

RECOMMANDATION UIT-R P.1814*

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

(Question UIT-R 228/3)

(2007)

Domaine de compétence

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, de pluie ou de neige. Elle traite également de la scintillation et des problèmes liés à la lumière solaire.

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

- a) 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

- 1** que les méthodes de prévision des paramètres de propagation données dans l'Annexe 1 soient adoptées pour la planification des systèmes optiques en espace libre dans les intervalles de validité respectivement indiqués dans cette annexe.

NOTE 1 – On trouvera dans la Recommandation UIT-R P.1817 – Données de propagation nécessaires pour la conception de liaisons optiques de Terre en espace libre, des renseignements supplémentaires sur des méthodes de prévision de la propagation dans le spectre optique visible et dans le spectre infrarouge.

* La présente Recommandation devrait être portée à l'attention des Commissions d'études 1 et 9 des radiocommunications.

Annexe 1

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 ambiants.

L'exploitation de systèmes FSO doit se faire en visibilité directe (LoS, *line-of-sight*). 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 calculé avec la formule (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 linéique dû à l'absorption et à la diffusion γ_{atmo}

L'affaiblissement atmosphérique linéique γ_{atmo} (dB/km) 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 à la présence de molécules gazeuses)
- γ_{excess} : affaiblissement linéique dû à la présence occasionnelle de brouillard, de buée, de brume, de bruine, de pluie, de neige, de grêle, etc.

L'atmosphère étant un support de transmission qui évolue dans le temps, γ_{atmo} est un paramètre stochastique. Toutefois, comme l'indique l'équation (1), imposer des limites à la disponibilité du système et effets qui en résultent sont généralement traités de manière statistique. La marge de liaison M_{link} correspond au niveau d'affaiblissement que peut tolérer un système donné à une distance donnée.

4.1 Affaiblissement linéique par temps clair γ_{clear_air}

L'affaiblissement par temps clair est principalement dû à l'absorption par 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 (N_2 , O_2 , H_2 , H_2O , CO_2 , O_3 , etc.) qui entraîne l'absorption du photon considéré et une élévation de la température. Le coefficient d'absorption dépend:

- du type des molécules de gaz; et
- de leur concentration.

L'absorption moléculaire est un phénomène lié à la longueur d'onde et qui crée des zones de transmission atmosphérique et des régions d'absorption atmosphérique. L'eau, le dioxyde de carbone, l'ozone et l'oxygène sont des molécules importantes présentes dans l'atmosphère qui entraînent une absorption élevée dans le spectre infrarouge.

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 γ_{clear_air} est négligeable. Les longueurs d'onde généralement utilisées pour les systèmes FSO sont proches de 690, 780, 850 et 1 550 nm. Toutefois, par rapport à celles situées en zone suburbaine relativement peu polluées, les applications exploitées dans des zones urbaines denses à fort contenu d'aérosols utiliseront peut-être une longueur d'onde différente.

4.2 Affaiblissement linéique supplémentaire

L'affaiblissement supplémentaire est celui causé par la présence occasionnelle de particules de brouillard, de buée, de brume, de bruine, de pluie ou de neige. Cette présence entraîne une redistribution angulaire du flux incident, connue sous le nom de diffusion, et provoque une réduction de la propagation du flux dans la direction de départ. Toutefois, elle n'entraîne pas de

perte d'énergie analogue à l'absorption. La dimension physique des sources de diffusion par rapport à la longueur de l'onde laser d'émission détermine le type de diffusion. Le Tableau 1 montre les trois différentes catégories de diffusion, selon la taille de la source et la relation approximative entre la longueur d'onde et le coefficient d'affaiblissement de la source de diffusion (section transversale équivalente). Il indique en outre le type de source pour chaque catégorie pour les ondes visibles et infrarouges.

TABLEAU 1

Catégorie de diffusion en fonction de la taille r de la source de diffusion par rapport à la longueur de l'onde laser d'émission λ et relation approximative entre la longueur d'onde et le coefficient $Q(\lambda)$ d'affaiblissement de la source de diffusion

	Diffusion de Rayleigh	Diffusion de Mie	Diffusion non sélective ou géométrique
	$r \ll \lambda$ $Q(\lambda) \sim \lambda^{-4}$	$r \approx \lambda$ $Q(\lambda) \sim \lambda^{-1,6}$ à $Q(\lambda) \sim \lambda^0$	$r \gg \lambda$ $Q(\lambda) \sim \lambda^0$
Type de source de diffusion	Molécules d'air Brume	Brume Brouillard Aérosol	Brouillard Pluie Neige Grêle

Compte tenu de la relation $Q(\lambda) \sim \lambda^{-4}$ dans le cas de la diffusion de Rayleigh, la part de la diffusion moléculaire de l'air dans le coefficient d'affaiblissement total est négligeable.

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 laser. Les chutes de pluie, la neige, la grêle, les gouttelettes d'eau des nuages et un brouillard épais provoqueront une diffusion géométrique de la lumière laser.

Dans le cas de particules dont la taille est comparable à la longueur de l'onde laser, il est possible d'appliquer la théorie de la diffusion de Mie, diffusion dont les particules de brouillard et d'aérosol sont les principaux facteurs.

Il est possible d'adopter une approche analytique selon laquelle les prévisions de calcul de l'affaiblissement linéique reposent sur les sections transversales équivalentes des particules atmosphériques établies de façon théorique, avec une répartition de la taille des particules déterminée au préalable. Toutefois, la répartition de la taille des particules d'un aérosol ou du brouillard, qui est un paramètre essentiel pour déterminer les propriétés physiques et optiques de ces particules, est difficile à modéliser et mesurer.

4.2.1 Estimation de l'affaiblissement linéique dû au brouillard γ_{fog} (diffusion de Mie)

Etant donné qu'il n'est souvent pas pratique d'adopter une approche analytique pour calculer l'affaiblissement dû à la diffusion de Mie, des méthodes empiriques ont été utilisées par les opérateurs de systèmes FSO. Selon ces méthodes, le coefficient d'affaiblissement dû à la diffusion de Mie est lié à la visibilité.

D'un point de vue technique, la *visibilité* ou champ visuel est la distance à laquelle la lumière ne représente plus que 2% de la puissance de départ ou, d'un point de vue qualitatif, la visibilité est la

distance à laquelle il est possible de distinguer un objet foncé à l'horizon. Le paramètre de visibilité est facile à mesurer et à stocker dans les bases de données des stations météorologiques ou des aéroports et sa répartition permet d'évaluer l'efficacité de ces systèmes de télécommunication sur le plan géographique local. Toutefois, les données recueillies dans les aéroports concernant la visibilité ne reflèteront pas nécessairement les conditions que l'on trouve en milieu urbain ou rural, qui peuvent être très différentes en termes de topographie et de proximité de l'eau.

La formule empirique simplifiée ci-après a été utilisée par les opérateurs des systèmes FSO libre pour calculer l'affaiblissement linéique dû au brouillard, $\gamma_{fog}(\lambda)$ (dB/km):

$$\gamma_{fog}(\lambda) = \frac{3,91}{V} \left(\frac{\lambda}{550 \text{ nm}} \right)^{-q} \quad (4)$$

où:

V : visibilité (km)

λ : longueur d'onde (nm)

q : coefficient qui dépend de la répartition de la taille des particules de diffusion. Il est déterminé à partir de données expérimentales et est donné par:

$$\begin{aligned} q &= 1,6 & V > 50 \text{ km} \\ &= 1,3 & 6 \text{ km} < V < 50 \text{ km} \\ &= 0,585V^{1/3} & V < 6 \text{ km} \end{aligned} \quad (5)$$

Pour obtenir la valeur d'affaiblissement dépassée pendant un pourcentage de temps p donné (c'est-à-dire pour une probabilité donnée), il faut, pour l'équation (4), la valeur de la visibilité qui n'a pas été dépassée pendant ce pourcentage p .

4.2.2 Affaiblissement linéique dû à la pluie γ_{rain}

L'affaiblissement linéique dû à la pluie γ_{rain} (dB/km) correspond à la relation suivante:

$$\gamma_{rain} = k \cdot R^\alpha \quad (6)$$

La Recommandation UIT-R P.837 contient un modèle permettant de déterminer l'intensité de pluie $R(p)$ (mm/h) dépassée pendant un pourcentage donné de l'année moyenne, p , et à un emplacement donné, tandis que l'équation (6) donne l'affaiblissement linéique dépassé pendant le pourcentage de temps p .

Les paramètres k et α dépendent des caractéristiques pluviales et le Tableau 2 contient des valeurs calculées à partir de mesures. Les Fig. 1 et 2 illustrent la relation entre γ_{rain} et l'intensité de pluie R , établie avec les paramètres du Tableau 2 pour le Japon.

TABLEAU 2

Paramètres utilisés pour estimer l'affaiblissement linéique dû à la pluie

Lieu	k	α
Japon	1,58	0,63
France	1,076	0,67

FIGURE 1

Affaiblissement atmosphérique dû à la pluie

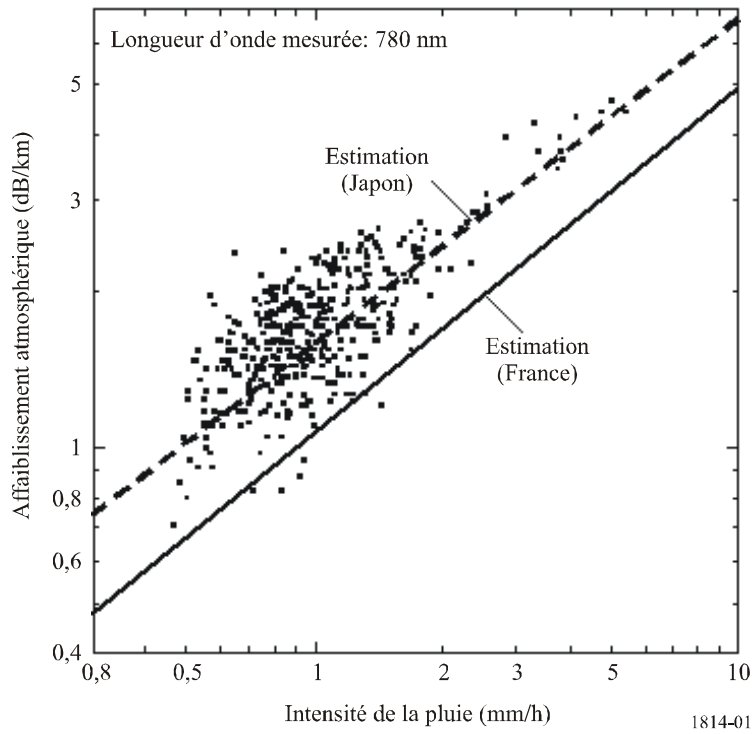
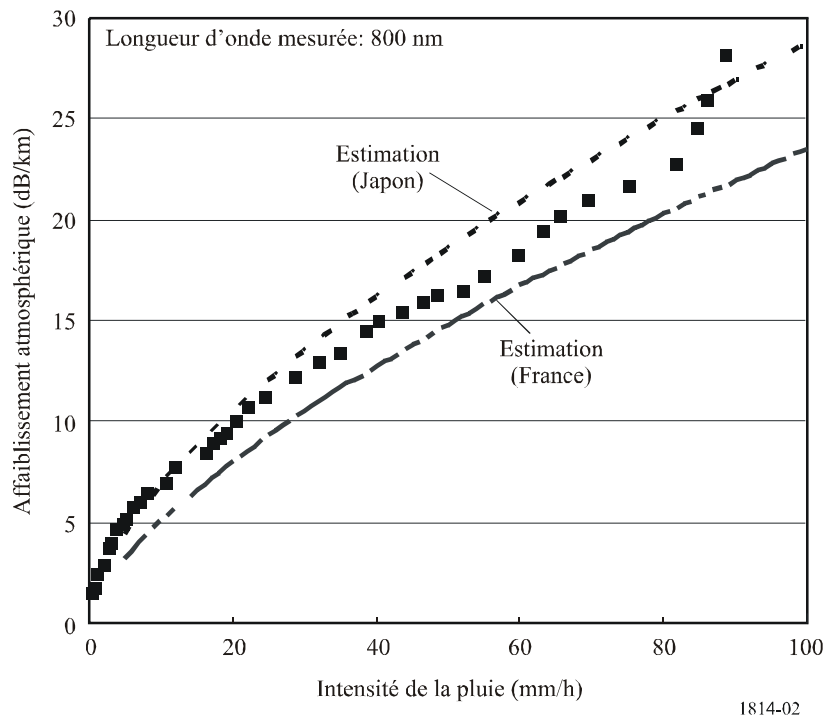


FIGURE 2

Affaiblissement atmosphérique dû à la pluie



4.2.3 Affaiblissement linéique dû à la neige γ_{snow}

L'affaiblissement en fonction de la densité des chutes de neige est calculé au moyen de l'équation (7):

$$\gamma_{snow} = \alpha \cdot S^b \quad (7)$$

où:

- γ_{snow} : affaiblissement linéique dû à la neige (dB/km)
- S : densité des chutes de neige (mm/h)
- α et b : fonctions de la longueur d'onde λ (nm). Le Tableau 3 contient des valeurs estimées pour la neige sèche et la neige humide.

TABLEAU 3
Paramètres utilisés pour estimer l'affaiblissement
linéique dû à la neige

	α	b
Neige humide	$0,000102 \lambda + 3,79$	0,72
Neige sèche	$0,0000542 \lambda + 5,50$	1,38

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 (8):

$$\sigma_x^2 = 23,17 \cdot k^{7/6} \cdot C_n^2 \cdot L^{11/6} \tag{8}$$

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 (8). 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 $10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ (en général, à ces longueurs d'onde, C_n^2 est compris entre 10^{-14} et $10^{-12} \text{ m}^{-2/3}$), tandis qu'aux longueurs d'onde optiques, C_n^2 est égal à environ $2 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ dans le cas de faibles turbulences (en général, à ces longueurs d'onde, C_n^2 est compris entre 10^{-16} et $10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$).

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. A l'évidence, l'affaiblissement augmente en même temps que les turbulences. Le Tableau 4 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

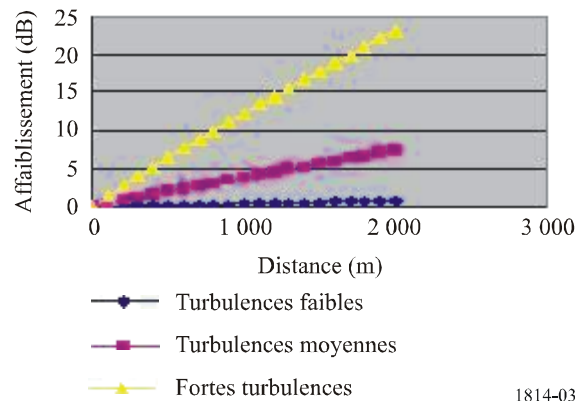


TABLEAU 4

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

	Turbulences		
	Faibles	Modérées	Elevées
Ondes optiques C_n^2 ($m^{-2/3}$)	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 ($m^{-2/3}$)	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. Etant donné que la scintillation diminue avec l'altitude, il est recommandé d'installer ces systèmes FSO au-dessus du toit (>1 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.

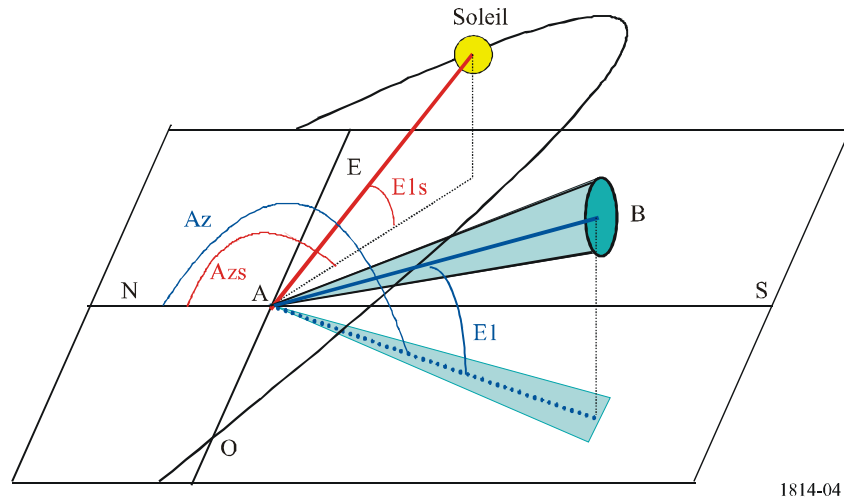
6 Effet de la lumière ambiante

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, *instantaneous field of view*) d'un récepteur optique. Le IFOV d'un récepteur est en générale 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



1814-04

La puissance rayonnée par le soleil, $P_{radiated}$, (W/m^2) est définie par l'équation (9):

$$P_{radiated} = 1\,200 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - E_{Is}\right) \quad (9)$$

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

La puissance reçue est calculée comme suit:

$$P_{solar} = F_{solar} \cdot P_{radiated} \cdot S_{capture} \cdot W_{receiver} / 100 \quad (10)$$

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:

$$F_{solar} = 8,97 \times 10^{-13} \lambda^5 - 4,65 \times 10^{-9} \lambda^4 + 9,37 \times 10^{-6} \lambda^3 - 9,067 \times 10^{-3} \lambda^2 + 4,05 \lambda - 5,70 \quad (11)$$

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:

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

Etape 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. Toutefois, il est possible d'estimer l'affaiblissement linéique par temps clair en utilisant la Recommandation UIT-R P.1817.

Etape 3: Il est possible de calculer l'affaiblissement linéique dû au brouillard γ_{fog} en utilisant les équations (4) et (5). Faute de données recueillies au niveau local, des valeurs types pour la visibilité sont disponibles dans la Recommandation UIT-R P.1817.

Etape 4: Il est possible de calculer l'affaiblissement linéique dû à la pluie γ_{rain} en utilisant l'équation (6) et le Tableau 2.

Etape 5: Il est possible de calculer l'affaiblissement linéique dû à la neige γ_{snow} en utilisant l'équation (7) et le Tableau 3.

Etape 6: La marge d'évanouissement M_{link} (dB) est calculée comme suit:

$$M_{link} = P_e - S_r - A_{system} - A_{geo} \gamma_{clear_air} \cdot d - \gamma_{fog} \cdot d - \gamma_{rain} \cdot d - \gamma_{snow} \cdot d$$

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), etc.

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 réglementations internationales en matière de sécurité limitent strictement la puissance maximale des systèmes optiques à la sortie. A 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. Etant 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.