilité atmosphérique V .

La définition de la *visibilité* selon les recommandations du Guide des instruments et méthodes d'observation météorologiques publié par l'Organisation météorologique mondiale (OMM) est la suivante: La *visibilité* est équivalente à la portée optique météorologique (POM), c'est-à-dire à la longueur du trajet atmosphérique nécessaire pour réduire l'éclairement énergétique (c'est-à-dire la puissance optique par unité de surface) d'un faisceau parfaitement collimaté provenant d'une lampe à incandescence ayant une température de couleur de 2 700 K de 5% de sa valeur au niveau de l'ouverture de l'émetteur. En utilisant la loi de Bouguer-Lambert, qui prévoit une décroissance exponentielle de l'éclairement énergétique pour la propagation à travers une couche uniforme de particules, on peut aisément établir la relation suivante entre l'affaiblissement linéique γ_{sp} (en dB/km) et V (en km):

$$\Gamma_{sp} = \frac{13}{V} \quad (4)$$

Il convient de noter que cette équation est valable dans le domaine visible du spectre optique (conventionnellement à mi-chemin dans la fenêtre comprise entre 400 et 700 nm, soit à 550 nm) et que rien n'est précisé quant au type de particules présentes sur le trajet. L'équation (4) est donnée pour les particules en suspension; toutefois, en principe, elle reste valable quel que soit le type de conditions atmosphériques.

Les méthodes instrumentales utilisent souvent l'équation (4) pour calculer V à partir de mesures du coefficient de diffusion γ_{sp} (ou de grandeurs similaires) dans un volume échantillon de l'atmosphère. Dans certains cas, une valeur seuil T différente est utilisée pour l'éclairement énergétique; par conséquent, pour plus de commodité, l'équation (4) peut être exprimée de façon plus générale comme suit:

$$\Gamma_{sp} = \frac{K}{V} \quad (5)$$

$$\Gamma_{sp} = \frac{13}{V} \quad (6)$$

Le Tableau 2 résume les équations qu'il est recommandé d'utiliser pour convertir la visibilité en affaiblissement linéique dans le domaine visible ainsi que les incertitudes associées.

TABLEAU 2
Valeurs recommandées du coefficient K pour l'équation (5)
en fonction de la méthode de mesure

Méthode de mesure	K	Incertitude (écart type)
Observation visuelle de nuit d'une source lumineuse	9,6	40%
Observation visuelle de jour d'un objet noir sur l'horizon du ciel	11,3	22%
Mesures instrumentales de la POM	13	5-20%

La plupart des capteurs de visibilité réelle suivent les recommandations de l'OMM et renvoient la POM, c'est-à-dire la visibilité pour $T = 5\%$; la conversion donnée par l'équation (7) est donc nécessaire pour appliquer les modèles présentés dans le présent paragraphe.

$$V_{T=2\%} = \frac{\ln 0,02}{\ln 0,05} V_{T=5\%} = 1,31 V_{T=5\%} \quad (7)$$

Les stations météorologiques situées dans de nombreux aéroports du monde entier mesurent la visibilité et stockent les valeurs dans des registres en ligne, ce qui permet d'évaluer la qualité de fonctionnement locales des systèmes FSO en utilisant les statistiques de premier ordre de ce paramètre. Cependant, la visibilité dépend du microclimat; par conséquent, les données recueillies

dans les aéroports peuvent ne pas correspondre véritablement aux environnements urbains ou suburbains voisins.

La dépendance de $\gamma_{sp} - V$ à la longueur d'onde peut être prise en compte au moyen d'une fonction en loi de puissance, qui correspond également au régime asymptotique de la diffusion de Rayleigh. L'équation simplifiée permettant de calculer l'affaiblissement linéaire dû aux particules en suspension, valable pour $0,4 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 1,55 \mu\text{m}$, est donnée par l'équation (8). La Fig. 1 a) décrit l'affaiblissement linéaire pour trois longueurs d'onde dans la gamme de validité de l'équation (8).

$$\Gamma_{sp}(\lambda) = \frac{17}{V} \left(\frac{0,55 \mu\text{m}}{\lambda} \right)^q \quad (8)$$

où:

V : visibilité (km) définie sur la base d'un seuil de 2%

λ : longueur d'onde (μm)

q : coefficient qui dépend de la répartition des dimensions des particules diffusantes. Il est donné par:

$$\begin{aligned} q &= 1,6 & V > 50 \text{ km} \\ &= 1,3 & 6 \text{ km} < V < 50 \text{ km} \\ &= 0,16 V + 0,34 & 1 \text{ km} \leq V \leq 6 \text{ km} \\ &= V - 0,5 & 0,5 \text{ km} \leq V < 1 \text{ km} \\ &= 0 & V < 0,5 \text{ km} \end{aligned} \quad (9)$$

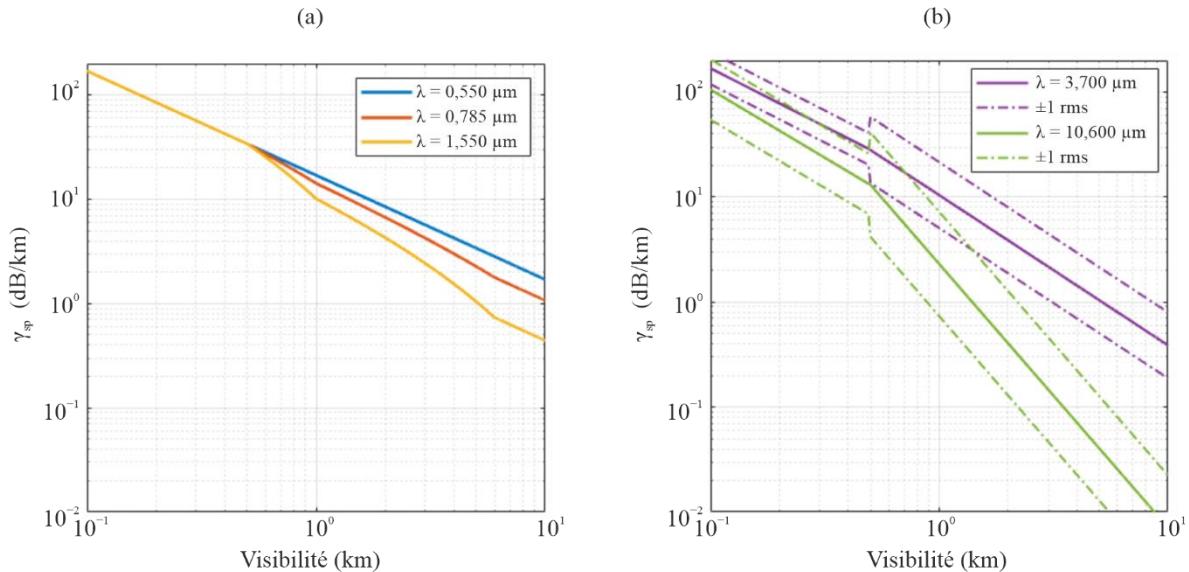
L'équation (10) peut être utilisée pour des longueurs d'onde plus élevées, en particulier pour les infrarouges moyens et lointains (c'est-à-dire pour les longueurs d'onde centrées autour de 3,7 et de $10,6 \mu\text{m}$). Elle est fondée sur le meilleur ajustement des mesures obtenues par plusieurs auteurs. V est la visibilité (km) définie sur la base d'un seuil de 2%. Les coefficients a et b pour les gammes de longueurs d'onde et de visibilité valables sont indiqués dans le Tableau 3. L'affaiblissement linéique calculé pour les deux longueurs d'onde est représenté dans la Fig. 1 b). Il convient de noter que $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ est valable pour une visibilité allant jusqu'à 3 km, comme indiqué dans le Tableau 3.

$$\Gamma_{sp}(\lambda) = aV^b \quad (10)$$

TABLEAU 3
Coefficients a et b pour l'équation (10)

Fenêtre de transmission	Centre de la bande (μm)	Visibilité (km)	Coefficient	
			a	b
IR moyens	3,7	$0,06 \leq V < 0,5$	13,07	-1,11
		$0,5 \leq V < 10$	10,42	-1,43
IR lointains	10,6	$0,06 \leq V < 0,5$	5,30	-1,30
		$0,5 \leq V < 3$	2,30	-2,51

FIGURE 1
Affaiblissement linéique dû aux particules en suspension
pour différentes longueurs d'onde optiques



P.1814-01

4.1.2.2 Affaiblissement linéique dû à la pluie γ_{rain}

Comme indiqué dans le Tableau 1, l'affaiblissement linéique dû à la pluie γ_{rain} est indépendant de la longueur d'onde dans les fenêtres de transmission optique généralement adoptées par les systèmes FSO commerciaux, qui sont les bandes classiques 0,780-0,850 et 1,520-1,600 μm . À des fins pratiques, l'affaiblissement linéique γ_{rain} (en dB/km) est souvent calculé à partir de l'intensité de pluie R (en mm/h) par de simples lois de puissance, à savoir:

$$\gamma_{rain} = kR^\alpha \quad (11)$$

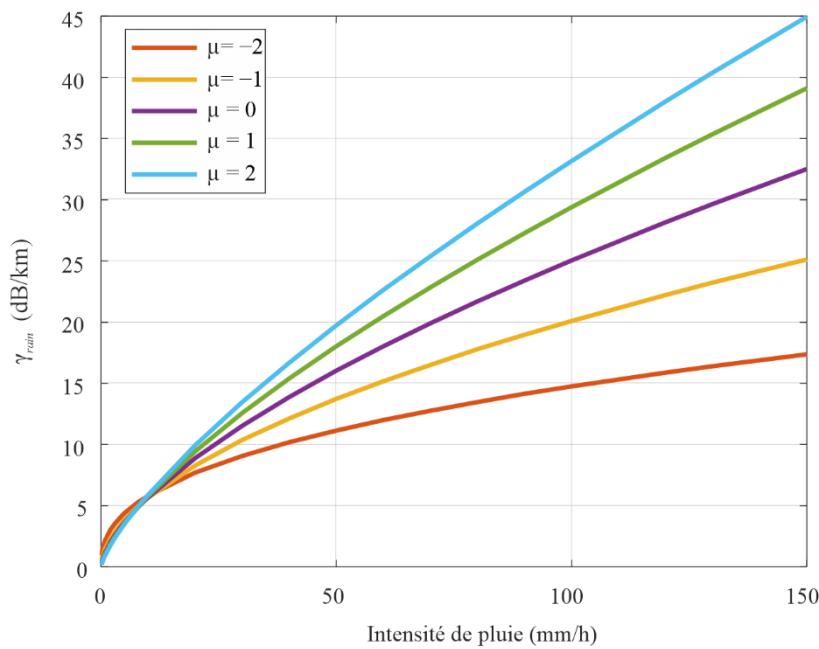
Pour une intensité de pluie donnée, les coefficients k et α dépendent de la distribution de la taille des gouttes de pluie, c'est-à-dire la distribution des dimensions des gouttes de pluie (DSD) des précipitations, comme indiqué clairement. Le Tableau 4 montre la valeur optimale des coefficients k et α , calculée à partir des valeurs de γ_{rain} calculées par la théorie classique de diffusion, en prenant pour hypothèse que la distribution DSD est modélisée au moyen d'une fonction Gamma, cette dernière ne dépendant que du paramètre de forme μ et de l'intensité de pluie R . Les mesures indiquent que le paramètre μ se situe généralement entre -2 et 2. La Fig. 2 montre les courbes de l'équation (11) avec les coefficients du Tableau 4 pour ces valeurs de μ .

TABLEAU 4
Coefficients de l'équation (11) pour différentes valeurs
du paramètre de forme DSD (μ)

μ	k	α
-2	2,2838	0,4050
-1	1,5921	0,5506
0	1,2924	0,6436
1	1,1394	0,7057
2	1,0505	0,7497

FIGURE 2

Affaiblissement linéique dû à la pluie (dB/km) en fonction de l'intensité de pluie (mm/h)
pour différentes valeurs du paramètre de forme μ de la distribution DSD Gamma



P.1814-02

4.2 Affaiblissement sur le trajet

Le présent paragraphe décrit la méthode de calcul de l'affaiblissement sur le trajet le long d'une liaison FSO, pour des longueurs de trajet $L \leq 5$ km (L en km).

4.2.1 Affaiblissement sur le trajet par temps clair A_{clear_air}

La variabilité spatiale de l'affaiblissement dû aux gaz est relativement limitée, d'autant plus pour les trajets inférieurs à 5 km. En principe, on peut supposer que l'affaiblissement linéique par temps clair γ_{clear_air} dont il est question dans le § 4.1.1 est constant le long du trajet. Par conséquent, l'affaiblissement sur le trajet par temps clair est simplement calculé comme suit:

$$A_{clear_air} = \gamma_{clear_air} L \quad (12)$$

4.2.2 Affaiblissement sur le trajet dû aux particules en suspension A_{sp}

La variabilité de la concentration de brouillard le long du trajet doit encore être dûment étudiée et pourrait dépendre de caractéristiques microclimatiques (par exemple: une extrémité de la liaison est plus proche de la campagne, tandis que l'autre se situe en ville). Par conséquent, l'hypothèse la plus simple est que la concentration de brouillard est relativement constante le long du trajet, ce qui conduit à l'expression simple ci-après pour le calcul de l'affaiblissement dû aux particules en suspension:

$$A_{sp} = \gamma_{sp} L \quad (13)$$

4.2.3 Affaiblissement sur le trajet dû à la pluie A'_{rain}

Les précipitations se caractérisent par une inhomogénéité spatiale marquée, de sorte qu'il est impossible de considérer l'intensité de pluie comme étant constante le long d'une liaison FSO. Cela est particulièrement évident lors d'événements convectifs, caractérisés par de petites cellules de pluie (de l'ordre de centaines de mètres). On peut également tenir compte de l'inhomogénéité spatiale des précipitations en invoquant le concept du facteur de réduction du trajet F_{rain} , à partir duquel l'affaiblissement sur le trajet dû à la pluie A'_{rain} est défini comme suit:

$$A'_{rain} = \gamma_{rain} L F_{rain} \quad (14)$$

où:

$$F_{rain} = \frac{1}{1 + \frac{L(R-6.2)}{2623}} \quad (15)$$

et R est l'intensité de pluie.

La théorie classique de diffusion utilisée pour calculer les coefficients de l'équation (11) dans le Tableau 4 repose sur l'hypothèse selon laquelle l'énergie électromagnétique associée à la portion du front d'onde interceptée par une particule est perdue. Toutefois, le fait est que l'énergie incidente est diffusée par la particule selon un schéma angulaire qui, dans le cas des gouttes de pluie et des longueurs d'onde optiques, présente un pic étroit vers l'avant. En conséquence, une fraction non négligeable du rayonnement transmis à travers la couche atmosphérique dans des conditions pluvieuses est reçue en raison de la diffusion des particules. Si le faisceau lumineux subit plusieurs interactions avec des particules avant d'atteindre le récepteur, on parle de diffusion multiple. La diffusion vers l'avant et la diffusion multiple réduisent dans une certaine mesure l'affaiblissement sur le trajet (en particulier lorsque l'intensité de pluie est élevée), ce dont il faut tenir compte au moment d'élaborer un modèle de prévision des statistiques d'affaiblissement dû à la pluie pour les liaisons FSO. En conséquence, l'affaiblissement final sur le trajet dû à la pluie est donné par:

$$A_{rain} = A'_{rain} - G_{ms} \quad (16)$$

où G_{ms} est le gain de diffusion multiple, défini par:

$$G_{ms} = a_{ms} L^{b_{ms}} \quad (17)$$

Les coefficients a_{ms} et b_{ms} dépendent de l'intensité de pluie R pour une forme DSD, comme suit:

$$a_{ms} = p_0 + p_1 \ln(R) + p_2 [\ln(R)]^2 \quad (18)$$

$$b_{ms} = k_0 + k_1 \ln(R) + k_2 [\ln(R)]^2 \quad (19)$$

Les valeurs des coefficients des équations (18) et (19) pour les valeurs considérées de μ sont indiquées dans le Tableau 5.

TABLEAU 5
Coefficients des équations (18) et (19)

μ	p_0	p_1	p_2	k_0	k_1	k_2
-2	0,010012	0,025381	-0,001606	0,250329	-0,035278	0,008349
-1	0,014551	0,010932	0,001532	0,279336	0,023974	0,004421
0	0,015940	-0,001476	0,008297	0,117663	0,029602	0,002142
1	0,023468	0,002897	0,008912	0,090689	0,034955	0,004583
2	-0,000316	0,062233	-0,007835	0,192092	-0,081869	0,033669

4.3 Modèle statistique de l'affaiblissement atmosphérique total affectant les liaisons FSO

Étape 1: L'affaiblissement sur le trajet dû aux particules en suspension A_{sp} peut être calculé à partir de la visibilité V , au moyen des équations (8), (9) et (13).

Étape 2: L'affaiblissement sur le trajet dû à la pluie A_{rain} peut être calculé à partir de l'intensité de pluie, au moyen des équations (11) et (14).

Étape 3: Le surcroît total d'affaiblissement sur le trajet dû à l'atmosphère A_{atmo} peut être calculé à l'aide de la méthode suivante:

- i) Établir un axe d'affaiblissement sur le trajet A (dB).
- ii) Calculer la fonction CCDF de $A_{sp}(p)$ aux points de l'axe A .
- iii) Calculer la fonction CCDF de $A_{rain}(p)$ aux points de l'axe A .
- iv) Additionner les deux valeurs CCDF ci-dessus en chaque point de A afin d'obtenir la fonction CCDF de A_{atmo} dans l'axe A .
- v) Interpoler la fonction CCDF de sur un axe de probabilité p donné pour obtenir les valeurs de A_{atmo} dépassées avec une probabilité p .

Les principaux facteurs atmosphériques nécessaires pour évaluer l'affaiblissement sur le trajet d'une liaison FSO sont la visibilité V et l'intensité de pluie R . L'étape 3 nécessite donc les données d'entrée suivantes:

- 1) Fonction CCDF des données sur la visibilité conditionnée à la présence de particules en suspension à l'emplacement considéré uniquement.
- 2) Fonction CCDF de l'intensité de pluie à l'emplacement considéré.

En l'absence de données locales, on peut utiliser la base de données suivante:

- Pour la visibilité, l'ensemble de données "Global Historical Climatology Network – Daily (GHCN-Daily)" de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) fournit des données brutes avec des séries chronologiques de la visibilité pour de nombreux endroits dans le monde ainsi que des codes SYNOP pour déterminer les conditions météorologiques réelles.
- Pour l'intensité de pluie, la Recommandation UIT-R P.837 fournit la fonction CCDF de l'intensité de pluie à l'échelle mondiale.

5 Effets de scintillation

La scintillation atmosphérique provoquée par les turbulences est un deuxième phénomène atmosphérique important qui affecte l'efficacité des systèmes de communication laser et cause d'importantes variations de la puissance du signal reçu.

Les turbulences atmosphériques entraînent la création de poches d'air temporaires ayant des températures légèrement différentes, ainsi que des densités et des indices de réfraction différents. Il se peut que des données soient perdues à cause du déplacement du faisceau et de la scintillation à mesure que le faisceau laser se déforme en traversant ces zones, dont les indices de réfraction ne sont pas homogènes. L'importance de chaque effet dépend de la taille de ces cellules de turbulence par rapport au diamètre du faisceau laser.

Si la taille de ces cellules est supérieure au diamètre du faisceau, on assiste à une courbure aléatoire du faisceau laser dans son ensemble entraînant une perte du signal si le faisceau se déplace et n'atteint plus l'ouverture du récepteur. Le déplacement du faisceau est moins important pour les ondes longues que pour les ondes courtes, bien que l'incidence de la longueur d'onde sur ce phénomène soit faible.

Plus souvent, si la taille des cellules de turbulence est inférieure au diamètre du faisceau laser, la courbure des rayons et la diffraction entraînent des déformations du front de l'onde du faisceau laser, ce qui entraîne des variations de l'intensité du faisceau laser dans le temps, appelées scintillations, au niveau du récepteur entre 0,01 Hz et 200 Hz.

En règle générale, on étudie les effets des scintillations troposphériques en utilisant le logarithme de l'amplitude χ (dB) du signal observé («log-amplitude»), défini comme étant le rapport exprimé en décibels entre l'amplitude à un instant donné et sa valeur moyenne. L'intensité et le taux de variation (fréquence de scintillation) augmentent avec la longueur d'onde. Pour une onde plane et de faibles turbulences, la variance de la scintillation σ_x^2 (dB²) peut être calculée avec l'équation:

$$\sigma_x^2 = 23,17 \cdot k^{7/6} \cdot C_n^2 \cdot L^{11/6} \quad (20)$$

où:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} : \text{nombre d'onde (m}^{-1}\text{)}$$

L : longueur de la liaison (m)

C_n^2 : paramètre de structure d'indice de réfraction (m^{-2/3}).

L'amplitude maximum des scintillations est de $4\sigma_x$ et l'affaiblissement dû à la scintillation est de $2\sigma_x$. En cas de fortes turbulences, on constate une saturation de la variance donnée par l'équation. La valeur du paramètre C_n^2 n'est pas la même aux longueurs d'onde optiques qu'aux longueurs d'onde millimétriques. Aux longueurs d'onde millimétriques, la scintillation est essentiellement due à des variations de l'humidité, tandis qu'aux longueurs d'onde optiques, elle dépend surtout de la température. Aux longueurs d'onde millimétriques, C_n^2 est approximativement égal à 10^{-13} m^{-2/3} (en général, à ces longueurs d'onde, C_n^2 est compris entre 10^{-14} et 10^{-12} m^{-2/3}), tandis qu'aux longueurs d'onde optiques, C_n^2 est égal à environ 2×10^{-15} m^{-2/3} dans le cas de faibles turbulences (en général, à ces longueurs d'onde, C_n^2 est compris entre 10^{-16} et 10^{-13} m^{-2/3}).

La Fig. 3 montre la variation de l'affaiblissement d'un faisceau optique d'une longueur d'onde de 1 550 nm pour des turbulences faibles, moyennes et fortes à des distances allant jusqu'à 2 000 m. À l'évidence, l'affaiblissement augmente en même temps que les turbulences. Le Tableau 6 montre l'effet des turbulences sur la propagation des ondes optiques et radioélectriques. La scintillation est plus forte dans le cas de longueurs d'onde optiques plus élevées.

FIGURE 3

Variation de l'affaiblissement due à la scintillation en fonction de la distance pour différents types de turbulences à 1 550 nm

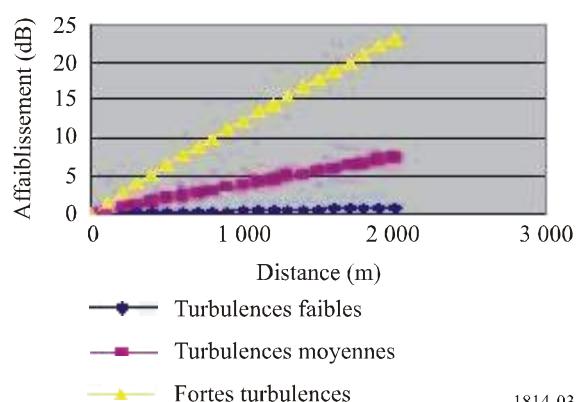


TABLEAU 6

Tableau de profondeur d'évanouissement dû à la scintillation attendu pour un trajet de 1 km

	Turbulences		
	Faibles	Modérées	Élevées
Ondes optiques C_n^2 ($\text{m}^{-2/3}$)	10^{-16}	10^{-14}	10^{-13}
Affaiblissement (0,98 μm) (dB)	0,51	5,06	16,00
Affaiblissement (1,55 μm) (dB)	0,39	3,87	12,25
Ondes millimétriques C_n^2 ($\text{m}^{-2/3}$)	10^{-15}	10^{-13}	10^{-12}
Affaiblissement (40 GHz) (dB)	0,03	0,09	0,27
Affaiblissement (60 GHz) (dB)	0,03	0,11	0,35

Il est possible de réduire la scintillation en utilisant plusieurs faisceaux d'émission ou des récepteurs à grande ouverture. De même, afin de minimiser les effets de la scintillation sur le trajet de transmission, il conviendrait de ne pas installer de systèmes FSO à proximité de surfaces chaudes. Étant donné que la scintillation diminue avec l'altitude, il est recommandé d'installer ces systèmes FSO au-dessus du toit ($>1 \text{ m}$) et loin d'un mur si l'installation a lieu dans un environnement désert.

Les marges prévues pour compenser l'affaiblissement dû au brouillard ou à la pluie peuvent également servir à compenser les effets de la scintillation.

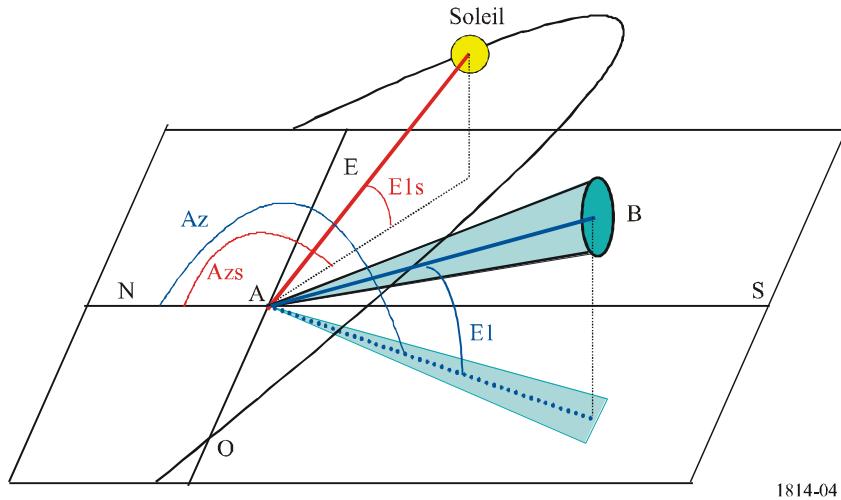
6 Effet de la lumière ambiante

Une conjonction solaire se produit lorsque le soleil ou le reflet de son image se trouve à l'intérieur ou à proximité du champ d'observation instantanée (IFOV) d'un récepteur optique. Le IFOV d'un récepteur est en général au moins aussi large que la divergence du faisceau d'émission. Ce problème devient important lorsque la direction du soleil est parallèle à la liaison optique et que la puissance solaire pénétrant à l'intérieur du récepteur est supérieure à la puissance reçue depuis l'émetteur.

En règle générale, on réduit les brouillages solaires en positionnant le récepteur de sorte que le soleil soit toujours décalé.

La Fig. 4 représente la géométrie du trajet du soleil dans le ciel par rapport à une liaison FSO (A est le récepteur, B l'émetteur).

FIGURE 4
Schéma du trajet du soleil par rapport à une liaison optique en espace libre



La puissance rayonnée par le soleil, $P_{radiated}$, (W/m^2) est définie par l'équation:

$$P_{radiated} = 1\ 200 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - E_{ls}\right) \quad (21)$$

où E_{ls} est la hauteur du soleil (rad).

La puissance reçue est calculée comme suit:

$$P_{solar} = F_{solar} \cdot P_{radiated} \cdot S_{capture} \cdot W_{receiver} / 100 \quad (22)$$

où:

F_{solar} : puissance spectrale du soleil en fonction de la longueur d'onde

$S_{capture}$: superficie de la zone de détection du récepteur (m^2)

$W_{receiver}$: largeur de bande du récepteur (nm)

F_{solar} : modélisé selon la courbe ci-après:

$$F_{solar} = 8,97 \times 10^{-13} \lambda^5 - 4,65 \times 10^{-9} \lambda^4 + 9,37 \times 10^{-6} \lambda^3 - 9,067 \times 10^{-3} \lambda^2 + 4,05 \lambda - 5,70 \quad (23)$$

où:

λ : longueur d'onde (nm).

7 Calcul de la marge de la liaison

Il est possible d'estimer la marge d'évanouissement de la liaison pour un système FSO équipé d'un récepteur situé à une distance d (km) de l'émetteur en respectant les étapes suivantes:

Étape 1: L'affaiblissement géométrique A_{geo} peut être calculé avec l'équation (1).

Étape 2: En règle générale, on sélectionne les longueurs d'onde laser de sorte qu'elles soient situées dans la zone de transmission atmosphérique. On peut ainsi considérer que γ_{clear_air} est négligeable. On peut également, à titre de solution de rechange, estimer l'affaiblissement linéique par temps clair en utilisant la Recommandation UIT-R P.1817.

Étape 3: L'affaiblissement total A_{atmo} est calculé selon la méthode indiquée au § 4.3.

Étape 4: La marge d'évanouissement M_{link} (dB) est calculée comme suit:

$$M_{link} = P_e - S_r - A_{system} - A_{geo} - A_{atmo} \quad (24)$$

où:

P_e (dBm): puissance totale de l'émetteur

S_r (dBm): sensibilité du récepteur

A_{system} (dB): toutes les autres pertes liées au système, mauvais alignement de la liaison, pertes optiques dans le récepteur, pertes dues au déplacement du faisceau, affaiblissement dû à lumière ambiante (rayonnement solaire), entre autres.

8 Autres questions

On trouvera ci-après d'autres facteurs qui devraient être pris en compte lors de la conception d'un système FSO:

Les règlementations internationales en matière de sécurité limitent strictement la puissance maximale des systèmes optiques à la sortie. À 1 550 nm, les régulateurs autorisent une puissance environ 100 fois supérieure à celle autorisée pour des ondes plus courtes «qui ne présentent aucun danger pour les yeux». Le principal inconvénient de ce type de laser est son coût par rapport à celui de systèmes à onde laser plus courte fonctionnant à environ 850 nm.

Les émetteurs-récepteurs FSO peuvent être situés derrière des vitres. L'inclinaison du faisceau par rapport à la vitre est un facteur essentiel. L'axe doit être aussi perpendiculaire que possible, avec toutefois un léger angle (5°) afin de réduire le renvoi du faisceau vers son récepteur. En outre, certains types de vitre contiennent du verre ou ont reçu un traitement prévu pour réduire les risques d'éblouissement. Étant donné que ces vitres sont conçues précisément pour ne pas laisser passer les infrarouges, ces types de traitement peuvent entraîner une réduction du signal de 60% ou plus.

Une faible visibilité réduira l'efficacité et la disponibilité des systèmes FSO. La visibilité peut être faible à un moment donné de l'année ou du jour, ou encore due à un phénomène localisé (brouillard côtier). L'une des solutions pour éliminer les effets négatifs liés à une visibilité faible consiste à réduire la distance entre les terminaux, ce qui permet d'avoir une plus grande marge de liaison pour faire face aux mauvaises conditions météorologiques.