

Union internationale des télécommunications

UIT-R

Secteur des Radiocommunications de l'UIT

Recommandation UIT-R P.1817-1
(02/2012)

**Données de propagation nécessaires
pour la conception de liaisons
optiques de Terre en espace libre**

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 l'Annexe 1 de 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 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

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

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

Note: Cette Recommandation UIT-R a été approuvée en anglais aux termes de la procédure détaillée dans la Résolution UIT-R 1.

Publication électronique
Genève, 2012

© UIT 2012

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.1817-1*

Données de propagation nécessaires pour la conception de liaisons optiques de Terre en espace libre

(Question UIT-R 228/3)

(2007-2012)

Domaine d'application

La présente Recommandation fournit des données de propagation nécessaires pour la conception de liaisons optiques en espace libre (FSO, *free-space optic*) et pour la planification des systèmes optiques en espace libre, dans les domaines de validité respectifs indiqués dans la Recommandation.

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que le spectre des ondes optiques visibles et infrarouges est disponible pour les radiocommunications dans les milieux terrestres;
- b) que, pour la planification correcte des systèmes de radiocommunication optiques en espace libre (FSO, *free-space optic*) fonctionnant dans le spectre des ondes optiques visibles et infrarouges, il est nécessaire de disposer de données de propagation appropriées;
- c) que des méthodes ont été développées pour calculer les paramètres de propagation les plus importants nécessaires lors de la planification des systèmes optiques en espace libre fonctionnant dans le spectre des ondes optiques visibles et infrarouges;
- d) que, dans la mesure du possible, ces méthodes ont été testées par rapport aux données disponibles et qu'elles ont montré une précision à la fois compatible avec la variabilité naturelle des phénomènes de propagation et adaptées à la plupart des applications actuelles dans la planification des systèmes fonctionnant dans le spectre des ondes optiques visibles et infrarouges,

reconnaissant

- a) que le numéro 78 de l'article 12 de la Constitution de l'UIT indique qu'une fonction du Secteur des radiocommunications consiste à répondre à l'objet de l'Union, « ... en procédant à des études sans limitation quant à la gamme de fréquences et en adoptant des recommandations ... »,

recommande

1 d'adopter, pour la planification des systèmes optiques en espace libre, les méthodes de prévision des paramètres de propagation de l'Annexe 1, dans les domaines de validité respectifs indiqués dans l'Annexe.

NOTE 1 – Des informations supplémentaires sur les méthodes de prévision de la propagation pour des fréquences dans le spectre des ondes optiques visibles et infrarouges sont fournies dans une Recommandation UIT-R sur les méthodes de prévision nécessaires pour la conception de liaisons optiques de Terre en espace libre.

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

Annexe 1

1 Considérations relatives à l'atmosphère

Les liaisons FSO sont dégradées par l'absorption et la diffusion de lumière par l'atmosphère terrestre. L'atmosphère interagit en effet avec la lumière du fait de sa composition. Elle est normalement composée de différentes substances moléculaires et de petites particules en suspension appelées aérosols. L'interaction entre l'atmosphère et la lumière entraîne une grande variété de phénomènes: absorption sélective en fréquence, diffusion et scintillation.

- L'absorption sélective en fréquence à des longueurs d'onde optiques spécifiques résulte de l'interaction entre les photons et des atomes/molécules, qui entraîne l'extinction des photons incidents, une élévation de la température et une émission radiative.
- La diffusion atmosphérique résulte de l'interaction entre les photons et les atomes/molécules dans le milieu de propagation. La diffusion entraîne une redistribution angulaire du rayonnement avec ou sans modification de la longueur d'onde.
- La scintillation résulte d'une turbulence thermique dans le milieu de propagation qui entraîne la formation de cellules aléatoirement réparties. Ces cellules sont de tailles variables (10 cm – 1 km), de températures différentes et d'indices de réfraction différents, ce qui provoque des phénomènes de diffusion, de trajets multiples et de variation des angles d'arrivée. D'où une fluctuation de l'amplitude du signal reçu à des fréquences de 0,01 à 200 Hz. La scintillation provoque aussi une distorsion de la surface d'onde qui entraîne une défocalisation du faisceau.

En outre, un rayonnement solaire colinéaire à la direction de la liaison FSO peut avoir une incidence sur la qualité de fonctionnement de cette liaison.

2 Absorption moléculaire

L'absorption moléculaire résulte de l'interaction entre le rayonnement optique et les atomes/molécules présents dans le milieu (N_2 , O_2 , H_2 , H_2O , CO_2 , O_3 , Ar, etc.). Le coefficient d'absorption dépend du type et de la concentration des molécules de gaz. Le spectre d'absorption est défini par les variations spectrales du coefficient d'absorption. La nature du spectre dépend des variations des niveaux d'énergie possibles du gaz, provoquées essentiellement par la transition des électrons, la vibration des atomes et la rotation des molécules. Une augmentation de la température ou de la pression tend à élargir les raies spectrales d'absorption par excitation des niveaux d'énergie supérieurs et par effet Doppler. L'absorption moléculaire est un phénomène sélectif qui génère des fenêtres de transmission atmosphérique relativement transparentes et des bandes d'absorption atmosphérique relativement opaques.

Les fenêtres de transmission dans la bande optique sont les suivantes:

- Visible et IR très proche: de 0,4 à 1,4 μm
- IR proche ou IR I: de 1,4 à 1,9 μm et de 1,9 à 2,7 μm
- IR moyen ou IR II: de 2,7 à 4,3 μm et de 4,5 à 5,2 μm
- IR lointain ou IR III: de 8 à 14 μm
- IR extrême ou IR IV: de 16 à 28 μm .

Les molécules gazeuses possèdent des niveaux d'énergie quantifiés propres à chaque type de molécule. Elles peuvent absorber de l'énergie (ou photons) sous l'effet d'un rayonnement électromagnétique incident, qui provoque une transition d'un niveau d'énergie initial, e_i , vers un niveau d'énergie supérieur, e_f . L'énergie de rayonnement diminue alors sous l'effet de la perte d'un ou plusieurs photons.

Ce phénomène n'a lieu que si la fréquence de l'onde incidente correspond exactement à l'une des fréquences de résonance de la molécule en question. Il est décrit par la formule suivante:

$$\nu_0 = \frac{e_f - e_i}{h} \quad (1)$$

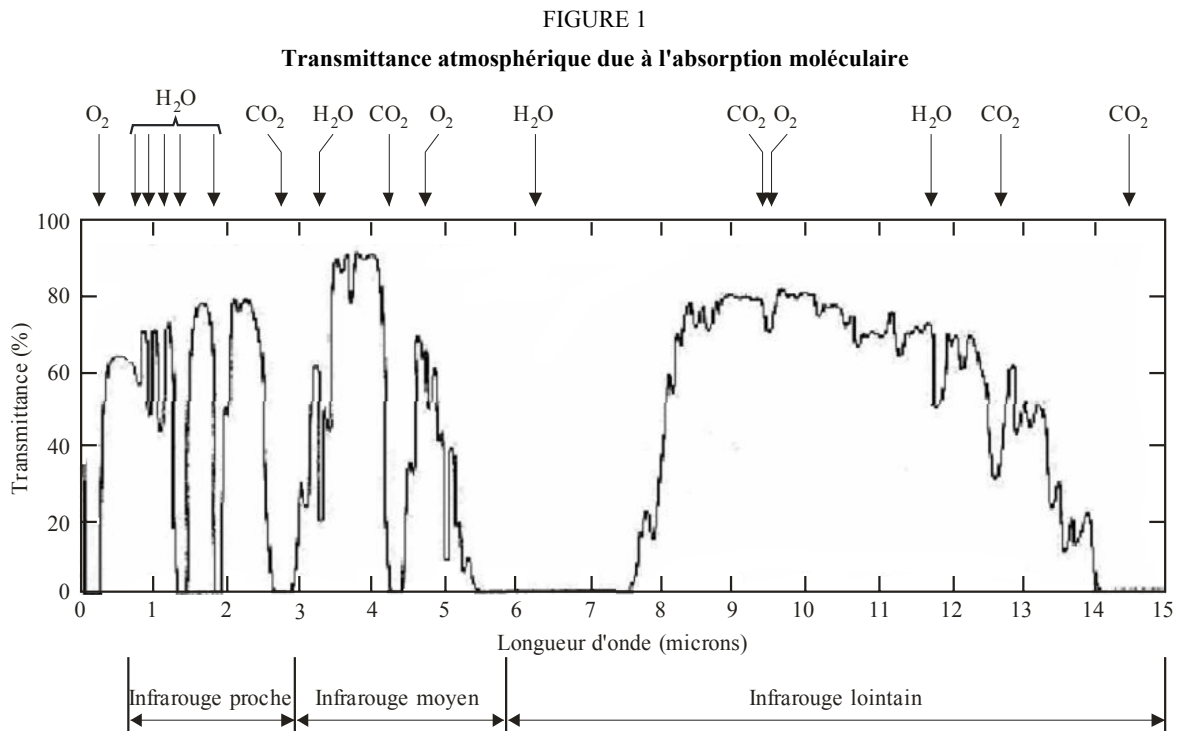
où:

ν_0 : fréquence de l'onde incidente (Hz);

h : constante de Planck, $h = 6,6262 \cdot 10^{-34}$ J-s.

Les paramètres fondamentaux qui déterminent l'absorption due à la résonance moléculaire sont: les niveaux d'énergie possibles de chaque type de molécules, la probabilité de transition d'un niveau d'énergie e_i à un niveau d'énergie e_f , l'intensité des raies de résonance et le profil naturel de chaque raie.

En général, le profil de chaque raie d'absorption est modifié par effet Doppler lorsque les molécules se déplacent par rapport à l'onde incidente, ainsi que par les collisions dues aux interactions entre les molécules. Ces phénomènes entraînent un élargissement spectral de la raie naturelle de chaque molécule. Les profils de raie d'absorption de certaines molécules, telles que le dioxyde de carbone (CO_2), la vapeur d'eau (H_2O), l'azote (N_2) et l'oxygène (O_2), peuvent s'éloigner suffisamment de chaque raie centrale pour entraîner un continuum d'absorption. La Fig. 1 montre la transmittance atmosphérique nominale mesurée due à l'absorption moléculaire sur une liaison horizontale de 1 820 m au niveau de la mer.



3 Diffusion moléculaire

La diffusion moléculaire résulte de l'interaction de la lumière avec des particules atmosphériques dont la taille est inférieure à la longueur d'onde de la lumière incidente. La diffusion par les molécules atmosphériques gazeuses (diffusion de Rayleigh) contribue à l'affaiblissement global du rayonnement électromagnétique.

Le coefficient d'extinction due à la diffusion moléculaire, $\beta_m(\lambda)$, est donné par:

$$\beta_m(\lambda) = \frac{24\pi^3}{\rho\lambda^4} 10^3 \left(\frac{[n(\lambda)]^2 - 1}{[n(\lambda)]^2 + 2} \right) \left(\frac{6 + 3\delta}{6 - 7\delta} \right) \quad (2)$$

où:

- $\beta_m(\lambda)$: coefficient de diffusion moléculaire (km^{-1});
- λ : longueur d'onde (μm);
- ρ : densité moléculaire (m^{-3});
- δ : facteur de dépolarisation de l'air ($\cong 0,03$);
- $n(\lambda)$: index de réfraction de l'air.

Une valeur approchée de $\beta_m(\lambda)$ est donnée par:

$$\beta_m(\lambda) = A\lambda^{-4} \quad (3)$$

où:

$$A = 1,09 * 10^{-3} \frac{P}{P_0} \frac{T_0}{T} \quad \text{km}^{-1} \text{ m}^4 \quad (4)$$

et

- P : pression atmosphérique (mbar);
- P_0 : 1 013 mbar;
- T : température atmosphérique (K);
- T_0 : 273,15 K.

La diffusion moléculaire pour des longueurs d'onde infrarouges est négligeable et la diffusion de Rayleigh concerne principalement les longueurs d'onde allant de l'ultraviolet au visible. La couleur bleue d'un ciel clair est due à ce type de diffusion.

4 Absorption par les aérosols

Les aérosols sont des particules solides ou liquides extrêmement fines, en suspension dans l'atmosphère, possédant une vitesse de chute très faible (glace, poussière, fumée, etc.). Leur taille est généralement comprise entre 10^{-2} et $100 \mu\text{m}$. Le brouillard, la poussière et les particules d'embrun marin sont des exemples d'aérosols.

Les aérosols influent sur les conditions d'affaiblissement atmosphérique selon leur composition chimique, leur taille et leur concentration. Dans les contextes maritimes, les aérosols sont principalement composés de gouttelettes d'eau (écume, brouillard, bruine, pluie), de cristaux de sel, et de diverses particules venant du continent, dont le type et la densité dépendent à la fois de la distance et des caractéristiques des côtes.

Le coefficient d'extinction due à l'absorption par les aérosols, $\alpha_n(\lambda)$, est donné par:

$$\alpha_n(\lambda) = 10^5 \int_0^{\infty} Q_a \left(\frac{2\pi r}{\lambda}, n'' \right) \pi r^2 \frac{dN(r)}{dr} dr \quad \text{km}^{-1} \quad (5)$$

où:

λ : longueur d'onde (μm);

$dN(r)/dr$: distribution en taille de particules par unité de volume (cm^{-4});

n'' : partie imaginaire de l'indice de réfraction, n , de l'aérosol considéré;

r : rayon des particules (cm);

$Q_a(2\pi r/\lambda, n'')$: section efficace d'absorption pour un type d'aérosol donné.

La théorie de Mie permet de prévoir le champ électromagnétique diffracté par des particules sphériques homogènes. Les diamètres équivalents d'absorption (Q_a) et de diffusion (Q_d) sont fonctions de la taille des particules, de l'indice de réfraction et de la longueur d'onde incidente. Ils représentent la part d'une onde incidente pour laquelle la puissance absorbée, respectivement diffusée, est égale à la puissance incidente.

L'indice de réfraction des aérosols dépend de leur composition chimique et de la longueur d'onde. Elle est désignée par $n = n' + n''$, où n' est fonction de la capacité de diffusion de la particule, et n'' est fonction de son absorption.

Dans les régions spectrales du visible et de l'infrarouge proche, la partie imaginaire de l'indice de réfraction est extrêmement petite et peut être négligée dans le calcul de l'affaiblissement global (extinction). Dans les régions spectrales de l'infrarouge lointain, la partie imaginaire de l'indice de réfraction doit être prise en compte.

5 Diffusion par les aérosols

La diffusion par les aérosols (diffusion de Mie) apparaît lorsque la taille des particules est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde de la lumière incidente. L'affaiblissement est fonction de la fréquence et de la visibilité, qui dépend de la distribution en taille des particules. Ce phénomène constitue le facteur le plus limitant pour le déploiement de systèmes optiques en espace libre sur de longues distances. Dans la région optique, l'affaiblissement est principalement causé par la brume et le brouillard et peut atteindre 300 dB/km, alors que dans la région millimétrique l'affaiblissement par la pluie est normalement de quelques dB/km.

Le coefficient d'extinction due à la diffusion par les aérosols, β_n , est donné par la formule suivante:

$$\beta_n(\lambda) = 10^5 \int_0^{\infty} Q_d \left(\frac{2\pi r}{\lambda}, n' \right) \pi r^2 \frac{dN(r)}{dr} dr \quad \text{km}^{-1} \quad (6)$$

où:

λ : longueur d'onde (μm);

$dN(r)/dr$: distribution en taille des particules par unité de volume (cm^{-4});

n' : partie réelle de l'indice de réfraction n de l'aérosol;

r : rayon des particules (cm);

$Q_d(2\pi r/\lambda, n')$: section efficace de diffusion pour un type d'aérosol donné.

La théorie de Mie permet de prévoir le coefficient de diffusion Q_d dû aux aérosols, en supposant que les particules sont sphériques et suffisamment séparées l'une de l'autre pour pouvoir calculer le champ diffusé dans l'hypothèse d'une diffusion (simple) en champ lointain.

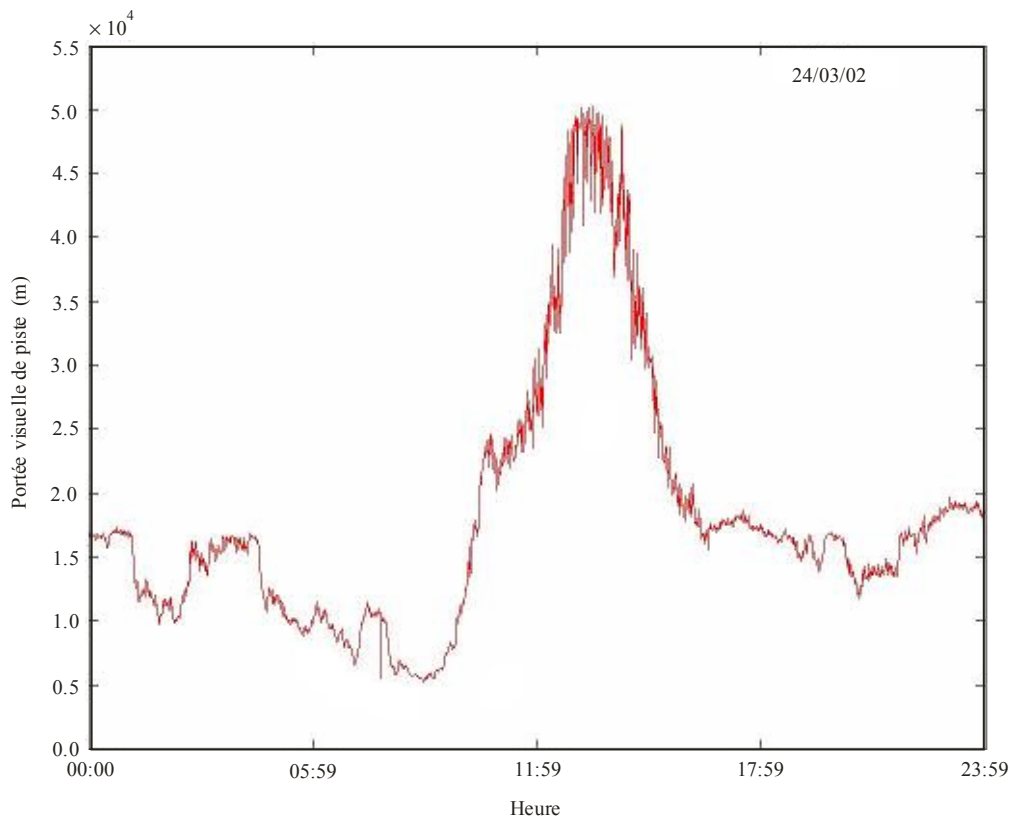
La section efficace de diffusion Q_d dépend fortement de la taille de l'aérosol comparée à la longueur d'onde. Elle est très sélective en fréquence pour les particules dont le rayon est inférieur ou égal à la longueur d'onde. Elle atteint son maximum (3,8) pour un rayon de particule égal à la longueur d'onde, auquel cas la diffusion est maximale. A mesure que la taille de la particule augmente, la section efficace de diffusion tend asymptotiquement vers une valeur environ égale à 2.

Il est difficile de prévoir l'affaiblissement dû aux aérosols, étant donné que leur concentration, leur composition et leur distribution en taille varient dans le temps et dans l'espace. Bien que la concentration soit étroitement liée à la visibilité optique, il n'existe pas de distribution unique en taille des particules pour une visibilité donnée.

La visibilité caractérise la transparence atmosphérique estimée par un observateur humain. Elle est mesurée par la portée visuelle de piste (PVP), et correspond à la distance qu'un rayon lumineux doit parcourir dans l'atmosphère pour que son intensité (ou flux lumineux) chute à 0,05 fois sa valeur initiale. On peut la mesurer avec un transmissiomètre ou un diffusiomètre.

La Fig. 2 est un exemple de variations de la portée visuelle de piste, observées à La Turbie, France, un jour de grande visibilité.

FIGURE 2
Variations de la portée visuelle de piste, observées à La Turbie (France)
un jour de grande visibilité



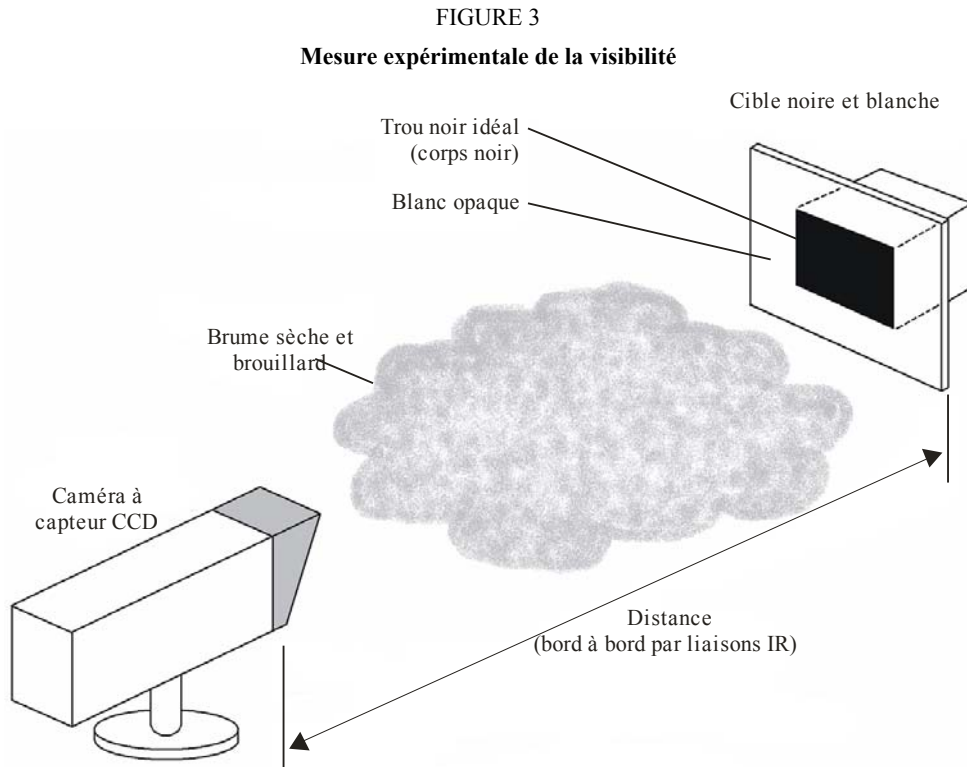
Une autre solution consiste mesurer la visibilité sur le trajet de transmission en utilisant une caméra à capteur CCD et une cible de référence noir et blanc. Par cette méthode, la portée visuelle, V_r , est donnée par la formule suivante:

$$V_r = \frac{\ln(0,02)}{\ln(C / C_0)} d \quad (7)$$

C est le contraste mesuré entre la région blanche et la région noire de la cible, C_0 est le contraste intrinsèque de la cible (mesuré à proximité de la cible), et d est la distance à la cible. C est donné par la formule:

$$C = \frac{L_w - L_b}{L_w + L_b} = 0,02 = e^{-b_{EX} \cdot V_r} \quad (8)$$

où L_w et L_b sont les luminances des zones noire et blanche de la cible, b_{EX} , le coefficient d'extinction et V_r , la portée visuelle. La Fig. 3 montre la cible idéale, dont la zone noire correspond à la surface d'une cavité située dans un panneau peint en blanc, la surface interne de la cavité étant peinte en noir de façon à éviter toute diffusion directe de la lumière.



P.1817-03

Toutes les caractéristiques optiques des aérosols, et en particulier, du brouillard, sont liées à la distribution en taille de particules, que l'on peut considérer comme le paramètre clé pour déterminer les propriétés physiques et optiques du brouillard.

En général, cette distribution est représentée par des fonctions analytiques comme la distribution log-normale dans le cas des aérosols et la distribution gamma modifiée dans le cas du brouillard. La distribution gamma modifiée est très souvent utilisée pour modéliser les différents types de brouillards et de nuages. Elle est donnée par la formule:

$$N(r) = ar^\alpha \exp(-br) \quad (9)$$

où $N(r)$ est le nombre de particules par unité de volume et par unité d'incrément du rayon r , et α , a et b sont des paramètres qui caractérisent la distribution en taille de particules.

Des logiciels de calcul (voir l'Appendice 1 à l'Annexe 1) prennent en compte deux cas particuliers: le brouillard d'advection dense et le brouillard de rayonnement modéré, qui sont modélisés par les distributions en taille gamma modifiées comme indiqué ci-dessus. Les paramètres type de la distribution gamma modifiée sont donnés dans le Tableau 1.

TABLEAU 1

Différents paramètres de la distribution en taille de particules pour un brouillard d'advection dense et pour un brouillard de rayonnement modéré

	α	a	b	N (cm ⁻³)	W (g/m ³)	r_m (μm)	V (m)
Brouillard d'advection dense	3	0,027	0,3	20	0,37	10	130
Brouillard de rayonnement modéré	6	607,5	3	200	0,02	2	450

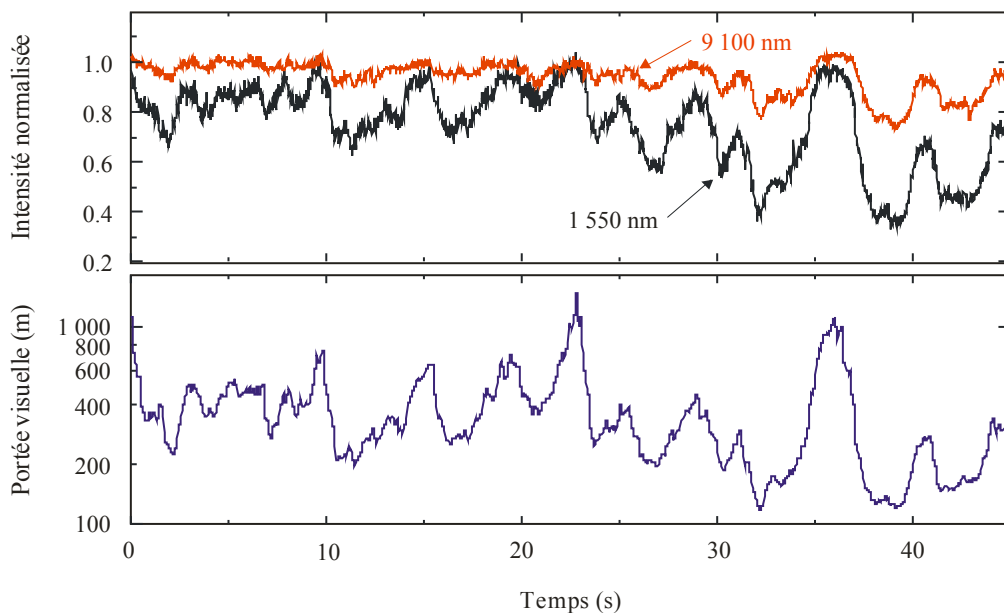
où:

- N : nombre total de particules d'eau par unité de volume (cm³);
- r_m : rayon modal (μm) pour lequel la distribution présente un maximum;
- W : teneur en eau liquide (g/m³);
- V : visibilité associée au type de brouillard (m).

Le niveau du signal reçu peut subir d'importantes fluctuations à court terme à cause des variations de visibilité. La Fig. 4 montre les intensités reçues normalisées des liaisons en IR lointain et en IR moyen, ainsi que la visibilité de la liaison sur une durée d'une minute.

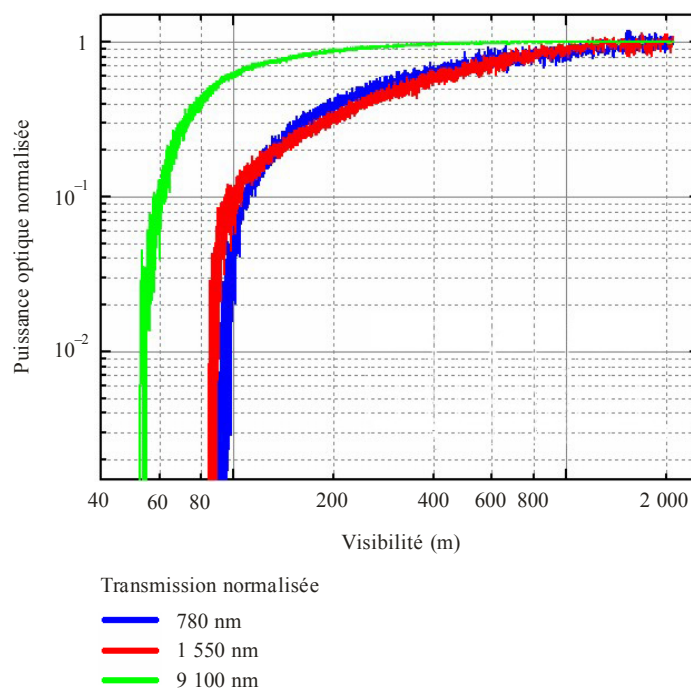
FIGURE 4

Intensités reçues en temps réel sur des liaisons en IR lointain et en IR moyen (a) et portée visuelle (b) enregistrées simultanément sur une durée d'une minute



La Fig. 5 montre la puissance optique normalisée en fonction de la portée visuelle, mesurée à 780 nm, 1 550 nm et 9 100 nm.

FIGURE 5
Puissance optique reçue normalisée en fonction de la visibilité de la liaison pour trois longueurs d'onde différentes



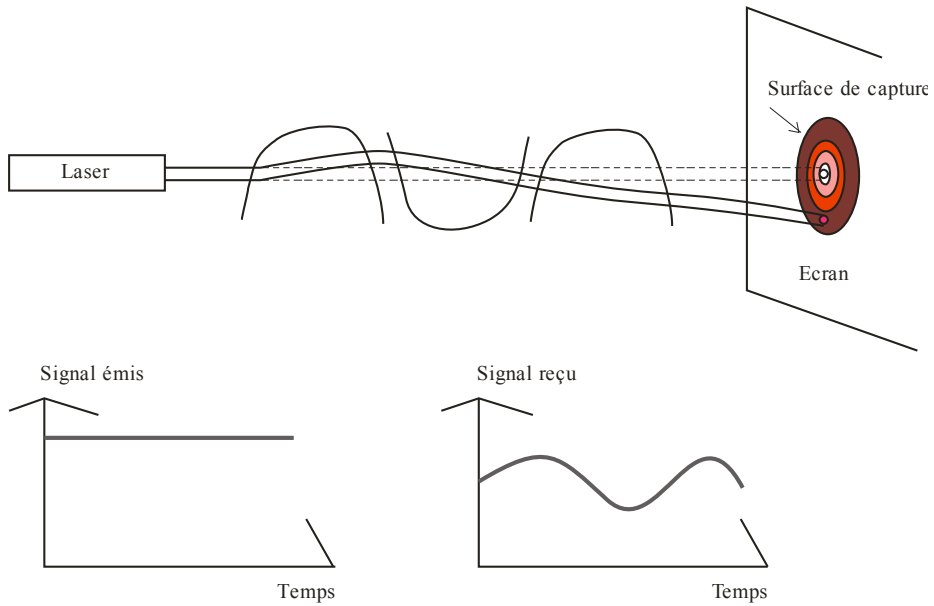
P.1817-05

Dans des conditions de brouillard épais, la distribution de particules est très souvent non uniforme. Or, dans ce cas, les liaisons en IR lointain pourraient assurer une disponibilité supérieure. En effet, une lumière de 10 μm peut compenser les pertes dans le brouillard dense et maintenir la disponibilité de la liaison alors qu'une lumière de longueur d'onde plus courte ne le peut pas.

6 Scintillation

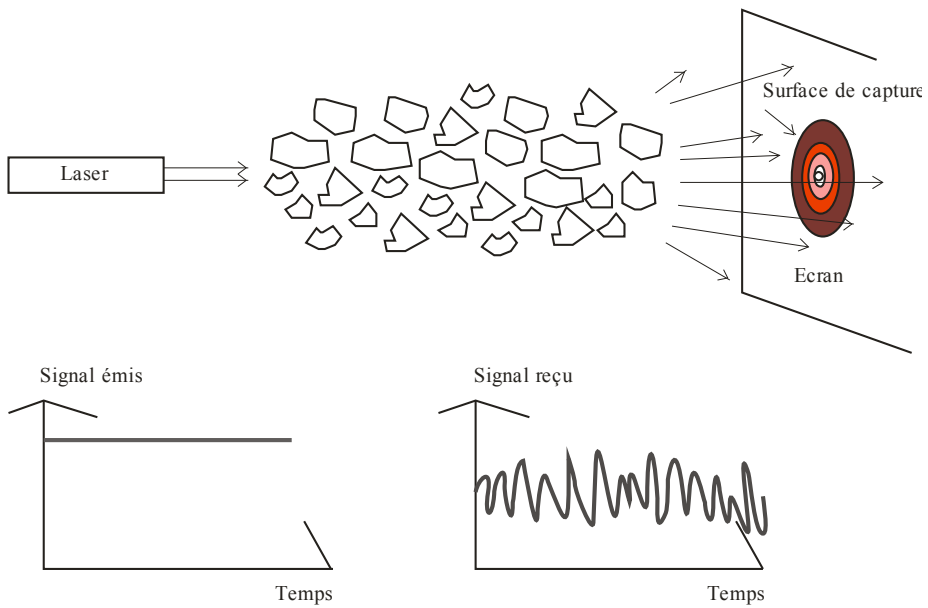
Des cellules d'indice de réfraction variables, aléatoirement réparties, peuvent se former dans le milieu de propagation sous l'effet de turbulences thermiques. Ces cellules provoquent une diffusion, des trajets multiples et une variation de l'angle d'arrivée, qui entraînent des fluctuations du niveau du signal reçu pour des fréquences de 0,01 à 200 Hz. De même, des variations de la surface d'onde provoquent des variations temporelles de la focalisation/défocalisation du faisceau. De telles fluctuations de signal sont appelées scintillation. L'amplitude et la fréquence de scintillation dépendent de la taille des cellules comparée au diamètre du faisceau. Les figures suivantes montrent cet effet, ainsi que les variations (amplitude, fréquence) du signal reçu. Le faisceau dévie (voir la Fig. 6) lorsque les hétérogénéités sont grandes par rapport à son diamètre, et le faisceau s'élargit (voir la Fig. 7) lorsque les hétérogénéités sont petites par rapport à son diamètre. Un mélange des hétérogénéités entraîne une scintillation (voir la Fig. 8).

FIGURE 6
 Déviation du faisceau sous l'effet de cellules de turbulence plus grandes que le diamètre du faisceau



P.1817-06

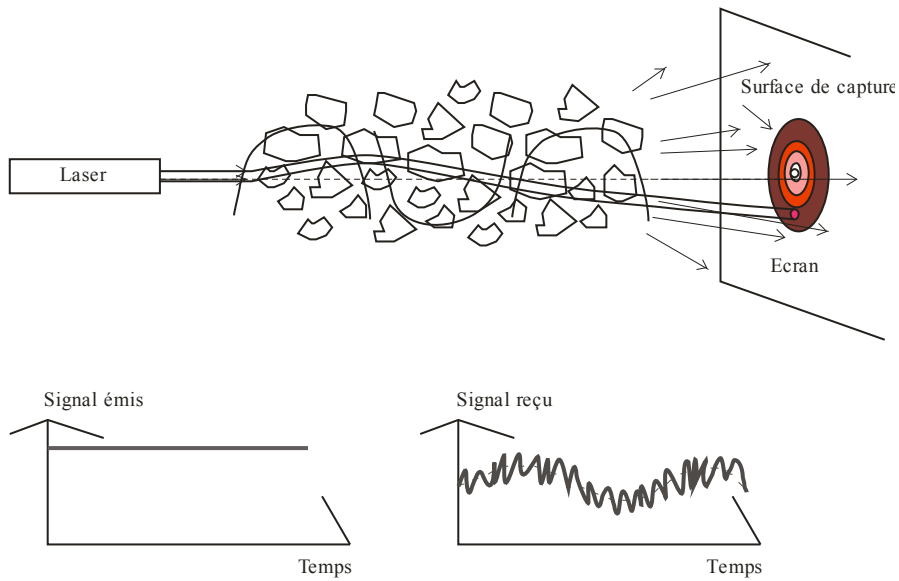
FIGURE 7
 Déviation du faisceau sous l'effet de cellules de turbulence plus petites que le diamètre du faisceau (élargissement du faisceau)



P.1817-07

FIGURE 8

Effets d'hétérogénéités de tailles différentes sur la propagation du faisceau laser (scintillation)



P.1817-08

7 Affaiblissement par la pluie

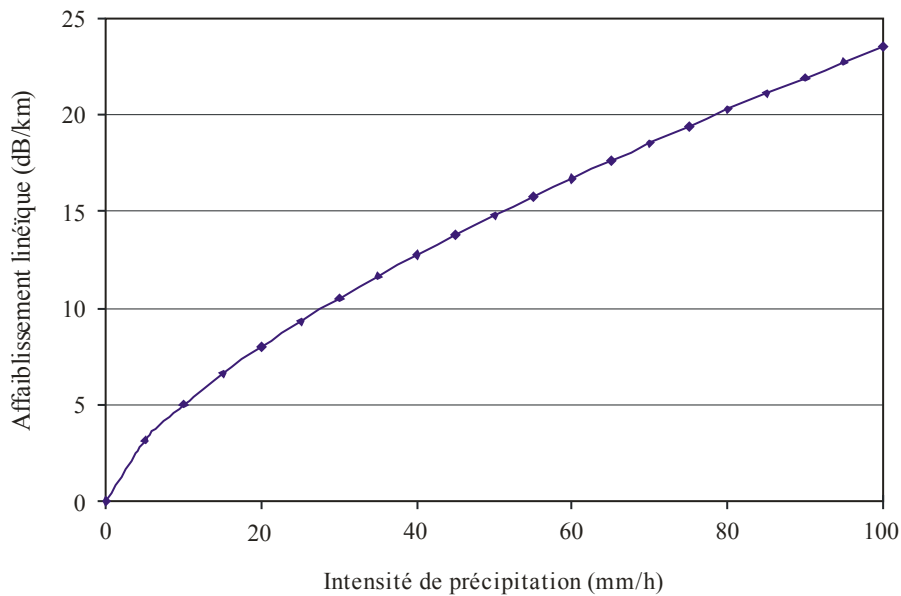
Une valeur approchée de l'affaiblissement linéique (dB/km) dû à la pluie est en général donnée par la formule:

$$\gamma_{rain} = k \cdot R^\alpha \tag{10}$$

La Fig. 9 illustre les variations habituelles de l'affaiblissement linéique (dB/km) dû aux précipitations, observées dans les gammes de longueurs d'onde optique et infrarouge.

FIGURE 9

Affaiblissement linéique (dB/km) dû aux précipitations dans les gammes de longueurs d'onde optique et infrarouge



P.1817-09

La Recommandation UIT-R P.837 fournit l'intensité de pluie, R_p (mm/h), dépassée pendant un pourcentage de temps donné de l'année en moyenne, p , et pour toute localisation.

8 Affaiblissement dû à la neige

L'affaiblissement linéique (dB/km) dû à la neige en fonction du taux de chute de neige est donné par la formule suivante:

$$\gamma_{snow} = a \cdot S^b \quad (11)$$

où:

γ_{snow} : affaiblissement linéique (dB/km) dû à la neige;

S : taux de chute de neige (mm/h);

a et b : paramètres fonctions de la longueur d'onde, λ (nm), tel qu'indiqué au Tableau 2:

TABLEAU 2

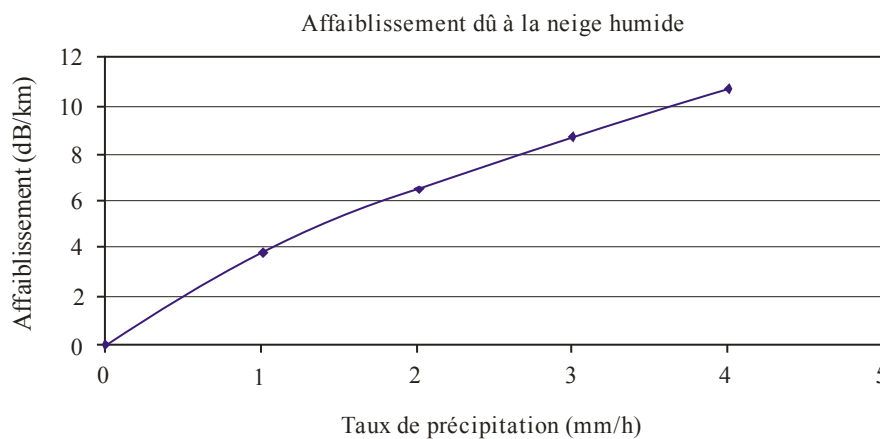
Paramètres « a » et « b » pour la neige humide et la neige sèche

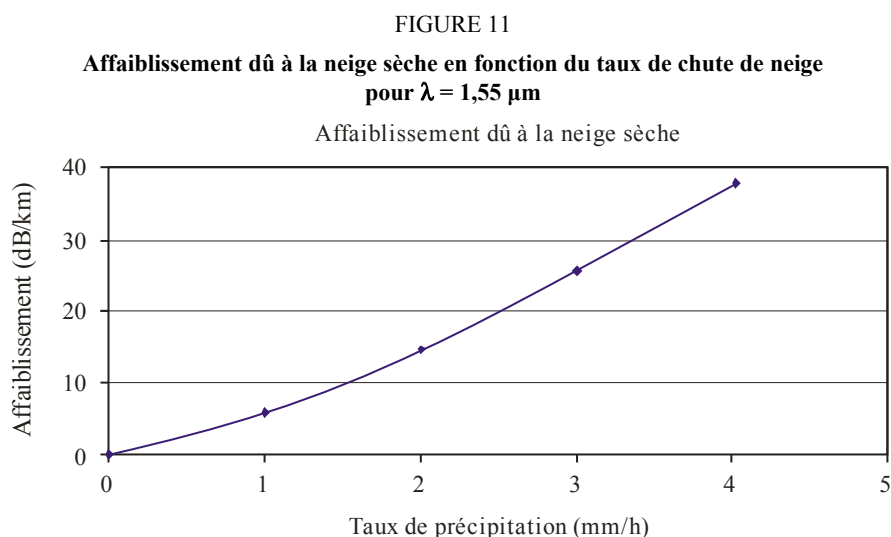
	a	b
Neige humide	$0,0001023 \lambda_{nm} + 3,7855466$	0,72
Neige sèche	$0,0000542 \lambda_{nm} + 5,4958776$	1,38

L'affaiblissement estimé en fonction du taux de chute de neige pour $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$ est donné aux Fig. 10 et 11.

FIGURE 10

Affaiblissement dû à la neige humide en fonction du taux de chute de neige pour $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$





P.1817-11

9 Affaiblissement dû à la lumière ambiante

On dit qu'une conjonction solaire a lieu lorsque le soleil ou une image réfléchiée du soleil se situe dans le champ de vision instantané (IFOV, *instantaneous field of view*) d'un récepteur optique ou à proximité de ce champ. L'IFOV reçu est en général au moins aussi grand que la divergence en transmission. L'objectif est de calculer la probabilité pour laquelle la position du soleil est parallèle à la liaison optique, et la puissance solaire pénétrant dans le récepteur est supérieure à la puissance reçue de l'émetteur. On trouve une méthode d'estimation de cet effet dans la Recommandation UIT-R P.1814.

10 Distribution cumulative de l'affaiblissement

La Fig. 12 montre les distributions cumulatives de l'affaiblissement mesurées à 860 nm sur un trajet de 853 m à Prague (République tchèque), sur une période de 6 ans. Les causes de l'affaiblissement sont tous les hydrométéores, le brouillard, la pluie, la pluie plus la neige, et la neige. Tous les événements d'évanouissement ont été classés en fonction des conditions météorologiques qui les ont provoqués. Les conditions météorologiques ont été identifiées en utilisant une image caméra de la zone située entre l'émetteur et le récepteur, et les données d'une station météorologique automatique proche du récepteur. Les événements d'évanouissement les plus importants ont été causés par le brouillard et par la neige.

11 Systèmes hybrides/FSO

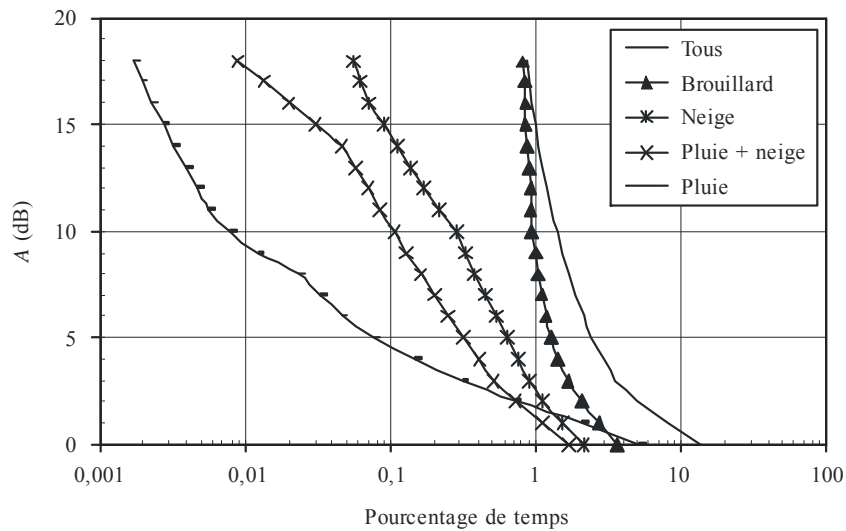
La Fig. 13 permet de comparer les affaiblissements mesurés pour un signal radiofréquence à 58 GHz et pour une liaison optique. Les mesures sont réalisées pour des affaiblissements dus à tous types d'hydrométéores d'une part, et à la pluie uniquement d'autre part. En cas de pluie, la liaison optique subit moins d'affaiblissement que la liaison par ondes millimétriques. Les systèmes hybrides radio/optique (RF/FSO) permettent d'améliorer la qualité de la liaison FSO en exploitant le fait que le trajet RF est affaibli par la pluie mais pas par le brouillard. Inversement, un trajet optique est très affaibli par le brouillard et relativement peu par la pluie.

Les distributions cumulatives annuelles reproduites à la Fig. 13 donnent une estimation de la qualité d'un système hybride RF/FSO fictif. Considérant un système hybride dont le trajet RF et le trajet optique possèdent la même marge de protection, $MP = 18 \text{ dB}$, une technique de réception en diversité simple est utilisée, de sorte que soit la partie RF, soit la partie FSO du système, soit active

en fonction des valeurs instantanées de l'affaiblissement sur le trajet RF et sur le trajet optique. On considère par hypothèse que la partie RF du système permet de limiter l'effet des hydrométéores sauf la pluie, et que la partie FSO permet de limiter l'effet de la pluie. Le taux de disponibilité (AR) du système hybride est évalué à partir des statistiques FSO en cas de pluie, comme indiqué au Tableau 3.

FIGURE 12

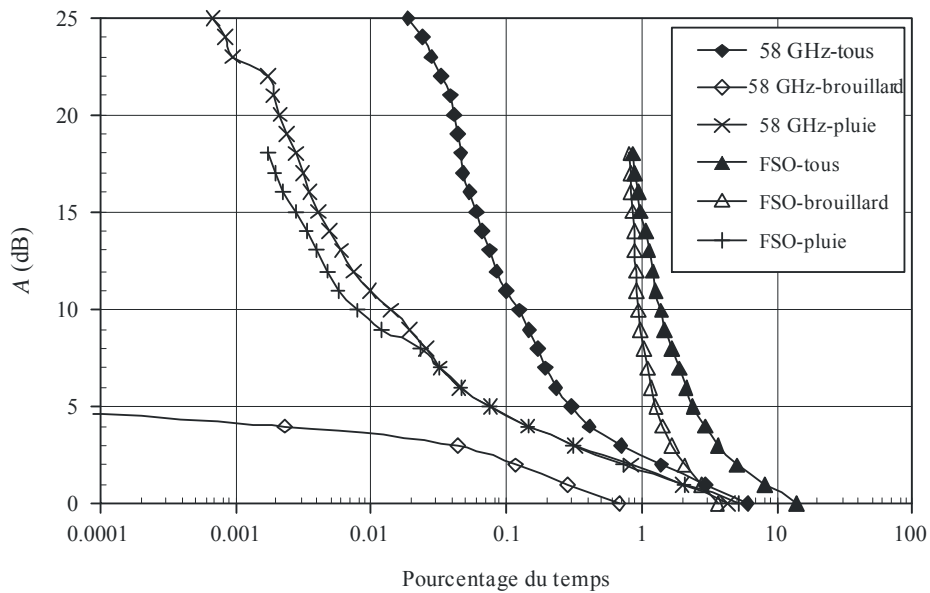
Distributions cumulatives d'affaiblissement pour différentes conditions de trajet



P.1817-12

FIGURE 13

Affaiblissements RF et FSO dépassés pendant différents pourcentages du temps



P.1817-13

TABLEAU 3
Comparaison des taux de disponibilité de systèmes RF, FSO et hybride RF/FSO fictif

Système	AR (%)
Partie FSO (850 nm)	99,1340
Partie RF (58 GHz)	99,9547
RF/FSO hybride	99,9989

12 Mesure de la visibilité

La visibilité V (km) se définit comme la distance à un objet pour laquelle le contraste de l'image chute à 2% de sa valeur initiale. Elle est mesurée à 550 nm, longueur d'onde qui correspond à l'intensité maximale du spectre solaire, et est donnée par la formule de Koschmieder:

$$V(\text{km}) = \frac{3,912}{\gamma_{550 \text{ nm}}} \quad (12)$$

où $\gamma_{550 \text{ nm}}$ est le coefficient d'extinction du milieu (atmosphère et aérosols).

Deux types de capteurs sont utilisés pour mesurer la visibilité: transmissiomètres et diffusiomètres.

Le code international de visibilité, qui montre l'affaiblissement (dB/km) pour diverses conditions météorologiques, est fourni dans le tableau suivant:

- Conditions météorologiques de temps très clair à brouillard dense.
- Précipitations (mm/h): bruine, pluie, orage.
- Visibilité de 50 m à 50 km.

Code de visibilité international				
Conditions météorologiques	Précipitation		Visibilité (m)	Affaiblissement (dB/km)
		mm/h		
Brouillard dense			0	
			50	315
			200	75
			500	28,9
Brouillard épais				
Brouillard modéré				
Brouillard léger				
Brouillard très léger	Orage	100	770	18,3
			1 000	13,8
	Pluie forte	25	1 900	6,9
Brume légère			2 000	6,6
	Pluie modérée	12,5	2 800	4,6
			4 000	3,1
Brume très légère	Pluie légère	2,5	5 900	2
			10 000	1,1
Temps clair	Bruine	0,25	18 100	0,6
			20 000	0,54
			23 000	0,47
Temps très clair			50 000	0,19

Appendice 1 à Annexe 1

Modélisation par ordinateur

Un certain nombre de programmes informatiques de modélisation ont été développés, à partir des descriptions théoriques des phénomènes physiques, pour déterminer le coefficient de transmission atmosphérique. On trouve les modèles suivants: les programmes LOWTRAN et NAM (*navy aerosol model*, c'est-à-dire modèle d'aérosols marins); NOVAM et WKDAER dans les contextes maritimes, etc. NOVAM est inclus dans MODTRAN, FASCOD, etc.

LOWTRAN contient des modèles d'affaiblissement du signal optique par les aérosols. Il repose sur un modèle raie par raie et est distribué par ONTAR (Etats-Unis d'Amérique).

Le logiciel NAM est plus particulièrement adapté aux contextes maritimes. Il repose sur le modèle de distribution des aérosols de GATHMAN.

NOVAM prend en compte les particules de poussière venant du continent.

WKDAER peut être paramétré pour un contexte spécifique.

FASCOD utilise un modèle raie par raie et prend en compte tous les paramètres de caractérisation des raies d'absorption (intensité, probabilité de transition, etc.). Il repose sur la base de données d'absorption moléculaire haute résolution HITRAN. Les paramètres de raie principaux incluent dans HITRAN sont: la fréquence de résonance, l'intensité des raies à 296 K, la probabilité d'une transition, la demi-largeur de raie à 296 K, et l'état moléculaire basse énergie ou fondamental.

Trois modèles liés ont été développés par le Laboratoire de géophysique de l'Air Force (AFGDL, *Air Force Geophysics Laboratory*) utilisant diverses résolutions spectrales:

- LOWTRAN 7 – Transmission à basse résolution – La résolution spectrale est de 20 cm^{-1} (équivalent à 600 GHz) par pas de 5 cm^{-1} .
- MODTRAN 3 – Transmission à moyenne résolution – La résolution spectrale est de 2 cm^{-1} (équivalent à 60 GHz) par pas de 1 cm^{-1} .
- HITRAN 2004 – Transmission à haute résolution – La résolution spectrale est de $0,001 \text{ cm}^{-1}$ (équivalent à 30 MHz).

Les modèles contiennent tous des informations spectrales sur de nombreuses substances atmosphériques dont H_2O , O_3 , N_2O , CO , CH_4 , O_2 , NO , NO_2 , SO_2 et HNO_3 . (HITRAN inclut des informations détaillées concernant plus de 1 000 000 raies d'absorption pour 37 molécules.) En outre, les trois modèles incluent le continuum H_2O sur le spectre complet, le continuum N_2 dans la région de $2\,000$ à $2\,700 \text{ cm}^{-1}$, la diffusion moléculaire, ainsi que l'absorption et la diffusion par les aérosols, par le brouillard, par la pluie et par les nuages.
