

RAPPORT UIT-R F.2106

Applications du service fixe utilisant des liaisons optiques en espace libre

(Question UIT-R 237/9)

(2007)

Domaine d'application

Le présent Rapport fournit une réponse à la Question UIT-R 237/9 concernant les liaisons optiques en espace libre pour les applications du service fixe.

Les paragraphes qui suivent présentent les caractéristiques des équipements, les applications possibles du service fixe ainsi que les aspects techniques et opérationnels de la transmission optique en espace libre (voir les Notes 1 et 2).

NOTE 1 – La transmission en espace libre examinée dans le présent Rapport concerne les systèmes destinés à être utilisés en extérieur.

NOTE 2 – La liaison optique en espace libre entre une station centrale et des terminaux mobiles/nomades constituant un réseau local sans fil n'entre pas dans le cadre du présent Rapport; toutefois, la liaison fixe entre stations centrales est couverte par le présent Rapport.

Abréviations

- AAC: réglage automatique de l'affaiblissement (*automatic attenuation control*)
APD: photodiode à avalanche (*avalanche photo diode*)
FSO: optique en espace libre, optique sans fil (*free-space optics*)
FSOL: liaison optique en espace libre (*free-space optical link*)
LD: diode laser (*laser diode*).

Références**Recommandations UIT-R**

- Recommandation UIT-R F.1668 – Objectifs de qualité en matière d'erreur applicables aux liaisons hertziennes fixes numériques réelles utilisées dans des conduits et des connexions fictifs de référence de 27 500 km.
- Recommandation UIT-R F.1703 – Objectifs de disponibilité applicables à des liaisons hertziennes fixes numériques réelles utilisées dans des conduits et des connexions fictifs de référence de 27 500 km.
- Recommandation UIT-R P.1814 – Méthodes de prévision nécessaires pour la conception de liaisons optiques de Terre en espace libre.
- Recommandation UIT-R P.1817 – Données de propagation nécessaires pour la conception de liaisons optiques de Terre en espace libre.

Recommandations UIT-T

- Recommandation UIT-T G.640 – Interfaces pour systèmes de transmission optique en espace libre colocalisés compatibles longitudinalement.
- Recommandation UIT-T G.692 – Interfaces optiques pour systèmes multicanaux avec amplificateurs optiques.

1 Introduction

Les liaisons optiques en espace libre sont récemment devenues des moyens de transmission intéressants pour les applications du service fixe à courte distance. Elles présentent les avantages suivants:

- transmission large bande;
- compacité des équipements d'émission/réception;
- coordination quasiment inutile pour éviter le brouillage entre liaisons optiques en espace libre.

Pour pouvoir élargir les applications actuelles et futures des liaisons optiques en espace libre, il faut examiner les aspects techniques et opérationnels de ces liaisons par le biais d'analyses théoriques et d'approches expérimentales telles que décrites dans le présent Rapport.

2 Description de la configuration du système et des paramètres de base

2.1 Explication des paramètres

2.1.1 Côté émetteur

2.1.1.1 Surface d'émission, E_a

La surface d'émission E_a est la surface de la fenêtre d'émission, exprimée en mètres carrés (m^2).

La surface d'émission est l'un des paramètres utilisés pour déterminer la catégorie de sécurité laser.

2.1.1.2 Puissance d'émission, E_p

La puissance d'émission E_p est la puissance émise par la surface d'émission E_a , exprimée en dBm ou en mW. C'est l'un des autres paramètres utilisés pour déterminer la catégorie de sécurité laser et pour calculer la marge de liaison. La puissance doit être mesurée à l'extérieur du système de transmission optique en espace libre et aussi près que possible des fenêtres d'émission de ce système. Si c'est possible, il convient, pour les mesures, d'émettre des «0» et des «1» avec la même probabilité d'occurrence. La puissance est la valeur moyenne entre la valeur haute (bit «1») et la valeur basse (bit «0»).

A des fins de sécurité, il est nécessaire de déterminer la précision de la mesure de la puissance, par exemple $E_p = 10 \text{ dBm} \pm 1 \text{ dB}$.

A des fins de sécurité également, si le terminal est doté d'un ajustement automatique de la divergence, la puissance E_p est définie pour la valeur minimale de la divergence et, pour un terminal doté d'une commande automatique de la puissance d'émission (CAPE), la valeur maximale de la puissance E_p est la valeur maximale de la puissance d'émission.

Pour les terminaux dotés d'un système multifaisceaux, il convient d'indiquer la puissance E_p pour chaque surface E_a et la puissance totale (somme des faisceaux – mW). La puissance totale est la somme de toutes les puissances E_p pour un terminal d'émission donné lorsque tous les faisceaux convergent et ce paramètre est utilisé à des fins de sécurité. Il convient d'indiquer aussi la distance entre deux surfaces E_a et la divergence de faisceau.

Pour les terminaux dotés d'un diffuseur optique holographique pour obtenir une source superétendue, ce qui permet d'obtenir un rendement de transmission élevé avec une surface de diffusion contrôlée et d'augmenter le rendement de transmission avec une configuration de catégorie 1 (conformément à la norme CEI 60825-1 [3]), il convient d'indiquer la puissance E_p pour la surface E_a .

2.1.1.3 Divergence de faisceau, B_d ou θ

La divergence de faisceau B_d est la valeur maximale de l'angle compris entre l'axe central du faisceau correspondant à la densité de puissance maximale et la direction correspondant à une densité de puissance inférieure de -3 dB.

Cette valeur est importante pour déterminer la catégorie de sécurité laser et pour calculer la marge de liaison. Elle peut être exprimée comme un demi-angle ou comme un angle total, mais il convient de le préciser; l'unité utilisée est généralement le milliradian (mrad). En cas d'ajustement de la divergence, il convient d'indiquer la valeur minimale et la valeur maximale.

2.1.1.4 Longueur d'onde, W_a ou λ

La longueur d'onde W_a ou λ est donnée par la longueur d'onde centrale et par sa largeur totale à mi-hauteur (FWHM, *full width at half maximum*). La valeur de la longueur d'onde centrale est également importante pour calculer la catégorie de sécurité laser. L'unité est le nanomètre (par exemple $\lambda = 849 \pm 2$ nm).

En cas de transmission utilisant le multiplexage par répartition en longueur d'onde (WDM, *wavelength division multiplexing*), il est peut-être plus simple d'indiquer l'intervalle spectral.

2.1.1.5 Catégorie de sécurité laser

Pour les terminaux des systèmes de transmission optique en espace libre, la catégorie de sécurité est conforme à la norme CEI 60825 et doit être contrôlée par un laboratoire certifié. Il convient d'utiliser de préférence la catégorie de sécurité 1 ou 1M.

2.1.2 Côté récepteur

2.1.2.1 Surface de réception, R_a

La surface de réception R_a est la surface complète de la fenêtre de réception, exprimée en mètres carrés (m^2).

2.1.2.2 Sensibilité, S_e

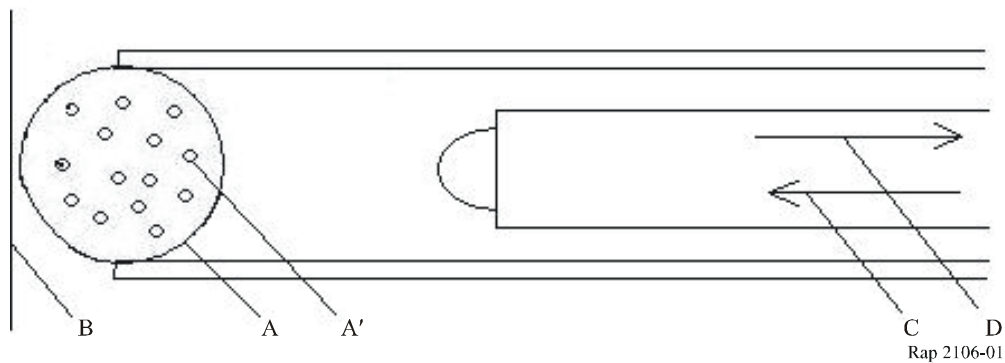
La sensibilité S_e est le niveau optique minimal pour une qualité de transmission des données considérée (par exemple, le taux BER doit être meilleur que 10^{-6} ; à savoir $BER \leq 10^{-6}$).

L'unité est le dBm et la mesure doit être réalisée à proximité de la fenêtre de réception optique en espace libre.

Si le terminal a plusieurs fenêtres de réception, il convient d'indiquer la sensibilité S_e pour chaque surface R_a et la sensibilité totale.

Si le terminal a un système de réception formé par une microsphère A dopée par l'élément dopant A', suivant la longueur d'onde de résonance du faisceau incident B, placée en interface avec un émetteur laser C de longueur d'onde définie et de puissance ajustable offrant une contribution énergétique sur la liaison à la fréquence de résonance des éléments dopants contenus dans la microsphère, la sensibilité S_e du terminal D sera la sensibilité d'un tel système pour la même qualité de transmission des données considérée (Fig. 1).

FIGURE 1
Terminal avec microsphère



2.1.2.3 Sensibilité à saturation, S_s

La sensibilité à saturation S_s est le niveau optique maximal pour une qualité de transmission des données considérée (par exemple, le taux BER doit être meilleur que 10^{-6} ; à savoir $BER \leq 10^{-6}$), avec et sans réglage automatique de l'affaiblissement (AAC).

L'unité est le dBm et la mesure doit être réalisée à proximité de la fenêtre de réception optique en espace libre.

Si le terminal a plusieurs fenêtres de réception, il convient d'indiquer la sensibilité S_e pour chaque surface R_a et la sensibilité totale.

La différence entre la sensibilité à saturation (avec AAC le cas échéant) et la sensibilité donne la gamme dynamique.

2.1.2.4 Champ de vision, F_v

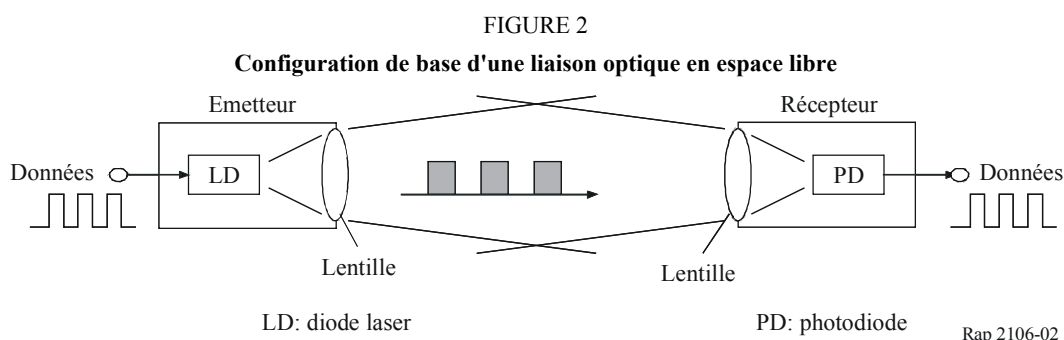
Le champ de vision F_v est l'angle entre l'axe central et la direction à -3 dB. La valeur peut être exprimée comme un demi-angle ou comme un angle total, mais il faut le préciser; l'unité utilisée peut être le milliradian (mrad).

2.1.2.5 Perte dans le système, S_l

Cet élément est utilisé à titre indicatif. Il n'est pas utilisé pour déterminer la catégorie de sécurité laser et pour calculer la marge de liaison, en raison des points de mesure d'émission et de réception. L'unité est le dB.

2.2 Configuration du système

La configuration de base d'une liaison optique en espace libre pour les applications du service fixe est illustrée sur la Fig. 2.



Dans un grand nombre de liaisons optiques en espace libre, les fonctions de conversion électrique/optique (E/O) et optique/électrique (O/E) sont mises en œuvre respectivement dans la diode laser de l'émetteur et dans la photodiode du récepteur. Récemment, certains systèmes ont adopté la technique WDM, qui consiste à utiliser plusieurs porteuses optiques pour augmenter la capacité de la liaison [1] [2]. Toutefois, les systèmes WDM ont besoin d'être améliorés, en particulier en ce qui concerne la technologie des filtres de branchement côté réception en vue d'une utilisation économique.

Les équipements utilisent la modulation d'un faisceau laser pour échanger des données binaires dans les deux sens par le biais d'un émetteur/récepteur (diode laser/APD ou diode PIN) à chaque extrémité. Ils sont utilisés pour des liaisons bilatérales point à point et en visibilité directe.

Chaque équipement comporte plusieurs modules:

- pour l'émission:
 - a) l'interface d'affluent: électrique ou optique pour envoyer et recevoir des données numériques;
 - b) le module de conversion E/O (en cas d'interface optique);
 - c) le filtrage et l'amplification du signal numérique électrique;
 - d) le module d'émission optique contenant le laser.
- pour la réception:
 - a) le module de réception optique contenant la diode;
 - b) le filtrage et l'amplification du signal numérique électrique;
 - c) le module de conversion O/E (en cas d'interface optique);
 - d) l'interface d'affluent: électrique ou optique pour envoyer et recevoir les données numériques.

L'équipement est parfois doté d'un logiciel de gestion pour configurer la liaison et obtenir des informations qualitatives et quantitatives auprès des différents modules.

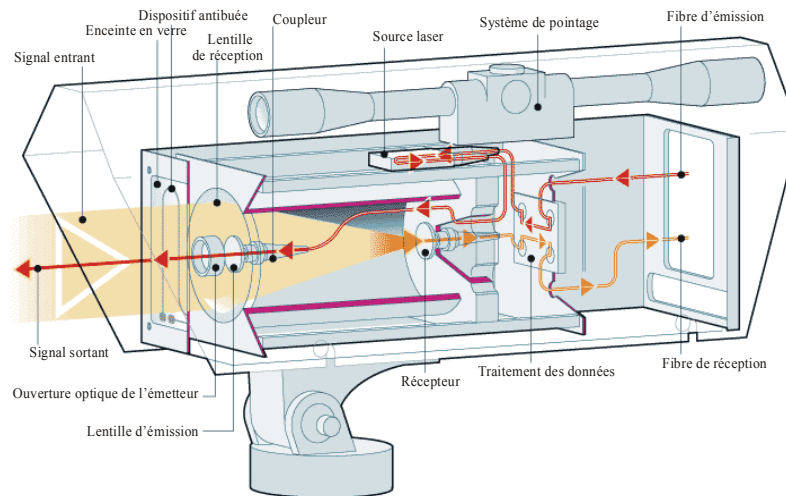
Suivant les fabricants, d'autres fonctionnalités sont mises en œuvre, par exemple:

- un système de poursuite, CAPE, AAC;
- une liaison d'assistance radio, avec un débit limité, en cas d'interruption de la liaison laser.

Un exemple de structure d'équipement de transmission optique en espace libre est présenté sur la Fig. 3.

FIGURE 3

**Exemple de terminal de transmission optique en espace libre
(accès optique, San Diego, Etats-Unis d'Amérique)**



Rap 2106-03

2.3 Principaux paramètres du système

Les principaux paramètres à prendre en considération pour la définition des liaisons optiques sont les suivants:

Portée: celle-ci varie suivant les équipements de quelques dizaines de mètres à plusieurs kilomètres. Certains fabricants donnent une portée maximale, d'autres indiquent la portée type pour diverses conditions météorologiques et d'autres encore proposent une portée «recommandée», intégrant une marge par rapport à la valeur maximale. Ces valeurs ne sont pas des valeurs absolues, elles donnent simplement des ordres de grandeur.

Sécurité: un facteur important à prendre en compte est la catégorie laser de l'équipement, car les méthodes associées d'installation et de maintenance d'une liaison optique en espace libre sont plus ou moins simples. Les paramètres à prendre en compte pour définir la catégorie laser sont la longueur d'onde du signal, les puissances rencontrées et la forme du faisceau. Il est conseillé de choisir un terminal de catégorie 1 ou 1M selon la norme CEI 60825-1.

Débit de données et type d'application recommandée: un grand nombre de systèmes acceptent différents débits de données et protocoles; pour un intervalle de débits de données, il s'agit souvent d'un aspect relativement important. Les applications dépendent alors de la capacité maximale d'émission du système et ce sont invariablement des applications de télécommunication ou de traitement de données. Un système acceptant jusqu'à 200 Mbit/s peut par exemple émettre des signaux STM-1, ATM, FDDI ou Fast Ethernet. D'autres terminaux sont spécifiés pour un débit de données, une interface et donc une utilisation précise, par exemple des signaux E1 (2,048 Mbit/s) ou des données Ethernet (10 Mbit/s).

Fréquences/longueurs d'onde utilisées pour les liaisons optiques en espace libre: deux principaux intervalles de fréquences/longueurs d'onde sont largement utilisés pour les applications des liaisons optiques en espace libre: 230-200 THz/1 300-1 500 nm et 375-385 THz/780-800 nm. Par rapport aux autres intervalles, ils présentent l'avantage suivant: l'absorption atmosphérique en espace libre y est relativement basse. En outre, compte tenu des excellentes caractéristiques de transmission des systèmes à fibres optiques dans ces intervalles de longueur d'onde, les dispositifs optiques à semi-conducteur sont peu onéreux. Une technique précise de commande de longueur d'onde a été

définie en particulier au voisinage de l'intervalle à 1 500 nm, dans lequel la technique WDM est actuellement envisagée. Par ailleurs, la Commission d'études 15 de l'UIT-T a mené des études sur les intervalles de longueurs d'onde pour la transmission par fibre optique. Du point de vue de la transmittance atmosphérique, l'intervalle de longueurs d'onde 2 000-2 200 nm convient aussi, étant donné que les effets de la diffusion par les aérosols et de l'absorption par les molécules deviennent minimales dans cet intervalle, en particulier au voisinage de 2 200 nm [10] [11]. Cet intervalle présente un autre avantage: la courbure du faisceau optique due à la variation de la température atmosphérique y est peu marquée (voir § 7.1). En revanche, il n'est pas encore possible de fabriquer des dispositifs optiques peu onéreux à la fois pour la production et pour la détection des signaux dans l'intervalle 2 000-2 200 nm. La Commission d'études 3 de l'UIT-R (Groupes de travail 3J et 3M) a étudié les caractéristiques de propagation optique en espace libre pour un large intervalle de fréquences optiques, à la fois sur des liaisons par satellite et sur des liaisons de Terre (voir § 3).

Puissance d'émission de la diode laser: la puissance d'émission de la diode laser (LD) utilisée pour les liaisons optiques en espace libre est actuellement de l'ordre de 10 mW. Par conséquent, le modèle de liaison considéré dans le paragraphe qui suit est fondé sur cette valeur. Toutefois, les progrès techniques permettront de concevoir des dispositifs optiques d'une capacité beaucoup plus grande, ce qui permettra d'élargir la palette des applications des liaisons optiques en espace libre dans un futur proche.

Pour choisir un système, il faut aussi tenir compte des paramètres secondaires suivants:

- la longueur d'onde de fonctionnement de la liaison optique: ce paramètre a une incidence sur la catégorie de sécurité du terminal;
- le type et le nombre d'émetteurs et de récepteurs optiques ont une incidence sur la marge de liaison;
- des procédures simples pour la mise en œuvre et la maintenance;
- des logiciels de supervision simples et conviviaux, permettant de gérer les terminaux (deux ou plus) (ou les liaisons) depuis un même site (télécommande);
- et le coût du système.

3 Caractéristiques de propagation en espace libre liées au modèle de liaison

Le présent paragraphe décrit les caractéristiques de propagation en espace libre pour les liaisons optiques en espace libre sur la base des résultats d'études consignés dans les Recommandations UIT-R de la série P. Pour plus de détails sur les données ayant servi à la rédaction du présent paragraphe, on pourra se reporter aux Recommandations pertinentes de la série P (Recommandations UIT-R P.1814 et UIT-R P.1817).

3.1 Propagation par temps clair

Lors de la propagation des ondes optiques, il se produit un affaiblissement atmosphérique en plus de ce que l'on appelle l'affaiblissement en espace libre y compris par temps clair. Cet affaiblissement atmosphérique L_{atm} est dû à la diffusion de Rayleigh et/ou à l'absorption par les molécules, dont l'effet dépend largement de la longueur d'onde.

Par ailleurs, la puissance de réception fluctue en raison des turbulences liées au gradient de température dans l'atmosphère, produisant une courbure du faisceau, une «danse» du faisceau ou une scintillation sur le trajet de propagation des ondes optiques.

L'affaiblissement L_{atm} a généralement une faible incidence dans les intervalles de longueurs d'onde mentionnés au § 2.3 (fréquences/longueurs d'onde pour les liaisons optiques en espace libre) pour les liaisons d'une longueur inférieure à environ 1 km. On peut facilement réduire les interruptions de liaison dues à ce phénomène en ajustant la divergence du faisceau optique côté émetteur de sorte que le diamètre du faisceau côté récepteur atteigne une certaine taille, par exemple plusieurs mètres.

Pour améliorer la disponibilité de la liaison par rapport aux effets de la propagation, une autre solution consiste à adopter un mécanisme de retransmission du signal et/ou un mécanisme de correction directe des erreurs dans la couche électrique.

3.2 Effet du brouillard

3.2.1 Estimation de l'affaiblissement dû au brouillard en fonction de la visibilité atmosphérique

L'affaiblissement dû au brouillard est causé par la diffusion de Mie [4], qui dépend du nombre de particules (densité du brouillard). Il est généralement difficile de mesurer directement la densité du brouillard ou d'en obtenir des données statistiques. L'effet de l'affaiblissement dû au brouillard Att_{fog} (dB/km) peut être relié à la visibilité atmosphérique V (km), définie comme étant la distance maximale à laquelle on peut reconnaître un objet noir par rapport au ciel [5] [6]. La visibilité est plus particulièrement définie à des fins météorologiques. Elle est caractérisée par la transparence de l'atmosphère estimée par un observateur humain. Conformément à la portée optique météorologique, elle est mesurée à l'aide d'un transmissomètre ou d'un diffusiomètre.

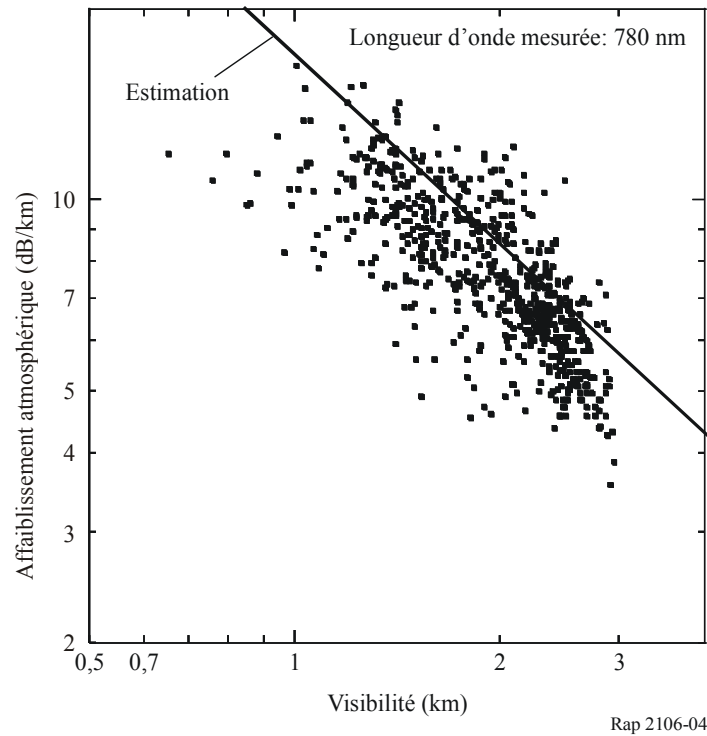
D'une manière générale, la mesure de la visibilité V est donnée par la distance à laquelle la puissance optique transmise n'est plus que de ϵ fois sa valeur initiale. Dans la littérature, on trouve les deux valeurs suivantes de ϵ : 0,02 et 0,05.

La relation entre Att_{fog} et V peut donc être exprimée par la formule suivante, qui peut être appliquée quel que soit le type de brouillard et quelle que soit la longueur d'onde optique pour une visibilité V inférieure à 3 km.

$$Att_{fog} = 10 \log_{10}(\epsilon)/V \quad (1)$$

On peut donc estimer l'affaiblissement des ondes optiques dû au brouillard à l'aide de statistiques de visibilité. La méthode de prévision ci-dessus basée sur la formule (1) est une méthode éprouvée, qui a été prise en considération pour la conception de liaisons [5] [7]. La Fig. 4 illustre la relation entre Att_{fog} et V pour les données mesurées [7].

FIGURE 4

Affaiblissement atmosphérique dû au brouillard**3.2.2 Analyse détaillée de l'affaiblissement dû aux aérosols (brouillard)**

Le présent paragraphe contient une analyse plus détaillée des cas où le type de brouillard est connu.

L'affaiblissement atmosphérique résulte d'un effet additif d'absorption et de dispersion de la lumière infrarouge par les aérosols et les molécules de gaz présents dans l'atmosphère. La transmittance en fonction de la distance est donnée par la loi de Beer Lambert:

$$\tau(\lambda, d) = \frac{P(\lambda, d)}{P(\lambda, 0)} = \exp[-\sigma(\lambda)d] \quad (2)$$

où:

- $\tau(\lambda, d)$: transmittance à la distance d de l'émetteur;
- $P(\lambda, d)$: puissance transmise à la distance d ;
- $P(\lambda, 0)$: puissance émise;
- $\sigma(\lambda)$: affaiblissement linéique ou coefficient d'extinction par unité de longueur.

L'affaiblissement dû au brouillard sur une liaison de d km s'exprime comme suit en fonction de la transmittance:

$$Att_{fog,d} = 10 \log_{10}(1/\tau(\lambda, d)) \quad \text{dB} \quad (3)$$

Le coefficient d'extinction $\sigma(\lambda)$ est la somme de 4 termes:

$$\sigma(\lambda) = \alpha_m(\lambda) + \alpha_a(\lambda) + \beta_m(\lambda) + \beta_a(\lambda) \quad (4)$$

où:

- α_m : coefficient d'absorption par les molécules (N_2 , O_2 , H_2 , HO , CO_2 , O_3 , ...)
- α_a : coefficient d'absorption par les aérosols (fines particules solides ou liquides présentes dans l'atmosphère (glace, poussière, fumées, ...))
- β_m : coefficient de diffusion de Rayleigh résultant de l'interaction de l'onde avec des particules de taille plus petite que la longueur d'onde
- β_a : coefficient de diffusion de Mie. Cette diffusion apparaît lorsque les particules sont du même ordre de grandeur que la longueur d'onde émise.

Dans l'infrarouge, c'est l'absorption qui domine tandis que dans le visible et dans l'ultraviolet, c'est la diffusion qui domine. Intrinsèquement, l'affaiblissement atmosphérique (fonction de la longueur d'onde) est inversement proportionnel à la visibilité, paramètre qui caractérise l'opacité de l'atmosphère en présence de brouillard. On peut utiliser les relations suivantes de Al Naboulsi *et al.* pour les faibles valeurs des coefficients d'absorption par les molécules et par les aérosols ainsi que du coefficient de diffusion de Rayleigh et du coefficient d'extinction:

Brouillard d'advection, qui se produit lorsque de l'air chaud et humide circule sur une surface plus froide:

$$\sigma(\lambda)_{fog,adv} = \frac{0,11478\lambda + 3,8367}{V} \quad (5)$$

Brouillard de rayonnement, dû au refroidissement d'une masse d'air par le rayonnement nocturne lorsque les conditions météorologiques sont favorables:

$$\sigma(\lambda)_{fog,rad} = \frac{0,18126\lambda^2 + 0,13709\lambda + 3,8367}{V} \quad (6)$$

où:

- λ : longueur d'onde du système de transmission optique en espace libre (μm)
- V : visibilité (km).

NOTE 1 – Ces relations, établies pour une longueur d'onde comprise entre 690 et 1 550 nm et une visibilité comprise entre 50 et 1 000 m, permettent de déterminer l'affaiblissement dû au brouillard pour un rayonnement laser et pour deux types de brouillard disponibles dans le modèle de FASCOD, à savoir le brouillard d'advection et le brouillard de rayonnement. Ces deux relations ne sont valables que pour une distance comprise entre 50 m et 1 000 m et il appartient à l'utilisateur de choisir l'une ou l'autre relation, en fonction du type de brouillard.

3.3 Effet de la pluie

En cas de pluie, l'affaiblissement est causé par la diffusion géométrique due aux gouttes de pluie. Indépendant de la longueur d'onde, cet affaiblissement Att_{rain} (dB/km) s'exprime comme suit en fonction de la distribution de la taille des gouttes de pluie fI :

$$Att_{rain} = 27,29 \times 10^5 \cdot \int_0^\infty r^2 \cdot fI \, dr \quad (7)$$

où:

r : diamètre des gouttes de pluie (m)

Pour un emplacement et une longueur de liaison donnés, fI peut être exprimé en fonction des données statistiques de l'intensité de pluie R (souvent exprimée en mm/h) comme suit [8]:

$$fI = B \exp (C R^k r) \quad (8)$$

Les paramètres utilisés dans la formule (8) sont par exemple les suivants, conformément aux statistiques recueillies au Japon:

Exemple (basé sur le modèle de Marshall et Palmer); $B = 0,16$, $C = -82$ et $k = -0,21$.

Les formules (7) et (8) permettent alors de déterminer d'une manière générale l'effet de Att_{rain} en fonction de l'intensité de précipitation R (mm/h).

$$Att_{rain} = \alpha * R^\beta \quad (9)$$

L'intensité de pluie est le paramètre fondamental utilisé pour décrire localement la pluie. Les paramètres α et β sont donnés en fonction de l'emplacement (voir le Tableau 1). Les paramètres obtenus en France sont conformes à ceux qui sont donnés dans la Recommandation UIT-R P.1814.

TABLEAU 1

Exemples de paramètres utilisés pour estimer l'affaiblissement dû à la pluie

Emplacement	α	β
Japon	1,58	0,63
France	1,076	0,67

La méthode de prévision ci-dessus, qui est intrinsèquement analogue à celle utilisée pour les ondes électriques dans le domaine millimétrique [9], s'est avérée fournir de bonnes estimations en matière de propagation des ondes optiques [5] [7] [15].

L'intensité de pluie est mesurée directement au moyen de pluviomètres ou au moyen de radars météorologiques. A partir de la marge de liaison déduite du bilan de puissance sur la liaison optique, on peut déterminer par dichotomie la probabilité d'interruption de la liaison due à la pluie. Un exemple de calcul basé sur les paramètres mesurés en France est donné ci-après:

Exemple:

$$R = 18 \text{ mm/h}$$

$$Att_{rain} = 1,076 \times 18^{0,67} = 7,46 \text{ dB/km}$$

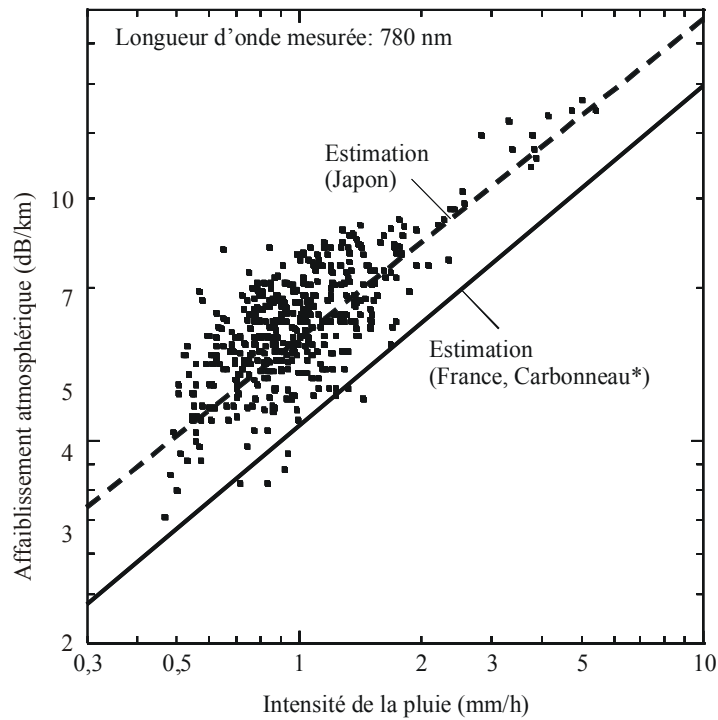
$$Att_{Rain} = 7 \text{ dB/km.}$$

Les Figures 5a) et 5b) illustrent les relations entre l'affaiblissement Att_{rain} basé sur les paramètres du Tableau 1 et R pour les résultats de mesure obtenus au Japon [7]. On constate que, pour les pluies intenses, l'estimation basée sur la Recommandation UIT-R P.1814 constitue aussi une bonne approximation des résultats de mesure obtenus au Japon.

FIGURE 5

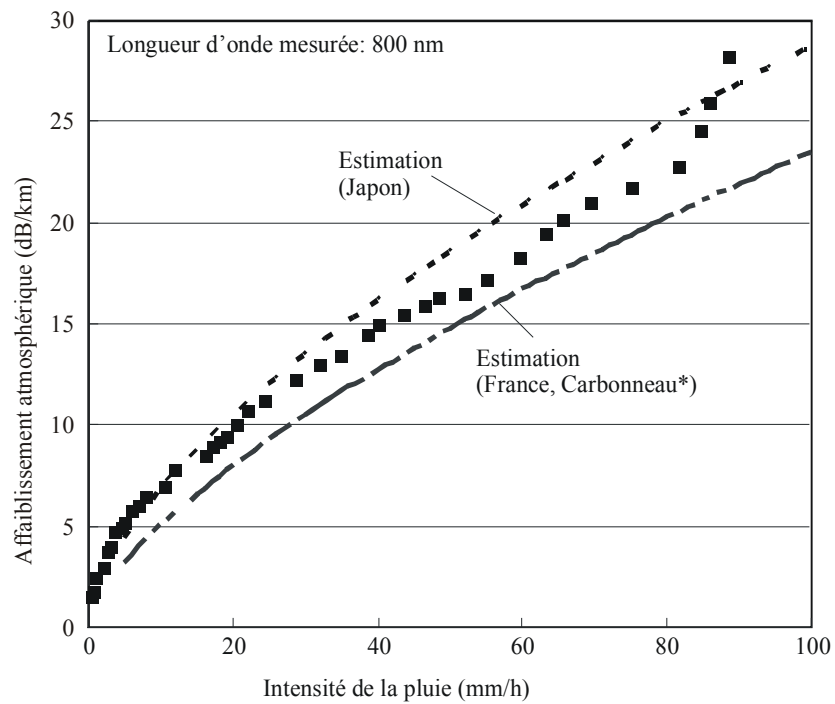
Affaiblissement atmosphérique dû à la pluie

a) Exemple 1



* Cette estimation est conforme à la Recommandation UIT-R P.1814

b) Exemple 2



* Cette estimation est conforme à la Recommandation UIT-R P.1814

3.4 Affaiblissement dû à la neige

L'affaiblissement dû à la neige est fonction de la longueur d'onde λ_{nm} et de l'intensité de précipitation S (mm/h). Il est donné par:

- Neige humide (altitude < 500 m):

$$Att_{snow} = (0,0001023 * \lambda_{nm} + 3,7855466) * S^{0,72} \quad \text{dB/km} \quad (10)$$

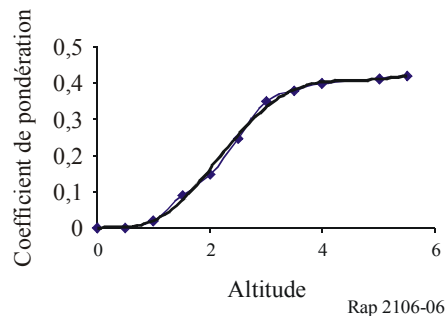
- Neige sèche (altitude ≥ 500 m)

$$Att_{snow} = (0,0000542 * \lambda_{nm} + 5,4958776) * S^{1,38} \quad \text{dB/km} \quad (11)$$

L'intensité des précipitations de neige S est le paramètre fondamental utilisé pour décrire localement la neige. Elle est mesurée dans les stations météorologiques.

Pour obtenir les caractéristiques des précipitations de neige, on applique un coefficient de pondération en fonction de l'altitude (km) à l'intensité de pluie R_p dépassée pendant un pourcentage donné de l'année moyenne p et à un emplacement donné (Fig. 6). A partir de la marge de liaison déduite du bilan de puissance sur la liaison optique, on peut déterminer par dichotomie la probabilité d'interruption de la liaison due à la neige.

FIGURE 6
Coefficient de pondération neige/pluie en fonction de l'altitude



Exemple:

Altitude = 147 m, $\lambda = 850$ nm, $S = 40$ mm/h

$$Att_{snow} = ((0,0001023 \times 850) + 3,7855466) \times 40^{0,72} = 55,14 \text{ dB/km}$$

$$Att_{snow} = 55 \text{ dB/km.}$$

3.5 Affaiblissement dû à la lumière ambiante

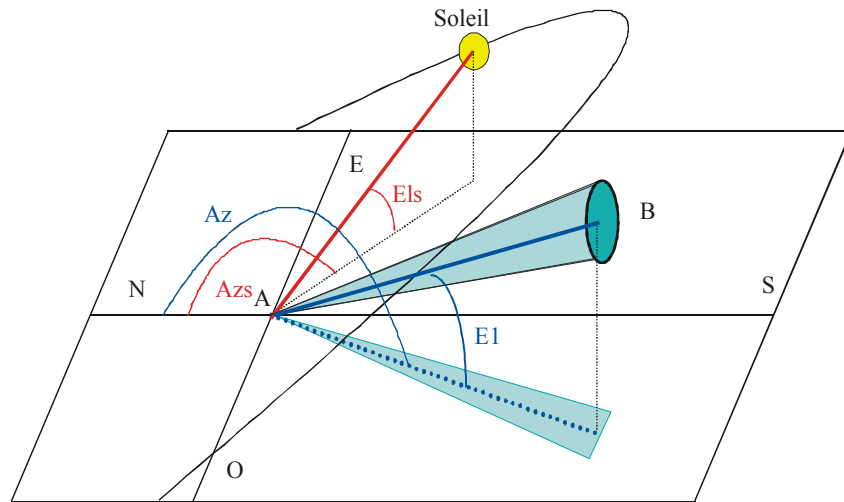
Une conjonction solaire se produit lorsque le Soleil ou une image réfléchi du Soleil se trouve à l'intérieur ou à proximité du champ de vision instantané d'un récepteur optique F_v . Ce champ de vision est en général au moins aussi large que la divergence du faisceau d'émission. Nous calculons ici la probabilité pour que la direction du Soleil soit parallèle à la liaison optique et pour que la puissance solaire entrant dans le récepteur soit supérieure à la puissance reçue de l'émetteur.

3.5.1 Trajectoire solaire

La Fig. 7 qui suit représente schématiquement la géométrie du trajet du Soleil dans le ciel par rapport à une liaison optique en espace libre (A est le récepteur, B l'émetteur).

FIGURE 7

Schéma du trajet du Soleil par rapport à une liaison optique en espace libre



Rap 2106-07

Les différents paramètres de position du Soleil (élévation, azimut) sont déterminés pour chaque jour de l'année, chaque heure, chaque minute et chaque seconde en fonction de la déclinaison et de l'ascension droite du Soleil.

3.5.2 Puissance solaire entrant dans le récepteur

La puissance rayonnée par le Soleil (W/m^2) est définie par:

$$\text{Power_radiated} = 1200 * \cos\left(\frac{\pi}{2} - \text{Elevation}_{\text{radian}}\right) \quad (12)$$

où:

$\text{Elevation}_{\text{radian}}$: élévation du Soleil.

La puissance entrant dans le récepteur est donnée par:

$$P_{\text{solar}} = F_{\text{solar}} * \text{Power_radiated} * \text{Capture_surface} * \text{Width_band}_{\text{receiver(nm)}} / 100 \quad (13)$$

où:

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

Capture_surface : surface de détection du récepteur

$\text{Width_band}_{\text{receiver(nm)}}$: largeur de bande du récepteur.

3.6 Effets des scintillations

Sous l'influence de la turbulence thermique dans le milieu de propagation, il se forme des cellules aléatoires de température différente et de taille variable (10 cm – 1 km). Ces cellules ont des indices de réfraction différents, conduisant à des phénomènes de diffusion, de propagation par trajets multiples et de variation des angles d'arrivée: le signal reçu fluctue rapidement aux fréquences comprises entre 0,01 et 200 Hz. Le front d'onde varie de manière analogue, entraînant des focalisations et des défocalisations du faisceau. Ces fluctuations du signal sont appelées scintillations. L'amplitude et la fréquence des scintillations dépendent de la taille des cellules par rapport au diamètre du faisceau. Lorsque les hétérogénéités sont grandes par rapport à la section transversale du faisceau, le faisceau est dévié; lorsqu'elles sont petites, le faisceau est élargi.

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 la vitesse des fluctuations (fréquence des scintillations) augmentent avec la fréquence de l'onde. Pour une onde plane, de faibles turbulences et un récepteur donné, la variance des scintillations $\sigma_\chi^2(\text{dB}^2)$ peut s'exprimer comme suit:

$$\sigma_x^2 = 23,17 * k^{7/6} * C_n^2 * L^{11/6} \quad (14)$$

où:

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

L : longueur de la liaison (m)

$C_n^2 \text{ (m}^{-2/3}\text{)}$: paramètre de structure de l'indice de réfraction représentant l'intensité des turbulences. Il est fonction de la rugosité, du rayonnement solaire, de l'humidité et de l'albédo terrestre.

L'amplitude crête à crête des scintillations est égale à $4\sigma_\chi$ et l'affaiblissement lié aux scintillations est égal à $2\sigma_\chi$. Pour les fortes turbulences, on constate une saturation de la variance donnée par la formule ci-dessus [13]. On notera que la valeur du paramètre C_n^2 n'est pas la même aux longueurs d'onde millimétriques et aux longueurs d'onde optiques [14]. Les ondes millimétriques sont particulièrement sensibles aux fluctuations de l'humidité tandis que pour les ondes optiques, l'indice de réfraction est essentiellement fonction de la température (la contribution due à la vapeur d'eau est négligeable). Pour les ondes millimétriques, on obtient une valeur de C_n^2 d'environ $10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$, ce qui correspond à des turbulences moyennes (pour les ondes millimétriques, on a généralement $10^{-14} < C_n^2 < 10^{-12}$) et pour les ondes optiques, on obtient une valeur de C_n^2 d'environ $2 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, ce qui correspond à des faibles turbulences (pour les ondes optiques, on a généralement $10^{-16} < C_n^2 < 10^{-13}$) [13].

3.7 Autres facteurs

Dans le cas de la propagation en extérieur, les liaisons optiques en espace libre induisent peu de bruit de fond. Toutefois, elles peuvent être interrompues par des rayons du Soleil, lorsque ceux-ci coupent la direction du faisceau de réception de la liaison optique en espace libre. En cas d'intersection entre des rayons du Soleil et l'axe principal du faisceau de réception, l'effet thermique dû à la concentration par la lentille peut devenir tel qu'il peut entraîner la destruction du récepteur. La direction de la liaison optique doit être choisie de manière à éviter l'intersection avec les rayons du Soleil.

4 Applications du service fixe

4.1 Caractéristiques générales

Les liaisons optiques en espace libre présentent les avantages suivants:

- large bande ou débit de données élevé;
- équipements petits et simples;
- fonctionnement sans licence;

- coût avantageux;
- facilité et rapidité de déploiement;
- rapidité de déplacement et de réutilisation des liaisons.

Pour certaines applications, les liaisons optiques en espace libre offrent plusieurs avantages supplémentaires par rapport à ceux offerts par les liaisons fixes traditionnelles ou à ceux offerts par les liaisons à fibres optiques. Ces applications peuvent par exemple être les suivantes:

- liaison pour une manifestation particulière;
- liaison temporaire: installation rapide pour une durée limitée dans l'attente d'une liaison traditionnelle définitive;
- liaison d'urgence: installation d'une liaison d'urgence en cas de panne d'une liaison;
- liaison entre sites, réseau indépendant (PDH, SDH, ATM, Ethernet 10/100/1 000);
- fermeture d'anneau optique;
- liaison de secours;
- réseau dense;
- infrastructure mobile, par exemple liaison pour des nanocellules ou des picocellules GSM ou IMT-2000.

Les liaisons optiques en espace libre présentent les inconvénients suivants:

- disponibilité par rapport à la distance;
- condition de visibilité directe.

Par ailleurs, pour la transmission des ondes optiques en espace libre, il faut surmonter certains problèmes liés à la propagation, examinés au § 3.

4.2 Exemples d'applications de base

Tirant parti des avantages, les applications types des liaisons optiques en espace libre sont mises en place sur des distances limitées. Le présent paragraphe donne des exemples de liaison utilisée pour raccorder des réseaux locaux (LAN) déployés dans des bâtiments distincts et de liaison utilisée pour élargir l'infrastructure mobile (voir les Fig. 8 et 9).

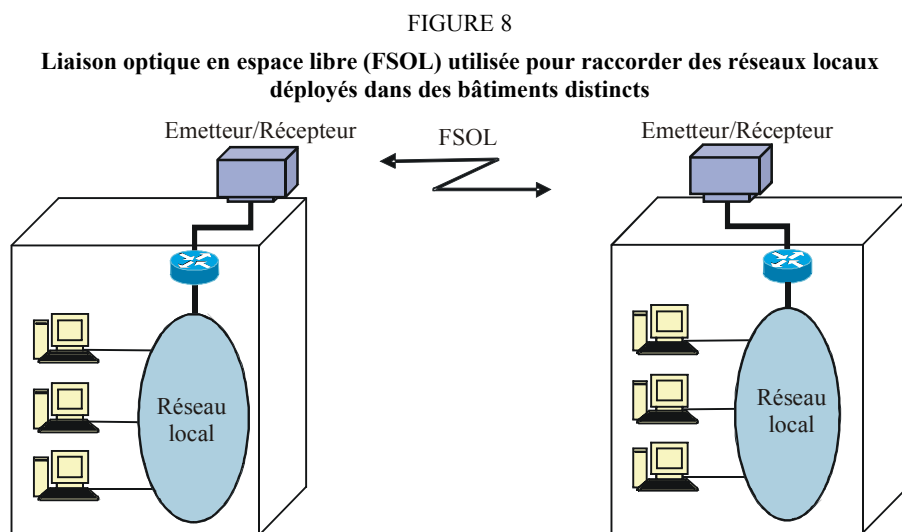
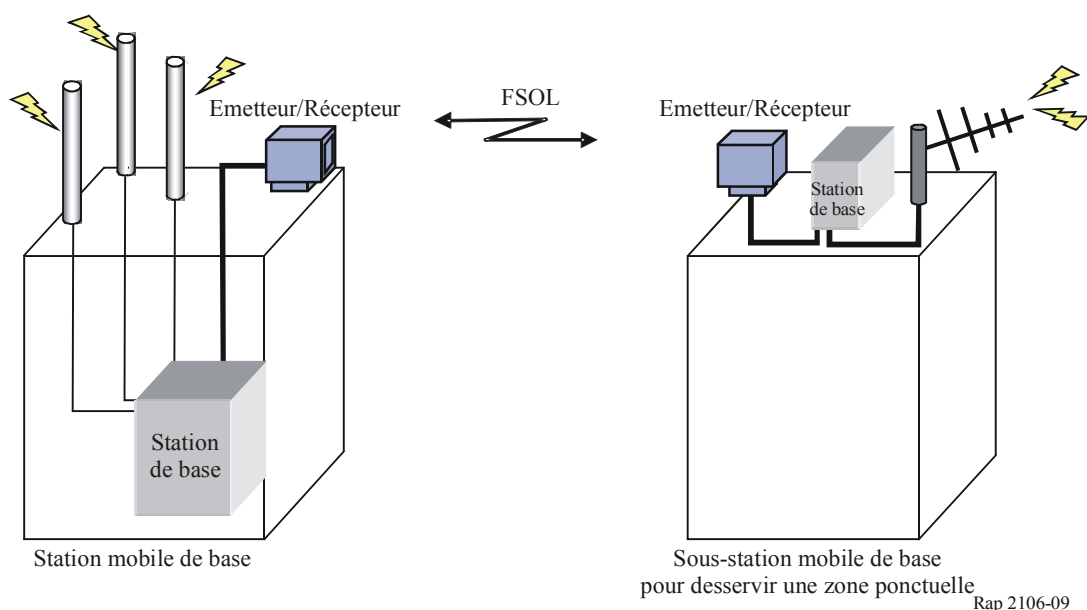


FIGURE 9

Liaison optique en espace libre (FSOL) utilisée pour élargir l'infrastructure mobile



4.3 Exemple de déploiement réel

Le présent paragraphe donne un exemple de déploiement de liaisons optiques en espace libre pour élaborer une solution de réseaux locaux large bande conjointement avec des systèmes à fibres optiques.

La Fig. 9 illustre la configuration du réseau d'écoles avec accès Internet haut débit, utilisant des liaisons optiques en espace libre en combinaison avec des systèmes à fibres optiques. Cette infrastructure de réseau large bande regroupe de nombreuses écoles utilisant divers moyens de transmission: satellite, fibre optique, accès fixe sans fil et liaisons optiques en espace libre. Au Japon, plus de 100 écoles utilisent des liaisons optiques en espace libre.

Dans certains cas, un bâtiment donné sert d'installation relais pour assurer des liaisons vers plusieurs écoles. On réalise facilement ce branchement en utilisant un signal à la même fréquence/longueur d'onde. Les paramètres des liaisons optiques en espace libre représentées sur la Fig. 10 sont donnés dans le Tableau 2.

TABLEAU 2

Paramètres des liaisons optiques en espace libre

Longueur maximale de la liaison (km)	Environ 2 ⁽¹⁾
Capacité de transmission (Mbit/s)	300
Marge pour l'affaiblissement (dB)	20
Dispositif optique (gamme de longueurs d'onde)	diode laser/Si-APD (bande à 0,8 μm)
Interface avec le câble	Fibre optique 1,3 μm

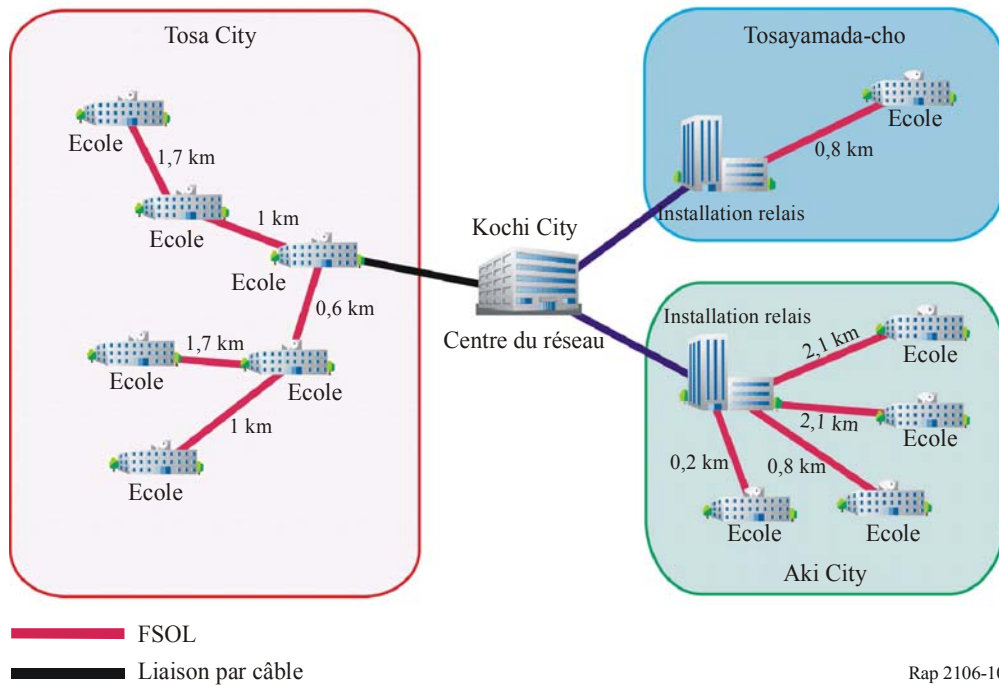
⁽¹⁾ Disponibilité de la liaison supérieure à 99%

APD: photodiode à avalanche

La disponibilité des liaisons optiques en espace libre est déterminée sur la base des données statistiques de visibilité recueillies par l'autorité météorologique locale (voir § 3.2.1).

FIGURE 10

Exemple de déploiement d'un réseau large bande entre des écoles



Rap 2106-10

5 Considérations pour la conception des liaisons

5.1 Marge de liaison

L'un des éléments importants à connaître pour les transmissions optiques en espace libre est la marge de liaison du laser. Pour pouvoir utiliser les modèles de prévision, les paramètres suivants des équipements sont nécessaires (liste non exhaustive):

- la puissance d'émission;
- la sensibilité du récepteur;
- la surface de détection du récepteur;
- la divergence du faisceau d'émission.

La marge de liaison optique est la puissance disponible par rapport à la sensibilité du récepteur. Elle est définie par:

$$M_{link} = E_p + |S_s| - Att_{Geo} - Att_{mol} - Sl \quad (15)$$

où:

- M_{link} : marge de liaison (dB)
- E_p : puissance du signal d'émission (dBm)
- S_s : sensibilité (dBm)
- Att_{Geo} : affaiblissement géométrique sur la liaison (dB)
- Att_{mol} : affaiblissement moléculaire sur la liaison (dB)
- S_{loss} : perte dans l'équipement (dB) donnée par le fabricant (éventuellement multipliée par 2, supposée être égale à 0 dB).

Exemple:

$$\begin{aligned}
 d &= 271 \text{ m}, \theta = 4 \text{ mrad}, E_p = 12 \text{ dBm}, S_s = -50 \text{ dBm} \\
 Att_{Geo} &= 21 \text{ dB} \\
 Att_{mol} &= 0,11 \text{ dB} \\
 S_{loss} &= 0 \text{ dB} \\
 M_{link} &= 12 + |-50| - 21 - 0,11 - 0 = 40,89 \\
 M_{link} &= 41 \text{ dB.}
 \end{aligned}$$

Dans ce qui suit, on décrit les différents affaiblissements fixes, qui doivent être pris en considération lors du calcul de la marge de liaison et d'autres valeurs nécessaires.

En cas de transmission utilisant le multiplexage par répartition en longueur d'onde pour augmenter le débit de données transmises sur une même liaison optique en espace libre, il est peut-être plus simple d'utiliser la formule ci-dessus pour une seule longueur d'onde.

5.1.1 Diamètre du faisceau

Le diamètre du faisceau dans la surface du front d'onde à la distance « d » s'exprime comme suit en fonction de la divergence du faisceau:

$$S_d \approx d \times \tan(\theta) \quad (16)$$

où:

- θ : divergence du faisceau (angle total) (rad)
- d : longueur de la liaison (m)
- S_d : diamètre du faisceau à la distance d (m).

Exemple:

$$\begin{aligned}
 d &= 271 \text{ m}, \theta = 4 \text{ mrad} = 0,004 \text{ rad} \\
 S_d &= 271 \times \tan(0,004) = 1,084 \\
 S_d &= 1,084 \text{ m.}
 \end{aligned}$$

5.1.2 Affaiblissement géométrique

Etant donné que l'émetteur émet un faisceau divergent (1-3 mrad), la cellule de réception collectera uniquement une partie de l'énergie émise. L'affaiblissement géométrique est donné par:

$$Att_{Geo} = \frac{S_{surf}}{S_{capture}} = \frac{\frac{\pi}{4}(d\theta)^2}{S_{capture}} \quad (17)$$

où:

- S_{surf} : surface du faisceau à la distance d
- $S_{capture}$: surface de détection du récepteur (Ra)
- θ : divergence du faisceau (Bd)
- d : distance entre l'émetteur et le récepteur.

Exemple:

$$\begin{aligned} Sd &= 0,92 \text{ m}^2, Ra = 0,00785 = 7,85 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \\ Att_{Geo} &= 10 \log_{10} (0,9228 / 0,00785) = 20,70 \text{ dB} \\ Att_{Geo} &= 21 \text{ dB.} \end{aligned}$$

En dB, l'affaiblissement est donné par:

$$Aff_{dB} = 10 \log_{10}(Aff) \quad (18)$$

5.1.3 Affaiblissement moléculaire

L'affaiblissement moléculaire (O₂, H₂, CO₂, O₃, ...) est une partie bien connue de l'affaiblissement atmosphérique et il dépend de la longueur d'onde utilisée. Certaines valeurs types (valeurs linéaires) sont données dans le Tableau 3:

TABLEAU 3
Valeurs types de l'affaiblissement moléculaire

Longueur d'onde (nm)	Att_{lin} = Affaiblissement moléculaire linéique (dB/km)
550	0,13
690	0,01
780	0,41
850	0,41
1 550	0,01

Pour une longueur de liaison donnée, l'affaiblissement moléculaire est donné par:

$$Att_{mol}(\text{dB}) = Att_{lin}(\lambda) * d \quad (19)$$

où:

Att_{lin} : affaiblissement moléculaire linéique
 d : distance entre l'émetteur et le récepteur

Exemple:

$$\begin{aligned} d &= 271 \text{ m}, \lambda = 850 \text{ nm}, \text{ donc } Att_{lin} = 0,41 \text{ dB/km} \\ Att_{mol} &= 0,271 \times 0,41 = 0,111 \text{ dB} \\ Att_{mol} &= 0,11 \text{ dB.} \end{aligned}$$

5.1.4 Niveau reçu

Le niveau reçu est le niveau de puissance reçu par le récepteur à une distance donnée et cette valeur est importante pour le processus d'installation. Le niveau reçu est donné par:

$$R_{level} = Ep - Att_{Geo} - Att_{mol} - S_{loss} \quad (20)$$

où:

R_{level} : niveau reçu (dBm)

E_p : puissance du signal émis (dBm)

Att_{mol} : affaiblissement moléculaire sur la liaison (dB)

S_{loss} : perte dans l'équipement (dB) donnée par le fabricant (éventuellement multipliée par 2, supposée être égale à 0 dB).

Exemple:

$d = 271$ m, θ : 4 mrad, E_p : 12 dBm, S_s : -50 dBm

$Att_{Geo} = 21$ dB

$Att_{mol} = 0,11$ dB

$S_{loss} = 0$ dB

$R_{level} = 12 - 21 - 0,11 - 0 = -9,11$ dBm

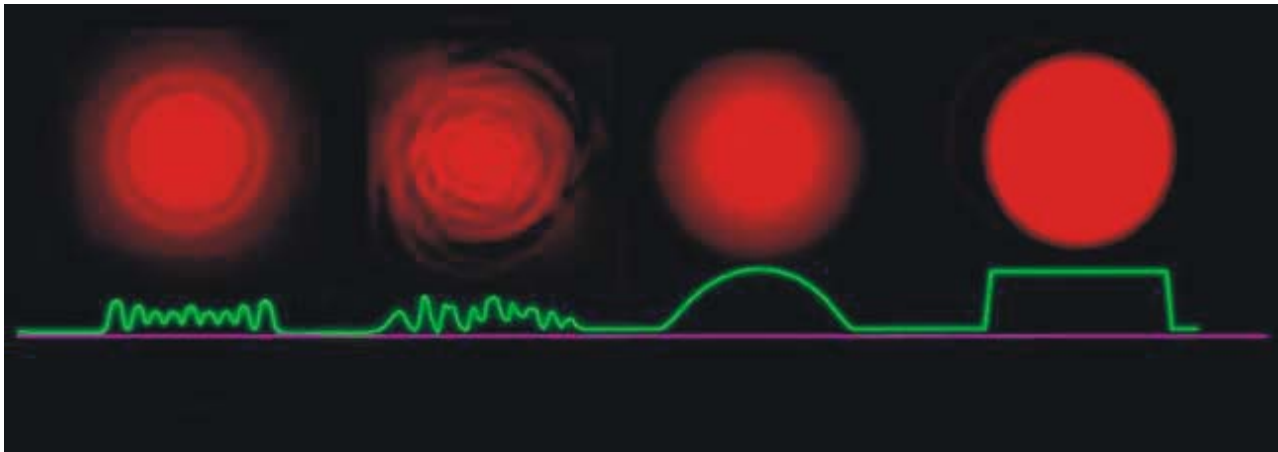
$R_{level} = -9$ dBm.

5.1.5 Homogénéité du faisceau dans le front d'onde

L'homogénéité du faisceau dans le front d'onde dépend notamment de la qualité des sources et des systèmes optiques utilisés. Ces éléments ont une incidence sur la qualité prévue du faisceau et, par conséquent, sur l'évaluation de la liaison. L'idéal est d'obtenir un faisceau uniforme avec une distribution homogène de la puissance (haut-de-forme) et la différence de puissance dans le front d'onde du faisceau ne devrait pas dépasser 3 dB. La Fig. 11 montre divers faisceaux et les homogénéités correspondantes.

FIGURE 11

Divers faisceaux de transmission optique en espace libre et homogénéités correspondantes



Rap 2106-11

5.1.6 Marge linéique

Pour une liaison donnée, l'un des éléments importants (mais pas le seul) à connaître est la marge linéique afin de pouvoir procéder à des comparaisons. La marge linéique est donnée par:

$$L_{margin}(\text{dB/km}) = M_{link} / d \quad (21)$$

où:

L_{margin} : marge linéique (dB/km)
 M_{link} : marge de la liaison (dB)
 d : longueur de la liaison (km)

Exemple:

$d = 0,271 \text{ km}, M_{link} = 41 \text{ dB}$
 $L_{margin} = 41/0,271 = 151,29 \text{ dB/km}$
 $L_{margin} = 151 \text{ dB/km.}$

6 Déploiement de liaisons optiques en espace libre dans certaines régions climatiques

Comme nous l'avons mentionné dans le paragraphe précédent, les liaisons optiques en espace libre nécessitent généralement une marge assez grande pour tenir compte des précipitations et du brouillard. Si elles sont déployées dans des régions où les précipitations sont pratiquement inexistantes, elles pourront être relativement longues. Un rapide calcul laisse supposer qu'une marge de 20 dB permet de multiplier par 10 la longueur des liaisons. En pareil cas, il faut toutefois tenir compte des effets de l'affaiblissement atmosphérique L_{atm} (voir § 3.1) et de l'incidence de la courbure du faisceau optique. Principalement causés par l'absorption moléculaire ou la réfraction atmosphérique due à la variation de la température, ces effets se traduisent par des scintillations, c'est-à-dire par des fluctuations du niveau reçu. L'ampleur des fluctuations dans le désert, qui est définie par la formule (14) au § 3.6, nécessite un complément d'étude. Toutefois, pour les régions semi-arides, Zilbermann *et al.* [12] ont élaboré, dans le cas du Moyen-Orient, un modèle de profil vertical de C_n^2 fondé sur un vaste ensemble de mesures d'imagerie LIDAR. Ce modèle peut être appliqué dans les régions désertiques jusqu'à ce qu'un modèle plus complet soit proposé dans l'avenir.

Pour faire face à ce type de scintillations, une réception en diversité avec des lentilles distinctes peut être efficace.

Un autre problème à prendre en considération concerne les effets des tempêtes de sable dans le désert, qui peuvent réduire nettement la visibilité entre l'émetteur et le récepteur. La poussière et le sable que le vent transporte dans le désert sont composés de fines particules (par exemple calcium, silicium, aluminium et soufre). Concernant les liaisons optiques en espace libre, l'effet des tempêtes de sable sur la visibilité dépend de la vitesse du vent. Un programme informatique existe pour calculer le coefficient de transmission total (absorption et diffusion) dans une région désertique, mais ce sujet n'a pas encore été étudié en totalité et pourra également nécessiter des études complémentaires.

A l'heure actuelle, on peut toutefois utiliser le programme informatique FASCOD (ONTAR) avec le modèle désertique (dans lequel les aérosols sont essentiellement des particules de sable en suspension) pour calculer le coefficient de transmission total (absorption et diffusion) dans une région désertique. Les données d'entrée nécessaires sont la visibilité au niveau du sol et la vitesse du vent à une hauteur de 10 m. L'utilisateur peut définir son propre modèle de climat et d'aérosols pour calculer l'affaiblissement atmosphérique ou utiliser les données de distribution de la taille, de la concentration volumique et de la concentration numérique des aérosols obtenues par Zilbermann et Kopeika [12] à partir de mesures LIDAR à différentes hauteurs dans le bassin méditerranéen (Israël).

7 Aspects opérationnels

Des liaisons optiques sont déployées n'importe quand et n'importe où, sachant qu'il n'est pas prévu d'exiger une coordination pour éviter le brouillage entre des liaisons de ce type exploitées par différents opérateurs.

En théorie, un brouillage entre des liaisons optiques en espace libre peut se produire dans les environnements suivants:

- lorsque deux systèmes utilisent la même fréquence (longueur d'onde) ou des fréquences (longueurs d'onde) proches;
- et que, parallèlement, ils fonctionnent en des endroits proches.

Lorsque les fréquences utilisées pour deux liaisons optiques en espace libre sont proches, leurs spectres d'émission peuvent se chevaucher, créant alors un brouillage inacceptable. Les opérateurs doivent donc choisir les fréquences (longueurs d'onde) avec soin afin d'éviter le brouillage entre liaisons optiques en espace libre (voir § 2.3).

Toutefois, le brouillage ne sera préjudiciable que si les deux liaisons fonctionnent dans un environnement géographique relativement restreint. Comme indiqué au § 3.1, le faisceau de lumière côté réception est généralement ajusté de manière à ce que son diamètre soit de plusieurs mètres pour une longueur de liaison d'environ 1 km. En d'autres termes, la puissance émise sur la liaison optique en espace libre est très concentrée dans un faisceau étroit avec un angle d'ouverture de l'ordre de $0,1^\circ$. En revanche, l'angle d'ouverture de la lentille côté réception est légèrement plus grand dans un souci d'adaptation souple vis-à-vis des bâtiments ou d'autres facteurs d'instabilité. Il est à noter que la puissance optique est nettement réduite, par exemple de plusieurs dizaines de dB, en dehors du faisceau de réception.

On suppose donc que la probabilité de brouillage entre liaisons optiques en espace libre de différents opérateurs est faible sauf si ces liaisons sont déployées pratiquement en parallèle et qu'elles utilisent la même fréquence (longueur d'onde).

Les opérateurs devront peut-être porter davantage leur attention sur les effets des rayons du Soleil examinés au § 3.7 pour choisir l'emplacement des stations des systèmes de transmission optique en espace libre.

7.1 Temps de propagation

Une autre caractéristique intéressante des équipements optiques sans fil est leur débit de transmission des données numériques, qui peut par exemple permettre de s'affranchir du routeur pour une liaison de réseau local.

De fait, la majorité des équipements optiques sans fil acceptent différents protocoles de transmission. D'une manière générale, aucun traitement n'est appliqué au contenu ou à la nature des données, d'où des temps de propagation relativement courts.

Les paramètres à prendre en considération pour le calcul du temps de propagation pour l'accès sont les suivants:

- temps de traitement électronique dans les équipements optiques sans fil (émetteur et récepteur);
- temps de propagation de la lumière dans l'atmosphère entre les équipements A et B (temps de propagation de la lumière dans l'atmosphère: environ 3×10^{-9} s/m);
- le temps de propagation pour l'accès est la somme de ces deux paramètres;

- exemple:
 - liaison de 500 m,
 - débit de données de 155 Mbit/s,
 - exemple de temps de traitement électronique dans les équipements optiques sans fil: $3 \times 10^{-7} \times 2 = 6 \times 10^{-7}$ s;
 - temps de propagation de la lumière dans l'atmosphère entre les équipements A et B: $1,5 \times 10^{-6}$ s;
 - le temps de propagation vaut: $6 \times 10^{-7} + 1,5 \times 10^{-6} = 2,11 \times 10^{-6} \Leftrightarrow$ soit 2,11 μ s.

7.2 Confidentialité des données transmises

La majorité des fabricants utilisent une modulation d'amplitude qui leur est propre pour la transmission des données par laser, et acceptent généralement différents protocoles de transmission, mais les possibilités de «piratage» des informations sont relativement restreintes.

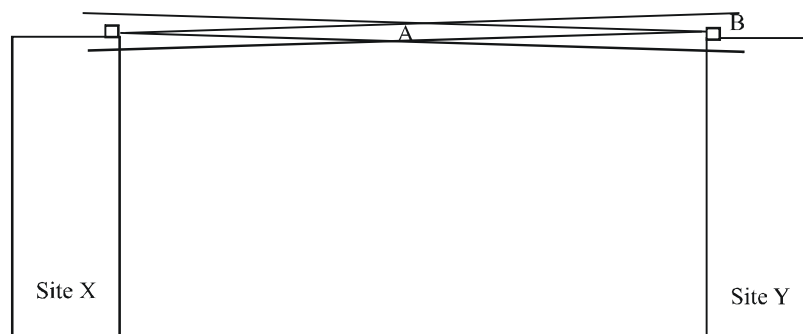
Mise à part une intervention directe sur l'équipement ou sur ses accès, une personne ne dispose que de deux solutions pour «récupérer» les données transmises, avec des compétences techniques importantes et des critères d'intervention complexes.

Le piratage d'informations n'est possible que si la personne exécute les opérations suivantes:

- 1 Obtenir le même équipement optique sans fil auprès du même fabricant, pour collecter et décoder les données.
- 2 «Collecter» des données, une partie du faisceau, qui est néanmoins très directif. Et «récupérer» suffisamment d'énergie pour les traiter (Fig. 12):
 - soit entre les deux sites (point A) pour obtenir les données transmises uniquement depuis le site X ou Y, avec une difficulté supplémentaire qui est d'éviter de couper le faisceau;
 - ou, par exemple, derrière le site Y (point B) pour les données transmises depuis le site X, sachant que l'affaiblissement du signal est très important à mesure que l'on s'éloigne de la source;
 - ou, par exemple, devant l'équipement du site Y (point B) pour les données transmises depuis le site Y, avec une difficulté supplémentaire qui est d'éviter de couper le faisceau.
- 3 Enfin, la dernière difficulté est de connaître le protocole de transmission, pour pouvoir comprendre les données collectées.

FIGURE 12

Pour collecter des bits transmis par les sites X ou Y, le pirate doit collecter une partie des faisceaux



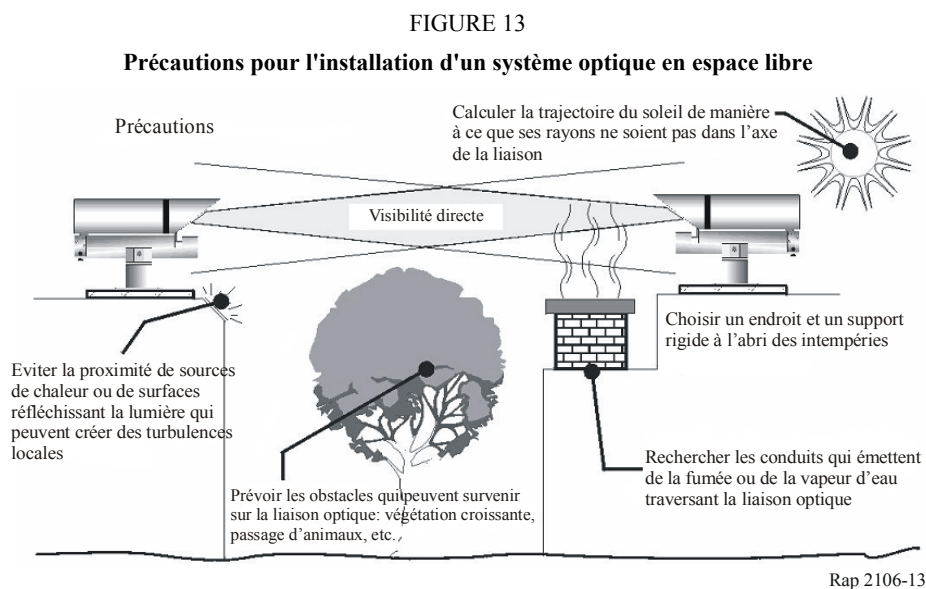
7.3 Lignes directrices pour la mise en place de liaisons optiques en espace libre

7.3.1 Installation des systèmes de transmission optique en espace libre

D'une manière générale, l'installation des équipements optiques sans fil est analogue à celle des systèmes fixes sans fil:

- études techniques concernant la liaison (par exemple au moyen du logiciel «Prédiction FSO prediction») afin de définir la disponibilité de la liaison;
- installation en hauteur (bâtiment, pylône, château d'eau, ...);
- en visibilité directe, sans obstacle sur le trajet actuel ou futur;
- durée d'installation inférieure à une journée pour une liaison.

Mais, compte tenu des particularités de cette technologie, il faut tenir compte de certains éléments et de certaines précautions pendant l'installation (Fig. 13).



Etant donné que le faisceau laser de l'équipement doit avoir une faible divergence, un alignement très précis est nécessaire. L'alignement de l'émetteur et du récepteur caractérise le couplage de la liaison optique. Les vibrations mécaniques peuvent créer des perturbations. La personne chargée du montage du système de communication doit:

- fixer les matériels sur un support rigide ou un mur porteur de manière à ce qu'ils subissent le moins possible de vibrations ou de chocs (crête de mur, côté de mur, ...);
- éviter l'alignement direct avec les rayons du Soleil;
- éviter la proximité d'éléments susceptibles de causer des turbulences atmosphériques (cheminée, surface réfléchissante, ...).

7.3.2 Exemple de processus d'alignement de système de transmission optique en espace libre

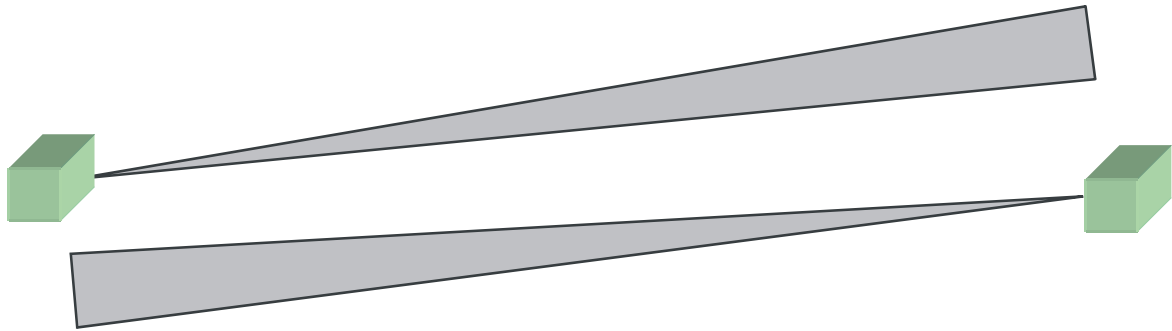
Avant de procéder à l'alignement d'un système optique en espace libre, il faut commencer par calculer certaines valeurs, par exemple:

- le niveau reçu;
- le diamètre du faisceau.

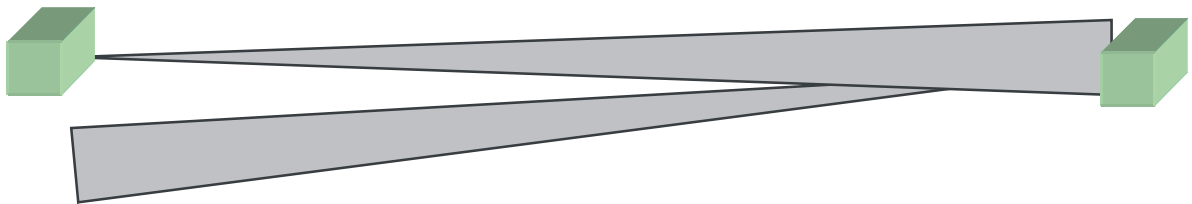
Le premier niveau d'alignement est obtenu par un alignement visuel en élévation et en azimuth des deux côtés.

Pour obtenir un alignement précis, on utilise une caméra, un niveau sonore, une fréquence de bip et l'indication d'un mesureur de puissance et on suit les étapes qui suivent (Fig. 14 et 15).

FIGURE 14

Exemple de processus d'alignement

a) Alignement du faisceau optique côté 1 par rapport au récepteur optique côté 2



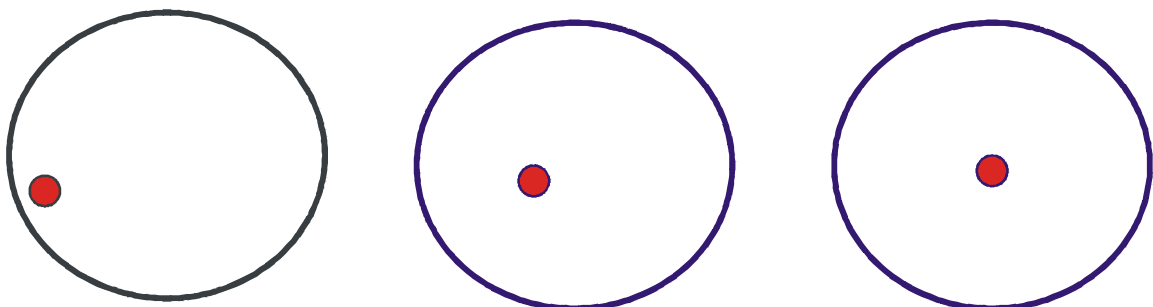
b) Alignement du faisceau optique côté 2 par rapport au récepteur optique côté 1



c) De plus, centrage précis du faisceau provenant du site 1 (violet) dans la surface de réception (Ra) (rouge) du site 2 et inversement (en élévation et en azimuth)

Rap 2106-14

FIGURE 15

Processus d'alignement précis

Rap 2106-15

7.4 Système de plusieurs liaisons optiques en espace libre

Lorsque plusieurs liaisons optiques en espace libre sont mises en place avec la même longueur d'onde et le même niveau de réception, il faut tenir compte de ce qui suit:

- la séparation minimale entre les faisceaux de deux liaisons optiques en espace libre parallèles ou quasiment parallèles devrait être le double du diamètre de faisceau de la liaison la plus courte;
- la séparation angulaire minimale entre deux liaisons optiques en espace libre devrait être le double de l'angle de divergence total de la liaison la plus courte;
- il convient de noter que la CE 15 de l'UIT-T a élaboré la Recommandation UIT-T G.640 sur ce sujet – Interfaces pour systèmes de transmission optique en espace libre colocalisés compatibles longitudinalement.

8 Résumé

Le présent Rapport porte sur les caractéristiques des liaisons optiques en espace libre pour les applications du service fixe ainsi que sur les aspects techniques et opérationnels associés. Les paragraphes précédents concernent les liaisons optiques en espace libre pour les applications du service fixe, mais il est à noter qu'il existe d'autres types de liaisons optiques en espace libre, par exemple pour les services mobiles ou pour les services spatiaux. Les éléments nécessitant un complément d'étude ou à prendre en compte peuvent être récapitulés comme suit:

- évolution technique des dispositifs optiques;
- élargissement des applications du service fixe;
- compatibilité, si nécessaire, avec les liaisons optiques en espace libre pour les applications d'autres services de radiocommunication.

A l'avenir, on pourra envisager d'étudier les systèmes de transmission optique en espace libre en extérieur point à multipoint, les systèmes de transmission optique en espace libre en intérieur point à point et point à multipoint ainsi que les procédures de test et de mesure.

Références

- [1] G. Nykolak, *et al.*, «4 X 2.5 Gb/s 4.4 km WDM free-space optical link at 1 550 nm,» in Proc. OFC'99, PD11, 1999.
- [2] Y. Aburakawa, «Dense wavelength division multiplexed optical wireless link towards terabit transmission» in Proc. Of MWP'03, pp. 135, 2003.
- [3] Commission électrotechnique internationale (CEI), norme CEI 60825-1, «Sécurité des appareils à laser».
- [4] G. Mie, Ann. Physik., Vol. 25, pp. 377-445, 1908.
- [5] K. Morita, *et al.*, «Light wave attenuation in propagation through the atmosphere» Review of Electrical Communications Labs., Vol. 19, No. 714-725, pp. 798-842, 1971.
- [6] Final Approach Visibility Studies, 1955, U.S. Weather Bureau.
- [7] Y. Aburakawa, *et al.*, «Experimental evaluation of 800-nm band optical wireless link for radio access network,» IEICE Trans. Electron., Vol. E86-C, pp. 1 175-1 183, No. 7, 2003.

- [8] J.S. Marshal and W.M. Palmer, «The distribution of raindrops with size», Journal of the Meteorology, Vol. 5, No. 6, pp. 165, 1948.
- [9] K. Morita, and I. Higuchi, «Statistical studies on electromagnetic wave attenuation due to rain» Review of Electrical Communications Labs., Vol. 19, No. 7-8, pp. 798-842, 1971.
- [10] N. Hiromoto, «Novel detector technologies for infrared communication and sensing, CRL International Topic Workshop on Space Laser Communication Current Status and Future Perspectives, pp. 90-95, 1997.
- [11] M. Akiba, *et al.*, «Measurement of optical propagation characteristics for free-space optical communication during rainfall», IEICE Trans. Commun., Vol. E87-B, No. 7 July 2004.
- [12] Zilberman A., Kopeika N. S., «Aerosol and turbulence characterization at different heights in semi-arid regions», Proc. SPIE Vol. 5891, p. 129-140.
- [13] P. Bataille, «Analyse du comportement d'un système de télécommunication optique fonctionnant à 0,83 micron dans la basse troposphère», Thèse, Université Rennes, 1992.
- [14] H. Vasseur, *et al.*, «Influence de la troposphère sur les liaisons sans fil aux ondes millimétriques et optiques», Propagation électromagnétique du décimétrique à l'angström, 3ème journée, Rennes 1997.
- [15] T.H. Carbonneau, D.R. Wiseley, «Opportunities and challenges for optical wireless; the competitive advantage of free-space telecommunications link in today's crowded marketplace», SPIE Conf. on optic. Wireless Com., Boston, USA, Vol. 3232, 1998.

Annexe 1

Exemples de bilan de liaison

1 Exemple de bilan de liaison

Le bilan d'une liaison FSOL s'établit essentiellement à partir de la disponibilité qui est exigée de la liaison, compte tenu des caractéristiques de propagation à l'endroit où elle est mise en oeuvre.

Le Tableau A1-1 donne des exemples de paramètres système de deux types différents de liaison FSOL. Dans l'un et l'autre cas, on a utilisé une diode laser (LD) dotée d'une puissance d'émission identique. Par ailleurs, l'affaiblissement dû à l'élargissement du faisceau, L_p , est fixé à une valeur équivalant à 24 dB; il correspond à un important affaiblissement de la liaison FSOL entre l'émetteur, Tx, et le récepteur, Rx, c'est-à-dire l'affaiblissement en espace libre moins les gains d'antenne dans le cas de l'onde électrique. L_p s'exprime en théorie selon la formule suivante:

$$L_p = (A_r / w_r)^2 L_{atm} \quad (A-1)$$

où:

w_r : diamètre du faisceau ponctuel de la lumière émise à la distance r (longueur de la liaison)

A_r : ouverture équivalente de la lentille réceptrice.

Il est possible d'ajuster ces paramètres, w_r et A_r , suivant la fonction de convergence des lentilles optiques installées en Tx ou Rx. On considère habituellement que l'affaiblissement atmosphérique, L_{atm} , est faible (voir le § 3.1).

La puissance de réception exigée s'obtient à partir du calcul de L_p , en tenant compte de marges nécessaires pour les effets dus au brouillard et aux précipitations. Dans les exemples du Tableau A1-1, les marges totales sont fixées aux alentours de 22 dB pour les deux types.

Il est connu que deux liaisons FSOL de longueurs différentes peuvent opérer avec une puissance d'émission et un affaiblissement dû à l'élargissement du faisceau équivalents, mais que les objectifs d'interruption correspondants sont alors très différents.

On observera que le taux d'interruption de 0,1% pour la liaison de Type 1 peut ne pas être applicable à des connexions au réseau public, RTPC ou RNIS. En revanche, la liaison FSOL de Type 2, dont le taux d'interruption est beaucoup moins élevé, peut servir de système d'accès sans fil fixe aux réseaux publics centraux.

TABLEAU A1-1

Exemple de conception d'un bilan pour une liaison FSOL

Paramètres	Type 1	Type 2
Longueur de la liaison (m)	900	350
Capacité de la liaison (Mbit/s)	622,08	
BER exigé	BER = 10^{-9}	
Taux d'interruption de la liaison	0,1% (environ 9 heures/an)	0,004% (environ 20 min/an)
Puissance d'émission (sortie de LD: nominale)	13 dBm (20 mW)	
Affaiblissement d'insertion à Tx (dB)	3	
Affaiblissement dû à l'élargissement du faisceau (dB)	24	
Affaiblissement d'insertion à Rx (dB)	3	
Marge pour le brouillard (Note 1) (dB)	14,0	15,5
Marge pour les précipitations (Note 1) (dB)	8,0	6,5
Sensibilité du récepteur (dBm)	-40	

NOTE 1 – Compte tenu de données statistiques observées à Tokyo [7] [9].

2 Exemple de prévision de la disponibilité d'un système FSO

Un des importants éléments qu'il faut connaître avec les émissions FSO est la marge du système FSO. De fait, suivant le type d'équipement des opérateurs radio ou de faisceaux hertziens, il est extrêmement important de connaître la marge d'une liaison donnée. Lorsqu'est installée une liaison, des modèles mathématiques permettent d'en calculer la disponibilité sur une année, ou pendant le mois le plus défavorable.

La première étape consiste donc à calculer la marge de la liaison, ce qui permet de connaître la capacité de l'équipement laser qui émettra les données numériques en dépit de la variation des conditions météorologiques.

Pour utiliser un modèle de prédiction, il faut connaître au moins les paramètres de l'équipement suivants (liste non exhaustive):

- puissance émise;
- sensibilité du récepteur;

- surface de détection du récepteur;
- divergence du faisceau émis.

A partir de ces données, il est possible de calculer, entre autres, la valeur de l'affaiblissement géométrique ainsi que la marge de la liaison et, en fin de compte, sa disponibilité.

2.1 Exemples de marge de liaison

Le tableau ci-dessous donne quelques exemples du calcul d'une marge de liaison pour trois équipements types. Les calculs sont faits pour une distance de 500 m, l'affaiblissement moléculaire étant négligé. Il est fondamental de connaître ces marges de liaison, données ici à titre d'exemple, pour comprendre ensuite quel est l'affaiblissement du signal laser dû aux phénomènes climatiques (brouillard, pluie, neige, scintillation, ...).

TABLEAU A1-2

Exemples de marge de liaison pour trois équipements

Puissance d'émission (dBm)	10	13	26
Sensibilité (dBm)	-35	-40	-36
Affaiblissement géométrique (dB) ($D = 500$ m)	26	17	18
Perte dans le système (dB)	1	2	0
Marge de la liaison (dB)	18	34	44

2.2 Disponibilité et qualité de service

Cette section est un exemple concret de détermination de la qualité de service (QoS) d'une liaison donnée en utilisant les caractéristiques de trois équipements FSO.

Dans l'exemple, on prend en ligne de compte les éléments suivants:

- longueur de la liaison: 500 m;
- fabricant: trois fabricants d'origine différente (A, B et C);
- équipement: interface SDH à 155 Mbit/s avec fibre optique;
- modèles: on a utilisé les modèles de France Télécom pour l'affaiblissement par les aérosols (brouillard), qui constitue le facteur le plus handicapant pour une liaison FSOL;
- site: un seul site a été retenu, celui de Rennes (France).

La détermination de la QoS comporte trois étapes; c'est un processus qui peut donc être informatisé, en partie ou en totalité.

2.2.1 Exemple de calcul de la visibilité minimale

On utilise une liaison de 500 m et une interface à 155 Mbit/s. A partir de la marge de liaison linéique, on détermine la valeur de la visibilité minimale en appliquant les modèles d'affaiblissement de France Télécom.

TABLEAU A1-3

Exemple de calcul de la visibilité minimale pour trois équipements différents

	Equipement A	Equipement B	Equipement C
Longueur d'onde (nm)	690	850	1 550
Longueur de la liaison (m)	500	500	500
Puissance d'émission (dBm)	10	13	26
Sensibilité (dBm)	-35	-40	-36
Affaiblissement géométrique (dB)	25,94	17,4	18,59
Affaiblissement moléculaire (dB)	0,05	0,205	0,05
Pertes dans le système (dB)	0	0	0
Marge de la liaison (dB)	19	35	43
Marge linéique (dB/km)	38	71	87
Valeur de la visibilité minimale (m)	470	250	210

2.2.2 Exemple de données statistiques météorologiques

A partir de fichiers météo fournis par Météo France, pour la ville de Rennes, indiquant le pourcentage d'apparition de brouillard par heure, donnée synthétisée sur une longue période de temps, on a réalisé des graphiques représentant le pourcentage cumulé d'apparition de brouillard dans trois fourchettes horaires:

- entre 8 heures et 20 heures;
- entre 20 heures et 8 heures;
- sur toute une journée, de 0 à 24 heures.

Les fichiers météo en question ont les caractéristiques suivantes:

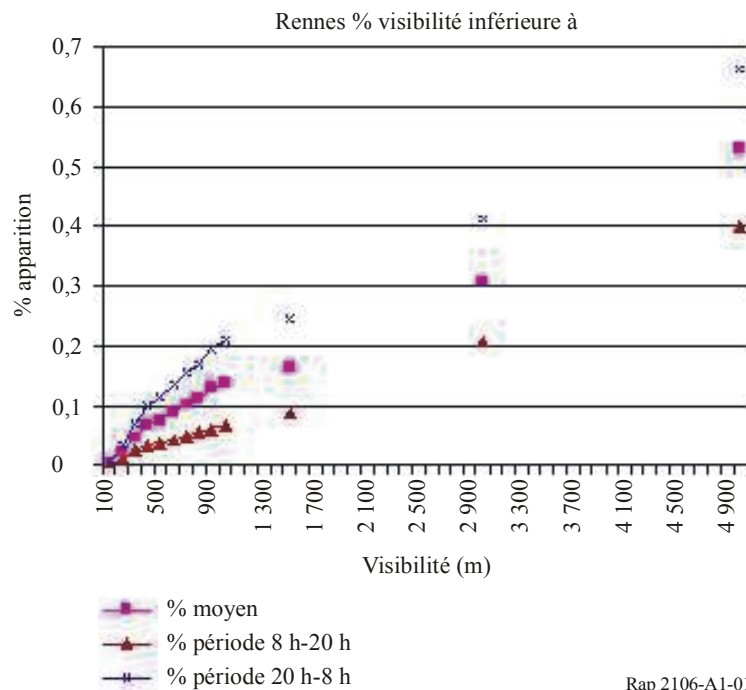
- visibilité par heure;
- de 100 à 5 000 m;
- entre 1 992 et 2 002;
- plus de 73 000 observations;
- pourcentage d'apparence cumulé d'apparition de brouillard;
- trois périodes horaires d'observation.

Sur le graphique, trois courbes ont été tracées, pour lesquelles on a:

- en abscisse: la valeur de la visibilité minimale (m) (c'est-à-dire la densité du brouillard);
- en ordonnée: le pourcentage d'apparition pour les diverses visibilités minimales (%).

FIGURE A1-1

Pourcentage d'apparition de brouillard pour une valeur de visibilité donnée

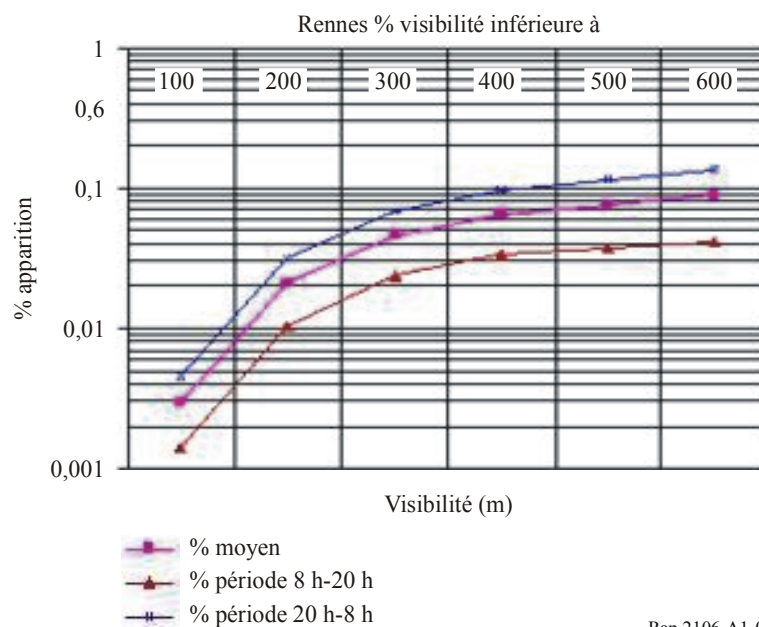


Rap 2106-A1-01

Pour une meilleure lisibilité, l'ordonnée est présentée selon une échelle logarithmique.

FIGURE A1-2

Pourcentage d'apparition de brouillard pour une valeur de visibilité donnée
(échelle logarithmique)



Rap 2106-A1-02

2.2.3 Exemple de calcul de disponibilité de la liaison

Une liaison FSOL n'est plus disponible lorsque la densité du brouillard est supérieure à la marge de la liaison. On cherche en conséquence à savoir pendant quel pourcentage de temps la liaison FSOL n'est pas disponible, en utilisant des graphiques météorologiques. Par extension, on détermine la

disponibilité de la liaison FSOL considérée, exprimée en pourcentage et en nombre d'heures (ou de minutes) par année. Cette détermination de l'indisponibilité de la liaison FSOL se réalise en prenant la valeur de visibilité minimale pour chaque équipement (en abscisse) et en déterminant le pourcentage de l'apparition de brouillard. Une fois cette valeur obtenue, on estime qu'au-delà la liaison FSOL est indisponible.

Les tableaux ci-dessous présentent les pourcentages et valeurs d'indisponibilité pour chaque équipement.

TABLEAU A1-4

Comparaison: visibilité et périodes

% apparition		Equipement A	Equipement B	Equipement C
Valeur de visibilité minimale (m)		342	184	150
Modèle zoom	Journée	0,052	0,015	0,008
	8 h-20 h	0,028	0,007	0,004
	20 h-8 h	0,08	0,022	0,012

Par extension, on détermine la disponibilité de la liaison FSOL considérée, exprimée en pourcentage et en nombre d'heures (ou de minutes) par année. Pour le site à l'étude, voir le Tableau A1-5.

TABLEAU A1-5

**Disponibilité de la liaison sur le site de Rennes
pour trois équipements différents, A, B et C**

Equipement A	% disponibilité	Indisponibilité – Nombre d'heures/année
Année	99,948	4,56
8 h-20 h	99,972	1,23
20 h-8 h	99,920	3,50

8 760 heures = 1 année

Equipement B	% disponibilité	Indisponibilité – Nombre d'heures/année
Année	99,985	1,31
8 h-20 h	99,993	0,31
20 h-8 h	99,978	0,96

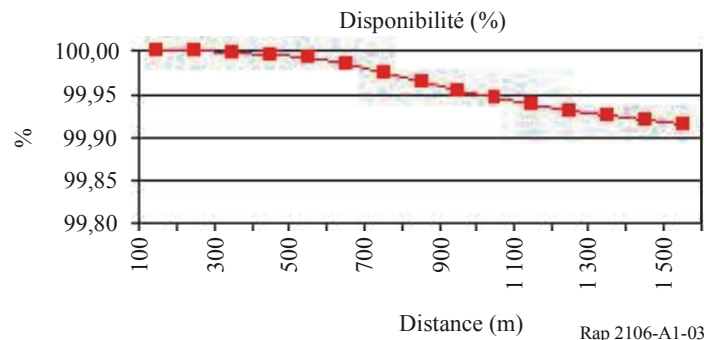
8 760 heures = 1 année

Equipement C	% disponibilité	Indisponibilité – Nombre d'heures/année
Année	99,992	0,70
8 h-20 h	99,996	0,18
20 h-8 h	99,988	0,53

2.2.4 Exemple de disponibilité en fonction de la longueur de la liaison

Une autre technique consiste à présenter la QoS, en fonction de la longueur de la liaison FSOL pour le site à l'examen.

FIGURE A1-3
Disponibilité pour la région de Rennes en fonction de la longueur de la liaison



Cet exemple permet de faire trois observations importantes:

- La QoS de la liaison FSOL est étroitement tributaire des conditions météorologiques locales (par exemple du brouillard), et le traitement des données météorologiques joue un rôle essentiel.
- La gestion de la QoS dépend de la longueur de la liaison (pour des conditions météo identiques) et une modification ou une amélioration de ce paramètre peut dépendre du choix de l'équipement ou du fabricant. Par exemple, il ressort du graphique précédent que si on veut à Rennes une QoS supérieure à 99,95%, il faut que la liaison FSOL ne dépasse pas 900 m.
- Ce processus peut être informatisé tout comme d'autres processus relatifs aux paramètres météorologiques.

Annexe 2

Comparaison entre les Recommandations UIT-R et un logiciel de qualité de service «Prédiction FSO» (expérimentation en France)

1 Introduction

Un opérateur (FSO 04) a réalisé une évaluation des capacités des produits FSO et élaboré un logiciel qui lui est propre, dénommé «Prédiction FSO». Pour cela, il a été envisagé de réaliser une expérimentation pour confronter les capacités des équipements FSO aux données météorologiques, l'étude ayant été effectuée sur un site de France Télécom dans les environs de Toulouse, pendant six mois environ (du 12.01.2004 au 31.05.2005), pendant la saison hivernale, soit dans les pires conditions pour un produit utilisant la technologie FSO pour transmettre des données numériques.

Il y a deux grands objectifs, à savoir:

- Confronter les résultats du logiciel «Prédiction FSO» avec les résultats d'expérimentation sur le terrain, sur une période de temps suffisamment longue, en vue d'en dégager des données statistiques pertinentes.
 - Consacrer une analyse statistique principalement au phénomène le plus défavorable sur une liaison optique, à savoir l'affaiblissement dû au brouillard ou l'affaiblissement atmosphérique.
 - Vérifier la cohérence des résultats avec les autres phénomènes d'affaiblissement, et par rapport aux données de l'expérimentation sur le terrain.
- Confronter les résultats pour la liaison FSO avec les objectifs fixés dans les Recommandations UIT-R ci-dessous, pour une liaison par faisceau hertzien:
 - Recommandation UIT-R F.1703 – Objectifs de disponibilité applicables à des liaisons hertziennes fixes numériques réelles utilisées dans des conduits et des connexions fictifs de référence de 27 500 km.
 - Recommandation UIT-R F.1668 – Objectifs de qualité en matière d'erreur applicables aux liaisons hertziennes fixes numériques réelles utilisées dans des conduits et des connexions fictifs de référence de 27 500 km.

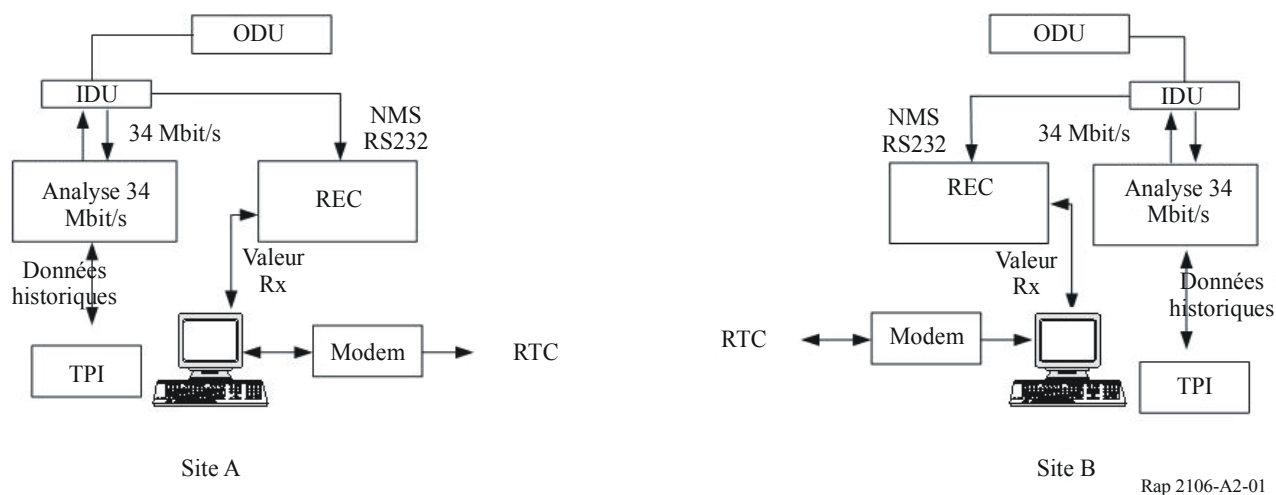
Après une brève présentation des caractéristiques du site d'expérimentation et des équipements FSO, on trouvera une courte introduction au logiciel «Prédiction FSO», logiciel de simulation de la qualité de service d'une liaison optique, mis au point par le Département recherche et développement de France Télécom.

Les résultats logiciels seront ensuite comparés avec les données de la liaison optique et les données météorologiques, pour la période retenue, afin de répondre aux deux objectifs.

2 Expérimentation sur le terrain de la liaison FSOL

2.1 Caractéristiques du site et des équipements

FIGURE A2-1
Caractéristiques de la liaison



Description des équipements sur chaque site:

- Le système FSO (ODU – Unité à l'extérieur, et IDU – Unité à l'intérieur) émet des trames bilatérales PDH à une distance d'environ 270 m (0,2 mile) entre deux bâtiments désignés A et B.
- L'analyseur de l'émission des trames PDH, appelé Victoria, enregistre chaque seconde les éventuelles erreurs ou l'éventuelle indisponibilité, et transmet les résultats à un PC toutes les 15 min via une connexion RS-232. L'analyse est bilatérale. Parmi les données enregistrées, nous choisissons et concaténons:
 - ES: secondes avec erreur (erreur sur les bits);
 - SES: secondes à fort taux d'erreurs;
 - indisponibilité.
- Le logiciel de supervision propriétaire enregistre, chaque minute, le niveau du signal reçu (sensibilité) et transmet en continu les données à un PC.
- Un modem RTC est installé pour intervention, via le logiciel/PC, en cas de problème.
- Les données météorologiques proviennent de la station météorologique française située sur l'aéroport de Blagnac (à moins de 500 m, soit environ 0,4 mile, du centre d'expérimentation de France Télécom). Les données sont transmises, chaque semaine, par courrier électronique, et sont définies en fonction des mesures suivantes:
 - Transmissomètre, donnant la valeur de visibilité (toutes les valeurs – fréquence: chaque minute environ 40 000 valeurs par mois).
 - Pluviomètre, donnant l'intensité des précipitations (valeur maximale – fréquence: toutes les 6 min).
 - Nivomètre, donnant l'intensité de la neige (valeur maximale).
 - Pyranomètre, mesurant l'intensité de la lumière (valeur maximale).

2.2 Conception de la liaison

2.2.1 Données d'ingénierie

La liaison FSOL comporte deux équipements terminaux (chacun avec son unité ODU et son unité IDU) dirigés l'un vers l'autre et fournissant une connexion bilatérale PDH d'environ 270 m. En ce qui concerne la liaison installée, il faut connaître les informations suivantes qui sont essentielles [BOU 06]:

- la marge de la liaison;
- le niveau de réception;
- le diamètre du faisceau ponctuel.

2.2.2 Données expérimentales

Après l'installation, on a mesuré, dans chaque sens, les données relatives à la liaison, qu'on peut récapituler comme suit (voir les Tableaux A2-1 et 2):

TABLEAU A2-1
Sensibilité entre A et B

Sens: de A vers B	Niveau de réception	Théoriquement	–9 dBm
		Réel	–11 dBm⁽¹⁾
	Marge de la liaison	Théoriquement	41 dB
		Réel	39 dB

⁽¹⁾ La différence de 2 dB peut éventuellement être réduite par un meilleur pointage.

Tableau A2-2
Sensibilité entre B et A

Sens: de B vers A	Niveau de réception	Théoriquement	–9 dBm
		Réel	–16 dBm⁽¹⁾
	Marge de la liaison	Théoriquement	41 dB
		Réel	34 dB

⁽¹⁾ La différence de 5 dB entre les deux sens est maintenue volontairement afin d'étudier la sensibilité de la marge par rapport aux critères de disponibilité et de qualité de service.

3 Logiciel de simulation

Le logiciel «Prédiction FSO» dans sa version V3.00 permet:

- Le calcul des valeurs nominales de la liaison optique, pour un quelconque lieu géographique.
- Le calcul du taux de disponibilité de la liaison, pour un quelconque endroit en France (dans cette version).

3.1 Fenêtre de saisie des données

Les données relatives au site et aux équipements FSO sont saisies dans la première fenêtre du logiciel «Prédiction FSO», divisée en six blocs: données sites, données équipements, données communes aux sites, données communes aux équipements, environnement et informations; le calcul est ensuite lancé afin de déterminer divers paramètres de la liaison ainsi que la QoS et la disponibilité en fonction des fichiers météo.

FIGURE A2-2

Fenêtre de saisie des données

The screenshot shows a software window titled "Capture data" with several sections for data entry:

- Site data:**
 - Site 1:** Name (Site A), Latitude (48.8582), Longitude (12.1275), Altitude (147), Site height/ground (10), Site positioning (36).
 - Site 2:** Name (Site B), Latitude (48.8582), Longitude (12.1275), Altitude (147), Site height/ground (4), Site positioning (276).
- Shared site data:**
 - Relative humidity (%): 100
 - Albedo (0..1): 0.1 Grass
 - Distance (m): 271
 - Rugosity (m): 0.0045 Lawn
 - Solar radiation (W/m2): 1000
- Equipment data:**

	Emission	Reception	Emission	Reception
Transmitter filts	2	1	2	1
Power/transmitted (dBm)	3	50	3	50
Diameter (mm)	40	100	40	100
Divergence (mrad)	4	5	4	5
Power (dBm)				
Losses (dB)	0	0	0	0
Central wavelength (nm)		955		955
Bandwidth (nm)		100		100
- Shared equipment data:**
 - Wavelength (nm): 950
 - Data rate (Mbps): 34
 - System Loss (dB): 0
- Environment:**
 - ☒ Urban ☐ Rural ☐ Maritime
 - Information:
 - Link distance (m):
 - Link average height (m):
 - Elevation (deg): Site 1 Site 2
 - Azimuth (deg): Site 1 Site 2

Buttons at the bottom: Start, Close.

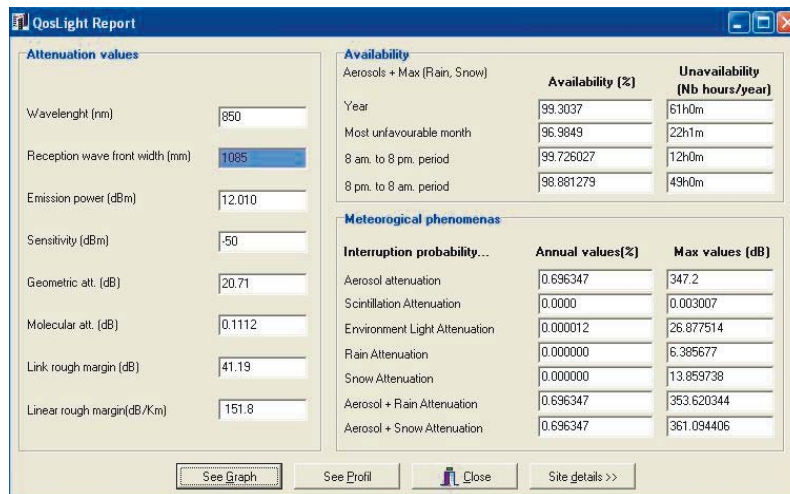
Rap 2106-A2-02

3.2 Fenêtre de rapport

La fenêtre de rapport comporte:

- Le bloc disponibilité
 - Une disponibilité pendant l'année de 99,3037%, correspondant à 61 h d'interruption.
 - Une disponibilité pendant le mois le plus défavorable de 96,9849%, correspondant à 22 h d'interruption, soit 36% du total des interruptions sur l'année.
 - Une disponibilité pendant la journée de 99,7260%, soit 20% du total des interruptions sur un jour.
 - Une disponibilité pendant la nuit de 98,8813%, soit 80% du total des interruptions sur un jour.
- Le bloc phénomènes météorologiques
 - Une influence du brouillard de 0,696347%, soit 99,9982% du total des phénomènes.
 - Une influence de la lumière ambiante de 0,000012%, soit 0,0018% du total des phénomènes.
- Aucune influence des scintillations, de la pluie ou de la neige.

FIGURE A2-3
Fenêtre de rapport



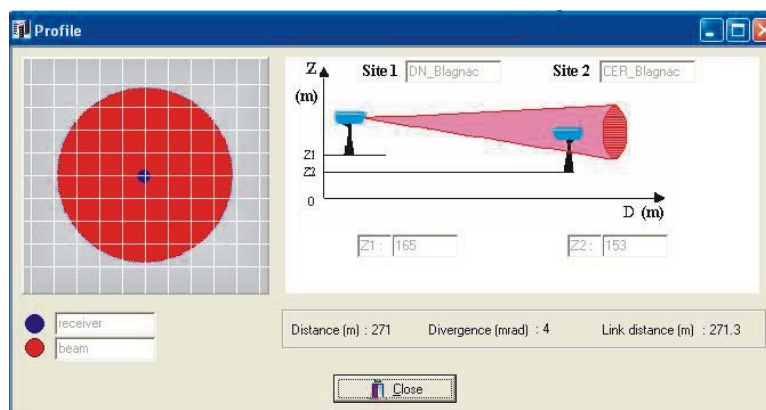
Rap 2106-A2-03

3.3 Fenêtre de profil

Cette fenêtre vaut pour les deux sites et rend compte de la différence entre le faisceau ponctuel au niveau du récepteur et la surface de réception; le ratio correspondant au faisceau ponctuel au niveau du récepteur divisé par la surface de réception est égal à 1 085/100, soit 10,85, valeur qui indique:

- Une proportion importante permettant de réaliser un pointage de la liaison bilatérale, dans de bonnes conditions.
- Une bonne résistance aux phénomènes de vibration ou de dilatation des supports (bâtiments).

FIGURE A2-4
Fenêtre de profil



Rap 2106-A2-04

4 Comparaison des résultats

La présente section est consacrée à une comparaison entre les données de l'expérimentation sur six mois, les critères de disponibilité et de QoS et les valeurs obtenues par le logiciel.

4.1 Comparaison entre les résultats du logiciel «Prédiction FSO» et les données du système FSO et de la station météorologique française

4.1.1 Affaiblissement dû aux aérosols (brouillard)

Trois formules de l'affaiblissement dû aux aérosols ou dû au brouillard sont analysées et comparées, pour vérifier les modèles élaborés par Al Naboulsi *et al.*, puis sont intégrées dans le logiciel «Prédiction FSO».

Ces trois modèles sont:

- le modèle de Kim *et al.*;
- le modèle de brouillard par advection de Al Naboulsi *et al.* en période diurne; et
- le modèle de brouillard par rayonnement de Al Naboulsi *et al.* en période nocturne.

Exemple d'affaiblissement dû au brouillard par rayonnement (voir la formule (3) au § 3.2.2 de la partie principale du document)

$$Aff_{fog,d} = 10 \log_{10}(1/\tau(\lambda, d)) = 10 \log_{10}(1/\exp(-\sigma(\lambda)d)) = 10 \log_{10} \exp(\sigma(\lambda)d) = 10 \frac{\ln(\exp(\sigma(\lambda)d))}{\ln 10}$$

Est équivalent à:

$$Aff_{fog,d} = \frac{10}{\ln 10} \sigma(\lambda) d$$

Ce qui, avec une visibilité de 80 m en présence de brouillard, nous donne: $\sigma(850)d = 49,97$ et $Aff_{fog} = 217$ dB/km.

4.1.1.2 Procédure

On traite les données afin de pouvoir proposer des modèles comparatifs basés sur une coupure de la liaison FSOL; ces données sont choisies lorsque le brouillard (fichier météorologique – données de visibilité) est suffisamment dense pour interrompre la liaison optique.

Par exemple, une visibilité de 100 m en présence de brouillard équivaut à un affaiblissement dû aux aéronaves d'environ 180 dB/km, soit environ 49 dB compte tenu de la longueur de la liaison; cette valeur étant supérieure à la marge de la liaison (marge linéique: 124 dB/km), on a donc, en théorie, une coupure de la connexion.

Cette coupure due au brouillard doit être confirmée, suivant les mêmes typologies de temps (MM:JJ:AA–HH:MM) par les fichiers informatiques de l'analyseur de transmission (valeur d'indisponibilité de la liaison) et les données du logiciel «supervision FSO» (valeurs de sensibilité – $S < -55$ dBm – équivalent coupure pendant les essais en laboratoire).

Seules sont retenues les données pour lesquelles la coupure est due uniquement au brouillard.

4.1.1.3 Résultats

On a retenu plus de 400 valeurs environ, qui répondaient aux caractéristiques mentionnées ci-dessus. Certaines données incohérentes (visibilité importante et connexion opérationnelle) ont été écartées; elles s'expliquent par la distance relative entre le lieu de l'expérimentation FSOL et le site de la station météorologique française (500 m), qui entraîne un léger décalage temporel dans les enregistrements lorsque le brouillard se déplace perpendiculairement aux deux sites; lorsqu'il se déplace parallèlement, on enregistre des résultats aberrants.

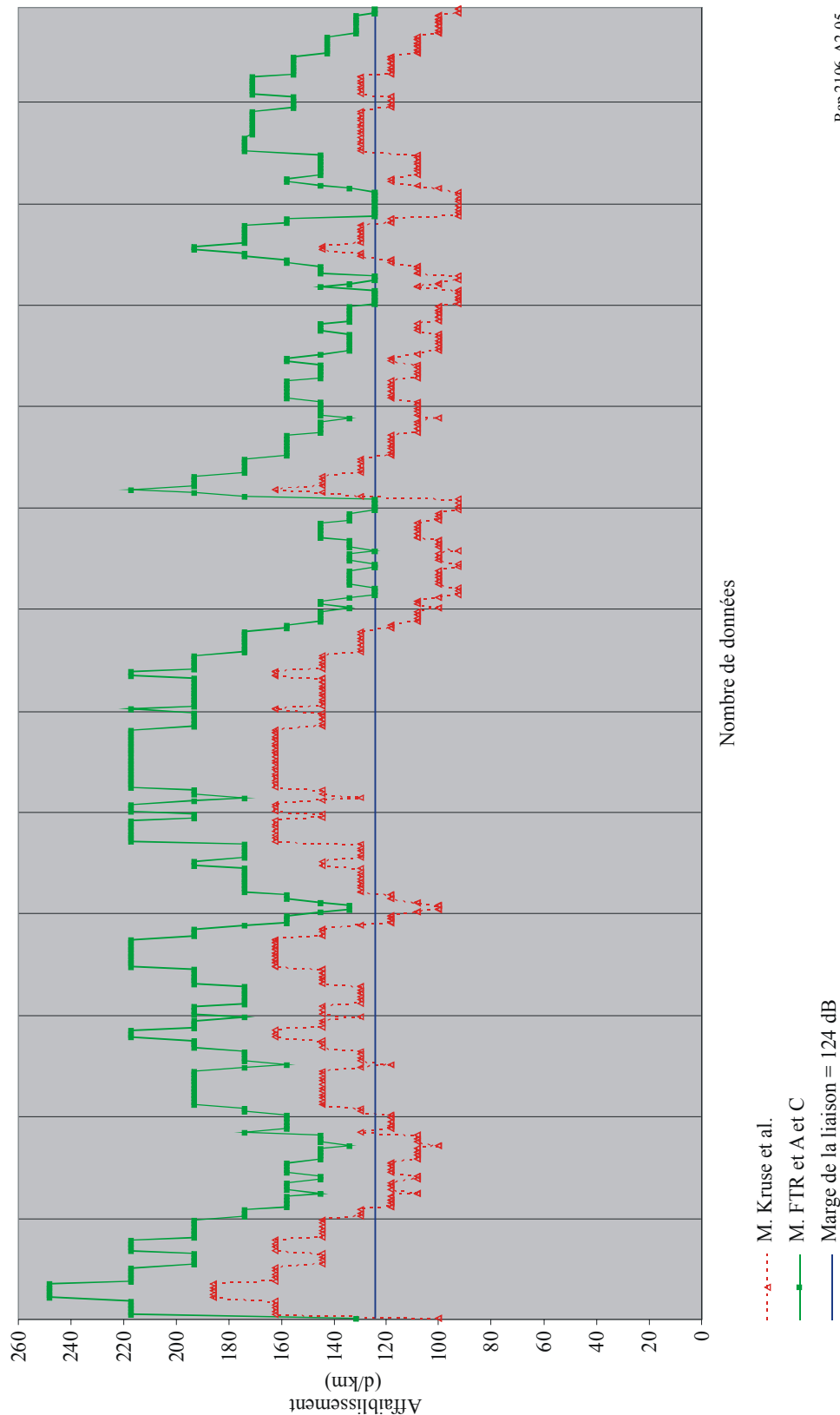
Les résultats sont présentés dans le graphique ci-dessous, dont on remarquera:

- la marge linéique de la liaison optique qui est de 124 dB/km (ligne droite bleue);
- la formule d'affaiblissement dû au brouillage de Kim *et al.* (courbe rouge en tireté);
- les formules d'affaiblissement dû au brouillard de Al Naboulsi, associées heure par heure à l'événement pour le choix de l'un des deux modèles (courbe verte).

Toutes les valeurs présentées ont été retenues en raison d'une très faible visibilité, qui suppose une valeur élevée d'affaiblissement dû au brouillard, et donc une coupure inévitable de la liaison optique.

Il apparaît que, pour une configuration de coupure de la liaison, les formules d'affaiblissement dû au brouillard de Al Naboulsi sont en parfaite cohérence avec la marge de la liaison (100%), tandis que celle de Kim *et al.* n'est pas cohérente dans près de 50% des cas. Les formules de Al Naboulsi semblent donc correspondre davantage à la réalité.

FIGURE A2-5
Affaiblissement dû au brouillard, comparaison



4.1.2 Autres affaiblissements

4.1.2.1 Affaiblissement dû à la pluie

L'affaiblissement dû à la pluie est fonction de l'intensité des précipitations R (mm/h), selon la relation suivante (A-2):

$$Att_{rain} = 1,076 * R^{0,67} \quad \text{dB/km} \quad (\text{A-2})$$

où:

R : intensité des précipitations (mm/h).

Le logiciel «Prédiction FSO» donne une valeur d'indisponibilité de zéro pour l'affaiblissement dû à la pluie. La station météorologique française indique que la valeur maximale de la pluie, pendant la période considérée, était de $R = 1,6$ mm sur une période de 6 minutes, en date du 13 mai 2005, ce qui correspond, selon une projection pessimiste, à 16 mm/h.

Affaiblissement dû à la pluie: $R = 16$ mm/h, $Att_{rain} = 1,076 \times (16)^{0,67} = 6,89$; $Att_{rain} = 7$ dB/km

Affaiblissement de la liaison dû à la pluie: $Att_{rain-link} = (271 \times 7)/1000 = 1,89$ dB; $Att_{rain-link} = 2$ dB.

Cette valeur est inférieure à la marge de la liaison. En conséquence, le phénomène ne parvient pas à perturber la liaison optique. Les résultats du logiciel «Prédiction FSO» sont en accord avec les données météorologiques de la période considérée.

4.1.2.2 Affaiblissement dû à la neige

L'affaiblissement dû à la neige est fonction de la longueur d'onde (λ_{nm}) et de l'intensité des précipitations S (mm/h) selon les relations suivantes (formule pour la neige humide, site à une altitude inférieure à 500 m) (A-3):

$$Att_{snow} = (0,0000542 * \lambda_{nm} + 5,4958776) * S^{1,38} \quad \text{dB/km} \quad (\text{A-3})$$

Le logiciel «Prédiction FSO» donne une valeur d'indisponibilité de zéro pour l'affaiblissement dû à la neige. La station météorologique française indique que les mesures effectuées à la station pour la neige ont été réalisées de deux façons:

- niveau d'eau équivalent à de la neige (correspond à la quantité des précipitations);
- neige au niveau du sol.

Pendant la période considérée, le niveau de neige, relevé à la station météorologique de Toulouse-Blagnac, n'était pas suffisamment important pour constituer une valeur mesurable. On a donc une valeur de zéro pour le phénomène météorologique de la neige.

Aussi $Att_{snow} = 0$ dB.

Cette valeur est, à l'évidence, inférieure à la marge de la liaison; en conséquence, le phénomène ne parvient pas à perturber la liaison optique. Les résultats du logiciel «Prédiction FSO» correspondent aux données météorologiques de la période considérée.

4.1.2.3 Affaiblissement par la lumière ambiante

Une conjonction solaire se produit lorsque le Soleil se situe dans le champ de vision (FOV) d'un récepteur optique. Le logiciel «Prédiction FSO» calcule, chaque minute de l'année, la probabilité pour les rayons du Soleil d'être parallèles à la liaison optique, et pour la puissance solaire pénétrant à l'intérieur du récepteur d'être supérieure à la puissance reçue de l'émetteur.

Le logiciel «Prédiction FSO» calcule l'affaiblissement par la lumière ambiante selon la formule suivante (Stefan Law-9):

$$Femis = \int_{\lambda=0}^{\lambda=+\infty} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{k\lambda T}\right) - 1} d\lambda = \sigma T^4 \quad (A-4)$$

où:

$$\begin{aligned} \lambda: & \text{longueur d'onde (m)} \\ C: & \text{vitesse de la lumière } (3 \times 10^8 \text{ m/s}) \\ T: & \text{température (K)} \\ K = & 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K} \\ \sigma = & 5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4} \\ H = & 6,62 \times 10^{-34} \text{ J/s.} \end{aligned}$$

Dans la fenêtre spectrale du produit FSO (filtre à une longueur d'onde comprise entre 720 et 950 nm), on a donc:

$$Femis = \int_{\lambda=720\text{nm}}^{\lambda=950\text{nm}} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{k\lambda T}\right) - 1} d\lambda = 11,5 \text{ MW/m}^2$$

Le niveau de la lumière ambiante reçue par le récepteur est déterminé à partir du FOV, avec une valeur de 5 mrd et un diamètre de 100 mm (A-5).

où:

- diamètre du Soleil: 1,4 million km
- distance Terre-Soleil: 150 millions km

$$\theta = \arctan g \left(\frac{\text{DiamètreSoleil}/2}{\text{Distance TerreSoleil}} \right) \quad (A-5)$$

$$\theta = \arctan g \left(\frac{1,4/2}{150} \right) = 0,004333 \text{ rad}$$

$\theta = 4,3$ mrd (inférieur à 5 mrd), ce qui indique que, dans une certaine configuration de position, le produit FSO reçoit toute l'intensité lumineuse provenant du Soleil.

La station météorologique française indique que l'intensité maximale du Soleil, pendant la période considérée, était de $S = 3\,500 \text{ J/cm}^2$, soit approximativement égale à $1\,000 \text{ W/m}^2$.

$$C_n^2 = F_1(\text{rugosité}) * F_2(\text{rayonnement solaire}) * F_3(\text{humidité}) * (1 + A)$$

* Ratio des pertes solaires (espace + atmosphère)

$$\frac{\text{FluxLumièreTotal}}{\text{FluxLumièreTotalTerre}} = \frac{\text{FluxLumièreFiltré}}{\text{FluxReçuFiltré}} \quad (A-6)$$

$$\frac{64 \times 10^6 \text{ Wm}^{-2}}{1\,000 \text{ Wm}^{-2}} = \frac{11,5 \times 10^6 \text{ Wm}^{-2}}{\text{FluxReçuFiltré}}$$

Ainsi: flux reçu filtré = 180 W/m^2

On considère que le flux entrant est complètement focalisé sur la diode de réception, c'est-à-dire:

$$\text{PuissanceReçue} = \text{FluxReçuFiltré} * \text{SurfaceRéception}, \text{ PuissanceReçue} = 180 * \left(\frac{\pi}{4} * 0,1^2 \right).$$

En conséquence, la puissance reçue est égale à 1,4 W, soit 31,5 dBm.

Cette valeur doit être comparée avec le niveau reçu par le récepteur FSO (−11 dBm ou −16 dBm). Le logiciel «Prédiction FSO» indique une valeur d'indisponibilité de 0,000012% pour un affaiblissement dû à la lumière ambiante. Cette valeur de la puissance solaire est, dans certaines configurations de la position du Soleil, supérieure à la valeur reçue; en conséquence, le phénomène influence et perturbe la liaison optique lorsque le Soleil est dans le champ de vision du récepteur FSO. Le résultat de la simulation réalisée par le logiciel «Prédiction FSO» correspond aux données météorologiques de la période considérée.

4.1.2.4 Effets de scintillation

Le logiciel «Prédiction FSO» calcule les effets de scintillation.

La station météorologique française indique un rayonnement solaire maximum de 3 500 J/cm² (soit approximativement 1 000 W/m²) et une hydrométrie maximale de 100%.

Effets de scintillation: $F1 = 8,99 \times 10^{-14}$; $R = 1\,000\text{ W/m}^2$; $F2 = 26,6$; $H = 100$; $F3 = 0,19$; donc $C_n^2 = 4,5 \times 10^{-13}$

$$L = 270\text{ m}; \lambda = 850\text{ nm}; K = 7,4 \times 10^6; \sigma X^2 = 1,23 \times (7,4 \times 10^6)^{7/6} \times 4,5 \times 10^{-13} \times (270)^{11/6} = 1,65$$

$$Aff_{\text{Scintillation-Link}} = 2,57\text{ dB}.$$

Cette valeur est inférieure à la marge de liaison; en conséquence, le phénomène ne parvient pas à perturber la liaison optique. Les résultats du logiciel «Prédiction FSO» correspondent aux données météorologiques de la période considérée.

4.2 Comparaison de la QoS et disponibilité du système FSO par rapport aux Recommandations UIT-R

4.2.1 Comparaison de la QoS du système FSO par rapport à la Recommandation UIT-R F.1668

La Recommandation UIT-R F.1668 fixe des objectifs de qualité en matière d'erreur pour les liaisons hertziennes fixes numériques réelles, applicables aux faisceaux hertziens fixes numériques point à point. En l'absence de Recommandation spécifique relative aux systèmes FSO, c'est cette Recommandation qui a été utilisée. Les objectifs de la Recommandation pour un réseau d'accès à 34 Mbit/s sont présentés dans le Tableau A2-3.

TABLEAU A2-3
Objectifs de qualité en matière d'erreur

	Mensuel	Annuel
Nombre de ES	< 389	< 4668
Nombre de SES	< 14 580	< 174 960

Les résultats de QoS de la liaison FSOL, dans les deux sens et pendant la période considérée, sont récapitulés au Tableau A2-4.

Il ressort de ces résultats ainsi que des critères applicables aux liaisons par faisceaux hertziens que la liaison FSOL n'est pas conforme aux critères de QoS établis dans la Recommandation UIT-R F.1668.

TABLEAU A2-4

QoS

Mois	Sens: de A vers B				Sens: de B vers A				Résultats
	Nombre ES	Niveau	Nombre SES	Niveau	Nombre ES	Niveau	Nombre SES	Niveau	
Décembre 04	17	OK	16	OK	120	OK	120	OK	100%
Janvier 05	104	OK	45	OK	619	OK	619	Non	75%
Février 05	1 048	OK	1 048	Non	134	OK	134	OK	75%
Mars 05	157	OK	154	OK	88	OK	88	OK	100%
Avril 05	1 688	OK	1 688	Non	329	OK	329	OK	75%
Mai 05	272	OK	264	OK	149	OK	149	OK	100%

4.2.2 Comparaison de la disponibilité du système FSO par rapport à la Recommandation UIT-R F.1703

La Recommandation UIT-R F.1703 fixe des objectifs de disponibilité pour les liaisons hertziennes fixes numériques réelles appartenant au réseau d'accès, applicables aux faisceaux hertziens fixes numériques point à point. En l'absence de Recommandation spécifique relative aux systèmes FSO, il est proposé d'utiliser cette Recommandation-ci. Les objectifs qui y sont fixés pour un réseau d'accès à 34 Mbit/s sont récapitulés au Tableau A2-5.

TABLEAU A2-5

Objectifs de disponibilité

	Mois le plus défavorable	Annuel
Disponibilité	> 99,4 ¹⁾ (soit une indisponibilité de 3 154 minutes, ou 189 240 s)	> 99,99 (indisponibilité de 53 minutes, ou 3 180 s)

¹⁾ Basé sur une disponibilité de 100% les 11 autres mois.

Les résultats de disponibilité de la liaison FSOL, dans les deux sens et pendant la période considérée, sont présentés dans le Tableau A2-6.

TABLEAU A2-6

Disponibilité

	Sens: de A vers B		Sens: de B vers A		Résultats
Mois	Secondes	Niveau	Secondes	Niveau	
Décembre 04	0	OK	0	OK	100%
Janvier 05	1 601	OK	38 839	Non	50%
Février 05	232	OK	0	OK	100%
Mars 05	13	OK	0	OK	100%
Avril 05	818	OK	0	OK	100%
Mai 05	0	OK	0	OK	100%

Il ressort de ces résultats ainsi que des critères applicables aux liaisons par faisceaux hertziens, que la liaison FSOL n'est pas conforme aux critères de disponibilité fixés dans la Recommandation UIT-R F.1703.

4.3 Comparaison de la disponibilité de la liaison FSOL par rapport au logiciel «Prédiction FSO»

Les résultats de la simulation réalisée par le logiciel «Prédiction FSO» sont comparés avec les valeurs de disponibilité de la liaison FSOL enregistrées sur six mois. Ils sont présentés dans le Tableau A2-7 ci-dessous.

TABLEAU A2-7

Prédiction FSO

	Mois le plus défavorable	Annuel	Résultats
Prédiction FSO	96,9849%	99,3037%	Correct
Liaison FSO	98,5016% ¹⁾	99,8768% ²⁾	Correct

¹⁾ Projection annuelle.

²⁾ Sur la base de l'indisponibilité la plus élevée.

Bien qu'ils soient un peu plus pessimistes, les résultats obtenus avec le logiciel «Prédiction FSO» correspondent aux valeurs de disponibilité de la liaison FSOL, pendant la période considérée, avec une différence inférieure à 0,58% sur une année et à 1,56% au cours du mois le plus défavorable.

Remarques et commentaires

- Il convient de noter que la différence de marge (5 dB) entre les deux sens de la liaison optique est parfaitement visible dans les résultats de disponibilité.
- De la fumée sortant d'une cheminée située sur le toit du bâtiment A, et provenant de cuisines, a parfois fait écran à la liaison optique, mais la gêne causée est apparue dans des configurations très précises (température, direction du vent, vitesse du vent, ...) et n'a pas été quantifiée.

- Le lever et le coucher du Soleil ont aussi eu des répercussions sur la liaison optique et le logiciel «Prédiction FSO» en fait mention, mais la gêne causée pourrait être plus fréquente.
- Les personnes situées autour du site d'expérimentation ont confirmé les valeurs de visibilité à caractère exceptionnel (brouillard) pendant la période d'essai (important phénomène de brouillard en 2005, pas vécu au moins depuis 1995). Il est donc recommandé d'actualiser, régulièrement, les données météorologiques du logiciel «Prédiction FSO».

5 Conclusion

L'expérimentation avec la liaison optique a permis d'atteindre les deux objectifs qui étaient:

- d'en confronter les résultats avec les résultats du logiciel «Prédiction FSO»:
 - L'analyse statistique de la coupure de la liaison optique par le brouillard a permis de constater une meilleure précision des modèles intégrés dans le logiciel.
 - La synthèse des données d'essai pour les autres phénomènes d'affaiblissement est cohérente avec les résultats obtenus avec le logiciel.
 - Les résultats de disponibilité obtenus avec le logiciel correspondent, bien qu'étant légèrement plus pessimistes, à la réalité de la liaison FSOL.
- de confronter les résultats pour la liaison FSOL avec les objectifs fixés dans les Recommandations UIT-R, sur la base de critères relatifs à des liaisons hertziennes:
 - Les résultats pour la liaison optique ne sont pas conformes aux objectifs de disponibilité de la Recommandation UIT-R F.1703 pour des liaisons hertziennes fixes numériques réelles utilisées dans des conduits et des connexions fictifs de référence de 27 500 km.
 - Les résultats pour la liaison optique ne sont pas conformes aux objectifs de qualité en matière d'erreur fixés dans la Recommandation UIT-R F.1668 pour des liaisons hertziennes fixes numériques réelles utilisées dans des conduits et des connexions fictifs de référence de 27 500 km.

Références

- [BOU 06] Olivier BOUCHET *et al.* [2006] *Free-space Optics: Propagation and Communication*. ISTE Publishing Company. ISBN: 1905209029.
- [FSO 04] <http://www.francetelecom.com/en/>.
-