

## TABLE DES MATIERES

<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	1
<b>CHAPITRE 1 ELEMENTS INTRODUCTIFS A L'ETUDE DU FONCTIONNEMENT DES LIAISONS OPTIQUES SANS FIL</b> .....	4
<b>1.1 Introduction</b> .....	4
<b>1.2 Définition et principe de fonctionnement de la technologie FSO</b> .....	5
<b>1.3 Caractéristiques des liaisons optiques atmosphériques</b> .....	7
<b>1.4 Domaines d'application de la technologie FSO</b> .....	8
<b>1.5 Position de la technologie FSO dans le monde des télécommunications</b> .....	9
<i>1.5.1 La boucle locale optique</i> .....	9
<i>1.5.2 Les challenges des systèmes FSO</i> .....	10
<i>1.5.3 Comparaison de la technologie FSO par rapport à la fibre optique</i> .....	11
<i>1.5.4 Comparaison de la technologie FSO par rapport à la technologie radio</i> .....	14
<b>1.6 L'émission et la réception optique dans les systèmes FSO</b> .....	15
<i>1.6.1 L'émetteur FSO</i> .....	16
1.6.1.1. Les diodes DEL .....	18
1.6.1.2. Les diodes LASER.....	18
1.6.1.3. Les critères de sélection des diodes LASER dans les systèmes FSO .....	18
<i>1.6.2 Le récepteur FSO</i> .....	19
1.6.2.1. Les Photodétecteurs .....	20
1.6.2.2. Les critères de sélection des photodétecteurs dans les systèmes FSO .....	20
1.6.2.3. Techniques de photodétection .....	20
<i>a. La détection directe</i> .....	21
<i>b. La détection cohérente</i> .....	21
<i>1.6.3 Caractéristiques des équipements FSO</i> .....	22
1.6.3.1. La portée.....	22
1.6.3.2. La sécurité.....	22
<b>1.7 Conclusion</b> .....	23

<b>CHAPITRE 2 MODELES MATHEMATIQUES DE LA PROPAGATION DU RAYONNEMENT LASER DANS L'ATMOSPHERE .....</b>	<b>25</b>
<b>2.1 Introduction .....</b>	<b>25</b>
<b>2.2 Composition et structure générale de l'atmosphère terrestre .....</b>	<b>26</b>
<b>2.2.1 Composition gazeuse .....</b>	<b>26</b>
2.2.1.1. Les constituants à proportion volumique fixe .....	26
2.2.1.2. Les constituants à proportion volumique variable .....	27
<b>2.2.2 Les particules en suspension (aérosols atmosphériques).....</b>	<b>27</b>
2.2.2.1. Les effets des aérosols sur la propagation du rayonnement optique dans l'atmosphère .....	27
2.2.2.2. Sources et mécanismes de formation des aérosols.....	28
<b>2.3 Transmission en espace libre .....</b>	<b>29</b>
<b>2.3.1 Absorption atmosphérique .....</b>	<b>30</b>
2.3.1.1. Absorption moléculaire .....	31
2.3.1.2. Absorption aérosolaire .....	33
<b>2.3.2 Diffusion atmosphérique.....</b>	<b>34</b>
2.3.2.1. Diffusion moléculaire ou diffusion de Rayleigh.....	35
2.3.2.2. Diffusion de Mie.....	35
<b>2.3.3 Extinction atmosphérique .....</b>	<b>37</b>
<b>2.3.4 La turbulence .....</b>	<b>38</b>
<b>2.4 Conclusion .....</b>	<b>38</b>
<b>CHAPITRE 3 ETUDE DE PERFORMANCE DES TECHNIQUES DE MODULATION UTILISEES PAR LES SYSTEMES FSO SOUS DIFFERENTES INTENSITES DE BROUILLARD .....</b>	<b>40</b>
<b>3.1 Introduction .....</b>	<b>40</b>
<b>3.2 La modulation OOK.....</b>	<b>41</b>
<b>3.3 La modulation PPM .....</b>	<b>42</b>
<b>3.4 La modulation MPPM.....</b>	<b>44</b>
<b>3.5 Résultats et discussion .....</b>	<b>49</b>
<b>3.5.1 Le débit de PPM et de MPPM .....</b>	<b>49</b>

3.5.2 L'exigence en puissance et l'efficacité spectrale de PPM et de MPPM.....	50
3.6 Les modulations OOK, PPM et MPPM sous un brouillard contrôlé.....	52
3.6.1 Mise en place de l'expérience .....	53
3.6.2 Effet du brouillard sur la liaison FSO .....	55
3.6.3 Résultats et discussion .....	57
3.7 Conclusion .....	62
<b>CHAPITRE 4 NOUVELLES TECHNIQUES DE MODULATION POUR LES FUTURS SYSTEMES FSO.....</b>	<b>64</b>
4.1 Introduction.....	64
4.2 La modulation hybride PAM-MPPM .....	64
4.2.1 La modulation PAM .....	65
4.2.2 La modulation PAM-MPPM conventionnelle .....	66
4.2.2.1. Le Débit de MPAPM .....	67
4.2.2.2. Exigence en puissance et efficacité spectrale de MPAPM.....	68
4.2.3 Harmonic MPPM (H-MPPM) .....	71
4.2.3.1. Simplification de l'opération de démodulation au niveau du récepteur .....	72
4.2.3.2. Mise en place de l'opération de synchronisation .....	72
4.2.3.3. Nombre de symboles possible avec H-MPPM .....	73
4.2.3.4. Le Débit de H-MPPM.....	73
4.2.3.5. Exigence en puissance et efficacité spectrale de H-MPPM.....	74
4.2.4 Anisochronous H-MPPM (AH-MPPM) .....	76
4.2.4.1. Le débit de AH-MPPM .....	77
4.2.4.2. Exigence en puissance et efficacité spectrale de AH-MPPM.....	78
4.3 Conclusion .....	80
<b>CHAPITRE 5 SIMULATION DE LA DISPONIBILITE ET DE LA QUALITE DE SERVICE D'UNE LIAISON FSO .....</b>	<b>81</b>
5.1 Introduction.....	81
5.2 La marge brute d'une liaison FSO .....	81

<b>5.2.1 Affaiblissement moléculaire</b> .....	84
<b>5.2.2 Affaiblissement géométrique</b> .....	85
<b>5.2.3 Les Pertes du système</b> .....	86
<b>5.3 Les effets atmosphériques</b> .....	86
<b>5.3.1 Atténuation par le brouillard</b> .....	87
<b>5.3.2 Atténuation par la pluie</b> .....	89
<b>5.3.3 Les effets de scintillations</b> .....	90
<b>5.3.4 Interférence solaire</b> .....	92
5.3.4.1. Trajectoire du soleil .....	92
5.3.4.2. Énergie solaire au niveau du récepteur .....	93
<b>5.4 Installation des unités FSO derrière les fenêtres</b> .....	94
<b>5.5 La disponibilité de la liaison FSO</b> .....	95
<b>5.6 Simulation et applications</b> .....	96
<b>5.6.1 Présentation générale de l'outil FSO Prediction</b> .....	97
5.6.1.1. Les entrées / sorties .....	97
a. Principe : Gestion par fichiers .....	97
b. Fichiers données Météo : entrée FSO Prediction .....	98
c. Fichier paramètre .pqz (Entrée saisie) .....	98
d. Description des données site .....	98
e. Description des données équipements .....	99
f. Fichiers d'entrées nécessaires au traitement de la pluie et du brouillard .....	100
g. Fichier résultat (sortie).....	101
5.6.1.2. Présentation de l'IHM de FSO Prediction .....	101
a. Fenêtre principale .....	101
b. Fenêtre "Données Saisies" .....	103
c. Fenêtre "Rapport FSO" .....	104
d. Fenêtre "Profil" .....	105
e. Fenêtre "Résultats graphiques" .....	107

5.6.1.3. Applications.....	108
<i>a. Evaluation de la liaison entre la Tour Orange Ankorondrano et l’Immeuble Fitaratra Ankorondrano.....</i>	<i>108</i>
<i>b. Evaluation de la liaison entre la Tour Orange Ankorondrano et la Tour Zital Ankorondrano.....</i>	<i>110</i>
<i>c. Evaluation de la liaison entre la Tour Zital Ankorondrano et l’Immeuble Fitaratra Ankorondrano .....</i>	<i>112</i>
<i>d. Evaluation de la liaison entre le Rova Manjakamiadana et la Tour Orange Ankorondrano .....</i>	<i>114</i>
<i>e. Evaluation de la liaison entre le Rova Manjakamiadana et l’Hotel Carlton Anosy .....</i>	<i>116</i>
<b>5.7 Conclusion .....</b>	<b>118</b>
<b>CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES .....</b>	<b>119</b>
<b>ANNEXE 1 CODES SOURCES MATLAB .....</b>	<b>121</b>
<b>ANNEXE 2 QUELQUES DONNEES METEOROLOGIQUES DE LA PROVINCE D’ANTANANARIVO .....</b>	<b>127</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>131</b>

## NOTATIONS

### 1. Minuscules latines

$b$	Longueur d'une séquence de bits de données
$d$	Distance de Hamming
$e_i$	Niveau d'énergie initial
$e_f$	Niveau d'énergie final
$h$	Constante de Planck
$i$	Angle d'incidence
$l$	Distance du lien
$l_{bande}$	Largeur de bande récepteur
$l_i$	Largeur des impulsions
$m$	Paramètre correspondant aux valeurs possibles du nombre de symboles
$ph$	Valeur moyenne du nombre de photons que contient l'impulsion optique
$q$	Paramètre lié à la distribution de la taille des gouttelettes
$r$	Rayon de la particule
$t$	Temps
$\nu_o$	Fréquence de l'onde incidente
$\nu$	Visibilité
$w$	Nombre d'impulsions par symbole
$x$	Position
$z$	Longueur de propagation

## 2. Majuscules latines

$A_i$	Amplitude des impulsions
$A(M, w)$	Code-book ou ensemble des symboles créés par la combinaison de $M$ et $w$
$Ar$	Argon
$Aff_{geo}$	Affaiblissement géométrique de la liaison
$Aff_{mol}$	Affaiblissement moléculaire de la liaison
$A_z$	Azimet
$B$	Bande passante
$CO_2$	Dioxyde de carbone
$Cn^2$	Indice de réfraction
$D$	Débit
$Dc$	Duty cycle
$E_l$	Angle d'élévation
$F_{solaire}$	Flux solaire
$H_2$	Dihydrogène
$H_2O$	Vapeur d'eau
$I$	Intensité du rayonnement lumineux
$I_a$	Intensité de la lumière absorbée

$I_o$	Rayon incident
$I_{MPPM}$	Nombre de bits transmis par MPPM
$I_{PPM}$	Nombre de bits transmis par PPM
$I_s$	Intensité de sortie
$L$	Nombre de symboles possibles
$L_{AH-MPPM}$	Nombre de symboles possibles dans AH-MPPM
$L_{H-MPPM}$	Nombre de symboles possibles dans H-MPPM
$L_{MPAPM}$	Nombre de symboles possibles dans MPAPM
$L_{MPPM}$	Nombre de symboles possibles dans MPPM
$M$	Nombre de slots dans un symbole MPPM
$M'$	Nombre de slots dans un symbole PPM
$M_B$	Marge brute de la liaison
$M_{BLin}$	Marge brute linéique
$N_2$	Azote
$O_2$	Dioxygène
$O_3$	Ozone
$P_e$	Puissance d'émission
$P_{détectée}$	Puissance détectée
$P_i$	Impulsions de synchronisation

$P_{AH-MPPM}$	Puissance moyenne AH-MPPM
$P_{DPIM}$	Puissance moyenne DPIM
$P_{H-MPPM}$	Puissance moyenne H-MPPM
$P_{MPAPM}$	Puissance moyenne MPAPM
$P_{MPPM}$	Puissance moyenne MPPM
$P_{PAM}$	Puissance moyenne PAM
$P_{PPM}$	Puissance moyenne PPM
$P_{OOK}$	Puissance moyenne OOK
$P_{rayonné}$	Puissance rayonné
$P_{sys}$	Pertes système
$Q$	Facteur de qualité
$R$	Rapport du débit d'information de n'importe quel schéma de modulation à celui de PPM ou débit normalisé
$S_{capture}$	Surface de capture du niveau de récepteur
$S_l$	Surface du spot de l'onde à une distance $l$
$S_r$	Sensibilité du récepteur
$T$	Durée d'un symbole
$T_b$	Durée du bit
$T_{mean}$	Durée moyenne de synchronisation

$T_s$	Durée du slot
$T_{th}$	Seuil visuel
$V$	Visibilité météorologique
$X$	Epaisseur du milieu traversé par la lumière

### 3. Minuscules grecques

$\alpha$	Coefficient d'absorption
$\alpha_{lin}$	Atténuation linéique
$\alpha_{scin}$	Atténuation dû à la scintillation
$\beta$	Coefficient de diffusion
$\beta_m$	Coefficient de diffusion moléculaire
$\beta_\lambda$	Coefficient de diffusion en présence du brouillard
$\phi$	Coefficient d'absorption de la vitre
$\gamma$	Coefficient d'extinction
$\gamma_{adv}$	Coefficient d'atténuation de brouillard
$\gamma_{conv}$	Coefficient d'atténuation d'advection rayonnement
$\eta$	Efficacité spectrale
$\eta_{PPM}$	Efficacité spectrale de la modulation PPM
$\lambda$	Longueur d'onde du faisceau lumineux
$\nu$	Visibilité

$\theta$	Divergence du faisceau
$\tau$	Transmission spectrale
$\xi$	Efficacité de transmission
$\xi_{PPM}$	Efficacité de transmission de la modulation PPM

#### 4. Majuscules grecques

$\Gamma$	Coefficient de réflexion de la vitre
$\Phi$	Coefficient d'absorption de la vitre

#### 5. Abréviations

AH-MPPM	Anisochronous Harmonic Multi-Pulse Position Modulation
APD	Avalanche Photo Diode
ARTEC	Autorité de Régulation des Technologies de Communication de Madagascar
AWG	Arbitrary Waveform Generator
BL	Boucle Locale
BLR	Boucle Locale Radio
CEPMMT	Centre Européen des Prévisions Météorologiques à Moyen terme
CPL	Courant Porteur En Ligne
DAWPIM	Dual Amplitude-Width Pulse Interval Modulation
DEL	Diode Électro Luminescente
DPIM	Digital Pulse Intervalle Modulation
DSL	Digital Subscriber Line
FSO	Free Space Optic

FSO-RF	Free Space Optic – Radio Frequency
FTTx	Fiber To The x
GSM	Global System for Mobile Communications
HF	High Frequency
H-MPPM	Harmonic Multi-Pulse Position Modulation
IHM	Interface Homme Machine
IM	Intensity Modulation
IM/DD	Intensity Modulation/Direct Detection
IOWC	Indoor Optical Wireless Communications
IR	Infra - Red
ISG	Inter Symbol Gap
LAN	Local Area Network
LED	Light Emitting Diode
LMDS	Local Multipoint Distribution Service
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LOS	Line Of Sight
MATLAB	MATrix LABoratory
MDI	Multiple Display Interface
MPAPM	Multiple Pulse Amplitude and Position Modulation
MPPM	Multi-Pulse Position Modulation
NRZ OOK	Non-Retour à Zéro OOK
OL	Oscillateur Local

OMERT	Office Malagasy d'Etudes et de Régulation des Télécommunications
OOK	On Off Keying
OWC	Optical Wireless Communications
PAM	Pulse Amplitude Modulation
PC	Personal Computer
PIN	Positive Intrinsic Negative
PPM	Pulse Position Modulation
PRBS	Pseudo Random Bit Sequence
RF	Radio Frequency
RZ OOK	Retour à Zéro OOK
USB	Universal Serial Bus
VCSEL	Vertical Cavity Surface Emitting Laser
WIFI	Wireless Fidelity
WLL	Wireless Local Loop

## **6. Notations spéciales**

Gbps	Gigabit par seconde (Unité de débit)
Ar	Ariary (Unité monétaire malagasy)

## INTRODUCTION GENERALE

Dans la prochaine décennie, la quête pour la plus haute bande passante est de plus en plus importante suite à la demande croissante pour les services multimédias de qualité. Dans les réseaux d'accès, plusieurs technologies sont actuellement utilisées pour les besoins des utilisateurs incluant les technologies filaires basées sur cuivre ou fibre optique et les technologies sans fil. Pour faire face à ces besoins croissants en matière de télécommunication à débits élevés, les liaisons optiques sans fil atmosphériques, dénomination française de «Free Space Optic (FSO)», appelées aussi «Optical Wireless Communications (OWC)», constituent une technologie complémentaire aux faisceaux hertziens et aux fibres optiques. C'est une technologie optique qui permet la transmission de tous types de données avec un débit comparable à celui de la fibre optique tout ayant la souplesse et les avantages du sans fil, plus la mobilité dans certaines applications.

Pour assurer des nouveaux services dans le monde des télécommunications tels que la téléphonie mobile 3G et 4G, les fournisseurs d'accès Internet et les opérateurs des réseaux mobiles ont besoin d'une nouvelle infrastructure pour leurs réseaux basées sur des liaisons à haut débit. Simples à installer et à exploiter, peu onéreuses et non soumis à des réglementations contraignantes, les liaisons optiques sans fil se prêtent à presque toutes les configurations de réseaux et couvrent un grand nombre d'applications avec un débit comparable à celui de la fibre optique. Les fournisseurs de services peuvent déployer des solutions FSO, dans n'importe quelle topologie géographique, à une fraction du coût. Cette souplesse rend la solution FSO extrêmement attrayante. Le principal inconvénient d'utiliser un tel système de télécommunication est la forte influence que peut jouer l'atmosphère sur la propagation de la lumière et donc sur la disponibilité et la fiabilité du système.

L'effet de l'atmosphère terrestre sur la propagation d'un rayonnement laser est dû d'une part, à sa composition chimique et d'autre part, à la présence de différents types de particules en suspension dans l'air. Les différentes conditions météorologiques telles que la formation de brouillard et la présence de différents types de précipitations peuvent réduire considérablement la portée d'une liaison optique sans fil. L'étude des systèmes optiques sans fil est multidisciplinaire, impliquant un large éventail de domaines, notamment: la conception optique, l'optoélectronique, la conception électronique, la modélisation du canal, l'architecture des réseaux sans fil, la théorie de l'information et de la communication, la modulation et le codage.

Le choix du format de modulation est l'un des facteurs principaux dans la réalisation d'un tel système. OOK (On Off Keying) est la modulation la plus simple et la plus utilisée dans les systèmes de télécommunication optiques sans fil commerciaux, en raison de la facilité de sa mise en œuvre, la simplicité de conception du récepteur et le rapport qualité/prix. La technique de modulation PPM (Pulse Position Modulation) est une technique de modulation qui présente l'avantage de l'efficacité en puissance par rapport à OOK, mais au détriment d'un besoin en bande passante accrue et d'une plus grande complexité à cause du haut niveau de précision requis dans la synchronisation des slots et des symboles. La modulation MPPM (Multi Pulse Position Modulation) est une généralisation de la PPM, elle permet d'atteindre un débit d'informations important et une meilleure efficacité spectrale.

La contribution de ce mémoire va de l'étude de performance des modulations OOK, PPM et MPPM jusqu'à la détermination de la disponibilité et la qualité de service d'une liaison optique sans fil en passant par la présentation des méthodes compatibles avec les systèmes de télécommunication optiques sans fil.

Ce mémoire est organisé en cinq chapitres avec une conclusion générale.

Dans le premier chapitre, on va présenter les éléments introductifs à l'étude du fonctionnement des liaisons optiques sans fil tels que ses avantages et ses limites, ses domaines d'application et sa position dans le domaine des télécommunications. L'architecture des unités émettrices-réceptrices et les techniques d'émission et de réception seront aussi abordées dans ce chapitre.

Dans le deuxième chapitre, on va aborder les modèles mathématiques de la propagation du rayonnement laser dans l'atmosphère terrestre en mettant l'accent sur les phénomènes physiques qui sont l'absorption, la diffusion et la turbulence optique.

Dans le troisième chapitre, on va effectuer une analyse comparative de performance entre les modulations OOK, PPM et MPPM, en montrant les raisons qui les rendent désirables pour les systèmes de télécommunication optiques sans fil. On va aussi analyser la performance de ces modulations sous différentes intensités de brouillard.

Le quatrième chapitre est consacré à quelques modulations hybrides compatibles avec les systèmes de télécommunication optiques sans fil basées sur les inconvénients de PPM et de MPPM. On va résoudre le problème de synchronisation de symboles et simplifier l'opération de

récupération de flux de données au niveau du récepteur pour améliorer le débit, l'efficacité en puissance et l'efficacité spectrale.

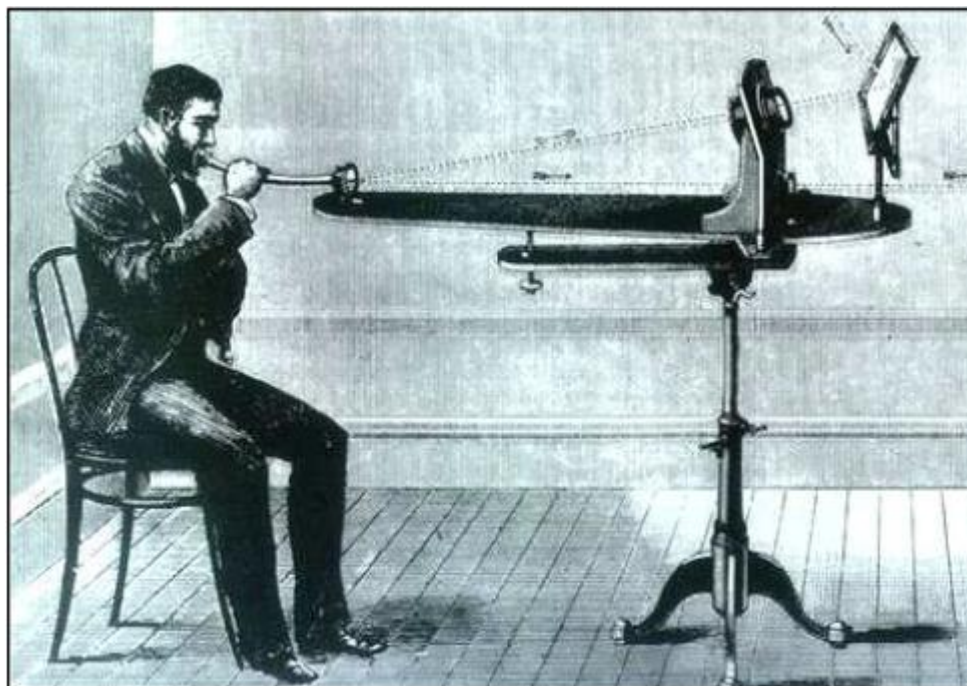
Dans le cinquième et dernier chapitre, on va donner les modèles mathématiques qui servent à calculer les différentes atténuations atmosphériques et après avoir présenté le logiciel « FSO Prediction » d'Orange (filiale du Groupe France Télécom), on va effectuer une simulation sous cet outil afin d'évaluer la disponibilité et la qualité de service d'une liaison optique sans fil en appliquant directement avec cinq sites localisés à Antananarivo, la capitale de Madagascar.

# CHAPITRE 1

## ELEMENTS INTRODUCTIFS A L'ETUDE DU FONCTIONNEMENT DES LIAISONS OPTIQUES SANS FIL

### 1.1 Introduction

Le concept des liaisons optiques atmosphériques (FSO) [1] ou plus précisément l'utilisation de la lumière en espace libre dans les télécommunications n'est pas récent. La première communication optique à travers l'espace libre était l'expérience de Photophone par Alexander Graham Bell en 1880 [2] illustrée dans la figure 1.01 ci-après, brevet déposé le 03 Juin 1880. Dans son expérience, Bell a modulé le rayonnement solaire avec un signal vocal et l'a transmis sur une distance d'environ 200 mètres, le récepteur est constitué d'un miroir parabolique avec une cellule de sélénium à son point focal, il a toujours considéré le photophone comme sa plus grande invention : « The greatest invention I have never made; greater than the telephone » [3].



**Figure 1.01 :** *Le principe de fonctionnement du photophone proposé par Graham Bell [2]*

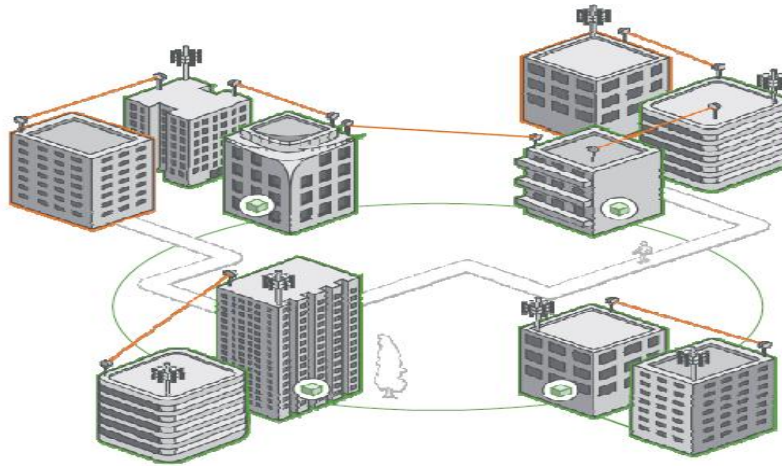
Cette expérience de photophone n'a pas fonctionnée très bien à cause de la nature intermittente des radiations solaires. Cependant, le concept est tout simplement resté une curiosité jusqu'à l'invention du laser en 1960, qui a annoncé la véritable naissance de la technologie des systèmes de télécommunication basés sur les liaisons optiques sans fil. Cette technologie a été développée auparavant pour des applications dans le domaine de la défense et de l'ingénierie aérospatiale.

Les liaisons optiques sans fil sont apparues comme une option commerciale qui s'est heurtée à plusieurs restrictions technologiques vers la fin des années 80s: faible débit, courte distance de transmission, problèmes d'alignement ainsi que leur vulnérabilité aux événements climatiques et aux conditions météorologiques. Une grande partie de ces problèmes fut surmontée et le développement de cette technologie s'est poursuivi. C'est à la fin des années 90s, avec l'apparition de l'internet et le grand besoin en matière de débit dans le secteur des télécommunications, la demande de disposer des réseaux d'accès locaux sans fil, des réseaux multimédia et des transmissions vidéos à des débits élevés, que plusieurs compagnies de télécommunications ont développé une "Nouvelle Génération" de système de communication laser sans fil pour l'usage commercial et l'ont introduit dans le secteur privé. En 2008, la première liaison FSO avec 10 Gbps de débit a été introduite sur le marché, faisant d'elle la technologie sans fil la plus rapide disponible commercialement [4]. Dans ce chapitre, on va définir d'abord ce qu'on entend par liaisons optiques en espace libre puis on va décrire le principe de base de ce type de liaisons, et expliquer les divers intérêts et limitations de cette technologie ainsi que leurs applications et leurs implications dans le monde des télécommunications.

## **1.2 Définition et principe de fonctionnement de la technologie FSO**

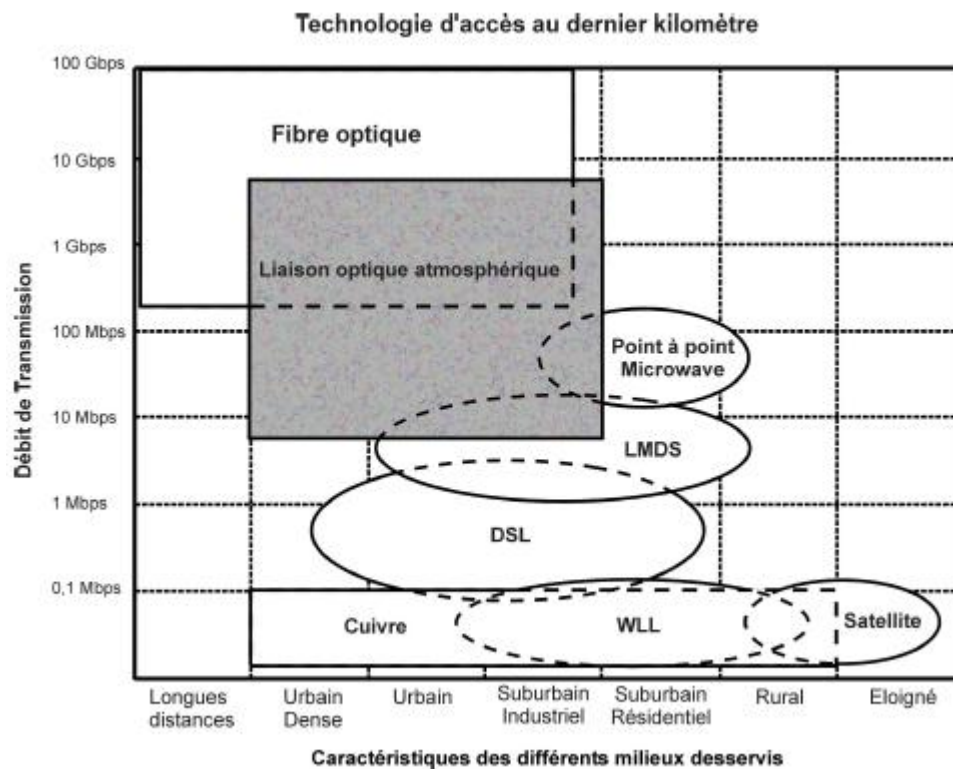
### *Définition 1.01 :*

Une liaison optique sans fil est définie par le transfert de données à travers l'espace entre deux points utilisant le rayonnement optique comme un signal porteur. Les canaux où se propage le signal optique pourraient être l'espace lointain, l'atmosphère ou la mer [5]. Dans ce mémoire, on se focalise sur les liaisons optiques sans fil dont le canal de transmission est l'atmosphère. Une liaison optique sans fil se fonde essentiellement sur une visibilité directe LOS (Line of Sight) entre les extrémités des points de communication, par conséquent pour assurer un échange fructueux d'informations cela exige que l'émetteur et le récepteur soient en visibilité directe l'un avec l'autre sans aucune obstruction. Ce qui fait que la communication optique sans fil est théoriquement possible tant qu'il y a une visibilité directe entre la source et la destination, et la puissance du rayonnement optique est suffisante pour atteindre l'autre extrémité. La figure 1.02 ci-après représente un exemple d'architecture réseau basée sur les liaisons optiques sans fil [4].



**Figure 1.02 :** Exemple d'architecture réseau basée sur des liaisons optiques sans fil reliant des bâtiments centraux entre eux [4].

Les transmissions optiques en espace libre gagnent de plus en plus de parts du marché au niveau des télécommunications sans fil. La figure 1.03 montre une comparaison entre la technologie FSO et les différentes technologies d'accès au dernier kilomètre en termes de débit de transmission et de recouvrement géographique.



**Figure 1.03 :** Comparaison entre les différentes technologies d'accès au dernier kilomètre en termes de débit de transmission et de recouvrement géographique [6].

Du point de vue fonctionnement, les équipements FSO utilisent la modulation d'un faisceau laser pour échanger des informations binaires dans les deux sens (Full-Duplex) via un couple Emetteur/Récepteur à chaque extrémité. Généralement, c'est une liaison point à point, cependant, il existe des équipements FSO qui utilisent des liaisons point à multipoint.

### **1.3 Caractéristiques des liaisons optiques atmosphériques**

Pour assurer un débit comparable à celui de la fibre optique tout ayant la souplesse du sans fil, les principaux intérêts des systèmes de communications optiques sans fil sont : le faible coût, la flexibilité, la rapidité d'installation et de déploiement. Actuellement, plusieurs liaisons sont assurées à l'aide des systèmes FSO sur des distances qui varient entre quelques centaines de mètres à quelques kilomètres à des débits de transmission standards : 155 Mbps, 622 Mbps, voire à plusieurs Gbps.

Les caractéristiques de base de la technologie FSO sont:

- Bande passante de modulation importante : Etant donné que dans tout système de communication, la quantité de données transportées est directement liée à la bande passante de la porteuse modulée ; les communications optiques garantissent une grande capacité d'information par rapport à des systèmes basés sur les communications radio fréquence.
- Faisceau de taille étroite : Comme le rayonnement optique est connu par son faisceau très étroit et qu'un faisceau laser typique possède un angle de divergence entre 0,01 et 0,1 mrad [7], alors la puissance émise est concentrée seulement dans une zone très étroite, ce qui fournit un lien FSO avec isolement spatial adéquat de ses brouilleurs potentiels.
- Un spectre ne nécessitant pas de licence : Comme les interférences de transporteurs adjacents est un problème majeur à cause de la congestion du spectre des radiofréquences, alors pour minimiser ces interférences, les autorités réglementaires, telle que l'ARTEC ou Autorité de Régulation des Technologies de Communication de Madagascar (nouvelle nomination de l'OMERT depuis le 01 Avril 2015) [8] pour Madagascar, mettent en place une réglementation très stricte. Ainsi l'attribution d'une tranche du spectre radio exige une taxe énorme tandis que les fréquences optiques sont libres de toute taxe.

- Rapide à déployer et redéployer : Le temps qu'il faut à une liaison FSO afin d'être pleinement opérationnel, de l'installation jusqu'à l'alignement de la liaison, pourrait être aussi faible que quelques heures.
- Performance liée aux conditions atmosphériques : La performance d'une liaison FSO est liée aux conditions climatiques. La propriété "non stable" du canal est le plus grand défi. Pourtant, ce n'est pas propre aux liaisons FSO mais les liaisons RF et les liens de communication par satellite sont également exposés aux pannes lors de fortes pluies et en cas de tempête.

#### **1.4 Domaines d'application de la technologie FSO**

Suite aux caractéristiques mentionnées ci-dessus, la technologie FSO est très attrayante pour des diverses applications. La technologie FSO peut facilement compléter d'autres technologies, telles que les communications filaires et sans fil de fréquence radio, et les technologies Fiber To The-x (FTTx).

Les liaisons FSO peuvent successivement être utilisées pour des :

- Liaisons de secours pour les liaisons fibre optique : Les liaisons FSO peuvent être utilisées pour fournir des liaisons de secours en cas de perte de données ou de panne de communication, en cas de dommages ou d'indisponibilité de la liaison fibre optique principale [9].
- Liaisons de raccordement "Backhaul" de la téléphonie mobile : Les liaisons FSO permet un transfert intensif de donnée pour les liaisons de raccordement entre les stations de base et l'infrastructure des réseaux. Ceci permet une amélioration des réseaux mobiles sans fil et une extension du haut débit pour le Backhaul entre les stations de base. De plus, les liaisons optiques disposent d'une large bande passante, appropriée aux applications multimédias.
- Liens temporaires : La technologie FSO trouve des applications où un lien temporaire est nécessaire, que ce soit pour une conférence ou connectivité ad-hoc dans le cas d'un effondrement d'un réseau de communication existant [10]. Elle est utilisée aussi pour le remplacement des fibres optiques momentanément, pour les différentes applications où les fibres optiques ne peuvent pas être utilisées pour une raison ou une autre.

- Terrains Difficiles : les liaisons FSO présentent un pont de données attractif dans le cas d'une liaison entre deux points séparés par une rivière, une rue très fréquentée, une voie ferrée ou lorsque le droit de passage n'est pas disponible ou trop coûteux à poursuivre.
- La télévision à haute définition : Compte tenu de l'exigence spectrale énorme de caméras haute définition et des signaux de télévision, la technologie FSO est de plus en plus utilisée dans le secteur de la radiodiffusion pour le transport de signaux en direct de caméras haute définition dans des endroits éloignés à un bureau central.
- Les communications militaires : FSO est une méthode de communication attrayante pour des applications militaires en raison de la sécurité. L'utilisation de fréquences radio traditionnelles (RF) risque d'intercepter la communication, et ce n'est pas le cas avec l'optique en espace libre, puisque les ondes RF sont transmises sur une grande surface et qui permet de recevoir le signal dans le voisinage du système, bien qu'il soit encore nécessaire de démoduler et décoder. D'autre part, un lien FSO a une divergence de faisceau très étroite, généralement milliradians, donc la seule façon d'intercepter le signal est d'être dans la voie de transmission.

## **1.5 Position de la technologie FSO dans le monde des télécommunications**

Traditionnellement, la technologie sans fil est presque toujours associée à la transmission radio, malgré l'utilisation d'un autre porteur que les ondes radio, comme les ondes optiques. Les systèmes de transmission FSO jouent un rôle de plus en plus important, fournissant une largeur de bande élevée et des communications fiables sur de courtes distances. Cette technologie étant exemptée de licences officielles et ne nécessitant pas d'autorisation de planification. Les planificateurs de réseaux utilisent la FSO comme un outil pour la connectivité des réseaux, donnant des avantages significatifs en termes de gains de temps et d'économie. Ce qui fait qu'aujourd'hui, il est largement admis que les systèmes optiques sans fil sont la meilleure solution pour assurer des liaisons de courtes et moyennes distances à très hauts débits.

### ***1.5.1 La boucle locale optique***

Les liaisons de communication vivent actuellement un énorme bouleversement et passent de l'accès par câble à l'accès sans fil. Pour les liaisons à grande distance, les réseaux de télécommunications utilisent la fibre optique et les liaisons par satellite. Pour les liaisons à moyenne distance la fibre optique ou le cuivre est utilisé. C'est au niveau de la boucle locale que la technologie FSO trouve une alternative à bas coût aux systèmes existants actuellement. On

appelle boucle locale (BL) ou on dit aussi le lien du dernier kilomètre « Last Mile en anglais », les liaisons interconnectant les clients d'un opérateur dans un quartier à l'autocommutateur de proximité où arrive l'accès distant (souvent fibre optique) qui achemine les communications venant d'un autre pays, d'une autre ville, ou d'un autre quartier. Les paires de cuivre sont la première solution utilisée pour l'accès au dernier kilomètre. D'autres méthodes alternatives sont apparues par la suite, à savoir l'accès filaire comme la fibre optique et le câble coaxial et l'accès sans fil telles que la boucle locale radio (BLR), la boucle locale par liaison optique sans fil ou la boucle locale par courant porteur en ligne (CPL). Pour assurer des nouveaux services dans le monde des télécommunications tels que la téléphonie mobile 3G et 4G, les fournisseurs d'accès Internet et les opérateurs des réseaux mobiles ont besoin d'une infrastructure pour leurs réseaux basées sur des liaisons à haut débit entre les stations de base et le backbone ou l'épine dorsale du réseau, tant que les réseaux qui existent déjà sont incapables d'assurer la qualité de service demandée aujourd'hui par le marché des télécommunications. La pose de câble en fibre optique pour chaque foyer et entreprise qui a besoin d'accès haut débit est la solution idéale à ce problème, mais elle est lente et coûteuse. Le processus est couteux et peut prendre de 6 à 12 mois en raison des tranchées et des installations [11]. D'autre part, les liaisons FSO peuvent être mises en place dans une durée de quelques heures à quelques jours, à des coûts de (1/3) à (1/10) de celui d'une installation de la fibre optique.

### ***1.5.2 Les challenges des systèmes FSO***

L'atténuation d'un signal optique transmis par fibre peut être prévisible. D'autre part, l'atténuation d'un signal optique transmis dans l'espace libre n'est pas prévisible (les conditions climatologiques changent dans le temps et dans l'espace), en raison de cette imprévisibilité, il est plus difficile de contrôler la transmission des rayons optiques en espace libre. Cette imprévisibilité affecte la disponibilité du système et les capacités de conception. FSO est également une technologie de ligne de visibilité directe, ce qui signifie que les points de communication qui se relient doivent être en mesure de voir les uns les autres sans rien entre les deux.

Les principaux facteurs qui influencent les liaisons optiques sans fil sont:

- Le brouillard: C'est le défi majeur des réseaux optiques atmosphériques sans fil. Le brouillard est la vapeur d'eau sous forme de gouttelettes d'eau de quelques centaines de microns de diamètre. Ces gouttelettes sont en mesure de modifier les caractéristiques de la lumière ou d'empêcher totalement le passage des rayons lumineux à travers une

combinaison d'absorption et de diffusion dans un brouillard dense. Les recherches dans ce domaine affirment qu'il est impossible de réaliser une liaison FSO fiable de plus de 500 mètres en présence de brouillard dense sans dépasser les limites réglementaires de la quantité de puissance optique qui peut être transmise à travers l'atmosphère.

- Absorption: L'absorption atmosphérique résulte de l'interaction entre les photons du rayonnement incident et les atomes ou molécules de l'atmosphère terrestre. Ceci conduit à la disparition du photon incident, à l'élévation de la température de l'atome ou de la molécule. Le nombre des photons du rayonnement se réduit tout au long du parcours, ainsi que l'intensité du rayonnement.
- Diffusion atmosphérique : La diffusion atmosphérique résulte de l'interaction d'une partie du rayonnement incident avec les atomes ou les molécules dans le milieu de propagation, ce qui provoque une redistribution angulaire de cette partie du rayonnement avec ou sans modification de la longueur d'onde incidente.
- Les obstacles physiques: Les oiseaux peuvent bloquer temporairement le faisceau, mais cela tend à provoquer seulement de courtes interruptions, et les transmissions sont facilement reprises.
- Balancement des bâtiments: Le mouvement des bâtiments peut perturber l'alignement du récepteur et de l'émetteur, c'est surtout le cas dans les plus hauts bâtiments.
- La turbulence atmosphérique : Comme le sol se réchauffe par le soleil, l'air se réchauffe aussi, certaines cellules d'air ou de poches d'air se réchauffent plus que les autres, cela provoque des changements dans l'indice de réfraction, qui à son tour modifie le chemin que la lumière prend dans sa propagation à travers l'air.

Chacun de ces facteurs provoque une atténuation du signal et perturbe ainsi les performances de la liaison. En particulier, l'effet du brouillard peut provoquer une extinction significative du faisceau lumineux et mettre le système hors service. Il existe différentes solutions à ces problèmes. Par exemple, les effets des aérosols, ceux des brouillards et ceux de la turbulence, leurs réductions passent par le choix approprié de la longueur d'onde de transmission.

### ***1.5.3 Comparaison de la technologie FSO par rapport à la fibre optique***

Les systèmes de communication optiques sans fil et les fibres optiques ont presque une même bande de transmission, d'ici vient l'importance de les comparer. Un des points le plus important

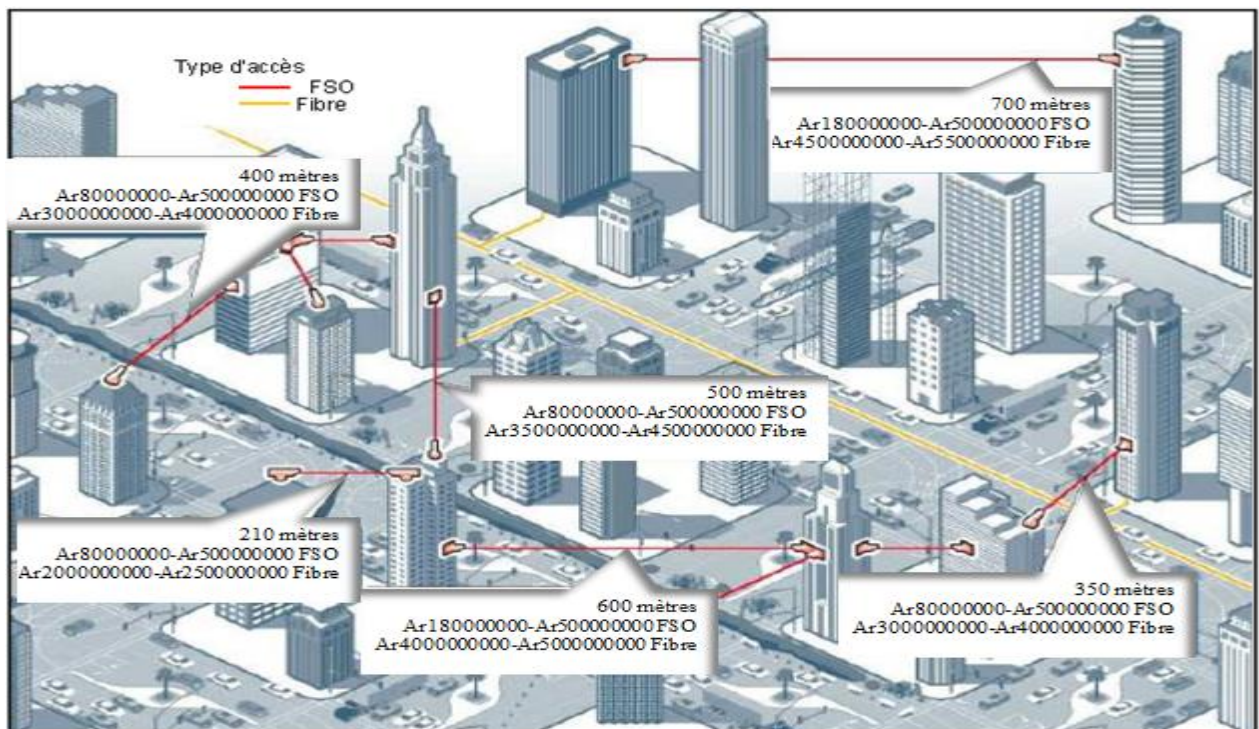
de la comparaison entre les deux systèmes est la manière dont ils transmettent la lumière. La lumière peut être transmise soit à travers l'espace libre ou à travers un milieu confiné.

Concernant la technologie optique sans fil, et comme son nom l'indique, signifie la transmission de signaux optiques à travers l'air. Cette transmission optique nécessite l'utilisation des sources lumineuses, qui peuvent être soit des LEDs ou des diodes lasers. Le concept des liaisons FSO est similaire à la transmission optique à l'aide de fibres optiques, la seule différence est le support. La lumière se déplace plus vite dans l'air (environ 300.000 km/s) qu'à travers le verre (environ 200.000 km/s), ce qui fait que les communications à travers les liaisons FSO peuvent être considérées comme des communications à la vitesse de la lumière.

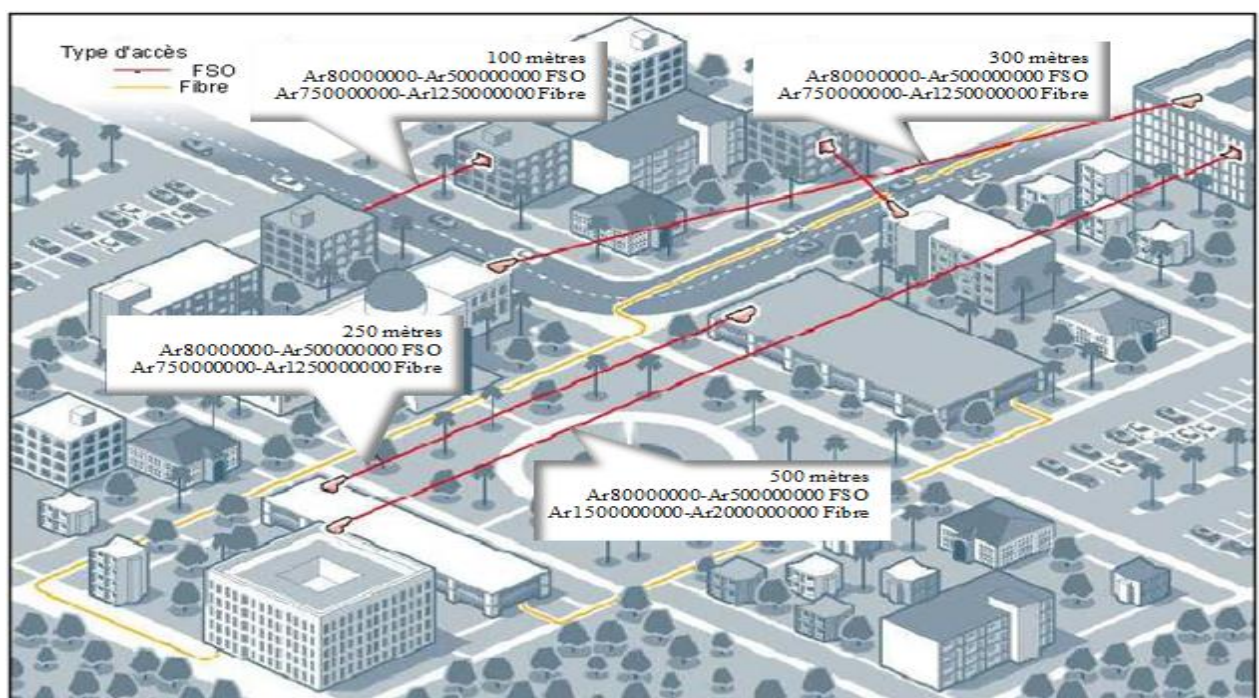
Le déploiement des réseaux à fibre optique prend des mois, tandis que les systèmes optiques sans fil peuvent être mis en place en quelques heures, et à une fraction du coût. En plus, les réseaux FSO sont des plateformes redéployables, ils offrent un avantage économique sur la fibre optique.

Un autre aspect important à prendre en compte est les avantages sur les impacts environnementaux de l'optique atmosphérique. L'installation des fibres nécessite le creusement de tranchées, qui peut causer la pollution, l'abattage des arbres et la destruction des monuments historiques, ce n'est pas le cas pour FSO, par conséquent les systèmes FSO sont respectueux de l'environnement.

Les liaisons optiques sans fil permettent d'établir des communications à des débits comparables à ceux de la fibre optique. Cette dernière atténue le signal à des taux connus et l'amplification permet de compenser ces pertes. Les fibres optiques sont préférables pour les liaisons à grandes distances ainsi que pour les épines dorsales des réseaux. Pour les réseaux urbains, les liaisons FSO ont l'avantage d'être peu coûteuses, rapides et faciles à installer, flexibles et peuvent être déployées dans tous les réseaux. A titre d'exemple la figure 1.04 et la figure 1.05 représentent une comparaison du coût de service d'accès fourni par les systèmes FSO de l'entreprise LightPointe et celui du service assuré par des fibres optiques pour une région urbaine et sur un campus [6].



**Figure 1.04 :** Comparaison de prix du service d'accès fourni par les systèmes FSO (LightPointe) et celui du service assuré par des fibres optiques dans une région urbaine [6].



**Figure 1.05 :** Comparaison de prix du service d'accès fourni par les systèmes FSO (LightPointe) et celui du service assuré par des fibres optiques sur un campus [6].

### ***1.5.4 Comparaison de la technologie FSO par rapport à la technologie radio***

Pour répondre à la demande croissante de disposer des réseaux d'accès locaux sans fil, des réseaux multimédia et des transmissions vidéos à des débits élevés, il existe essentiellement deux technologies : les transmissions radio et les transmissions optiques sans fil, qui sont actuellement les principales parties du spectre électromagnétique utilisées pour transmettre des informations sans fil, malgré le fait que le moyen le plus couramment utilisé pour les communications sans fil à ce jour est la radio.

La technologie FSO devient de plus en plus populaire chaque jour, elle est préférée (en raison de ses avantages intrinsèques) sur les communications radio pour un certain nombre d'applications. D'un point de vue gestion du spectre, l'infrarouge offre une large bande potentiellement énorme qui est actuellement non réglementée dans le monde entier. D'autre part, la partie radio du spectre devient de plus en plus congestionnée chaque année, et l'attribution des fréquences radio est de plus en plus difficile et coûteux. Un autre avantage de la transmission optique sans fil sur la technologie radio est son immunité aux interférences électromagnétiques. Cela rend cette technologie privilégiée dans des environnements où les interférences doivent être minimisées ou éliminées. FSO présente également des avantages sur la radio en termes de sécurité. D'autres avantages sont le faible coût, la petite taille, et la consommation d'énergie limitée des composants optiques sans fil. Ceci s'explique par le fait que les systèmes de communication sans fil utilisent les mêmes dispositifs optoélectroniques qui ont été développés et améliorés au cours des dernières années pour les communications à fibres optiques. Malgré les avantages présentés par la technologie optique sans fil, elle n'est pas sans inconvénients. Les liaisons optiques sans fil sont sensibles au blocage par des objets, ce qui peut entraîner des perturbations de la liaison.

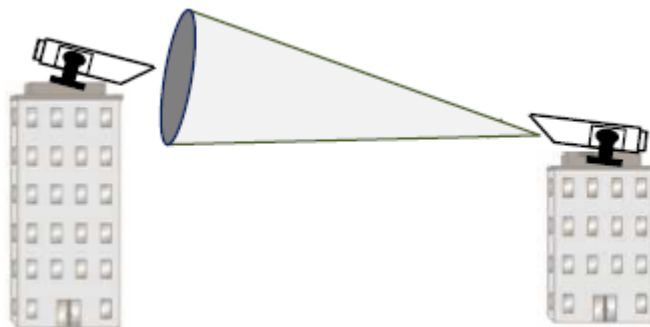
Avec l'optique sans fil, des débits jusqu'à 10 Gigabits sont atteints à travers courtes et moyennes distances (de 100 m à 2 km), en full duplex. Par contre, le débit d'un réseau radio est limité et la couverture est bien plus importante, jusqu'à 15 km. Tenant compte à la fois des avantages et des inconvénients de la technologie FSO, il est douteux qu'elle va remplacer la technologie radio comme le seul moyen de transmettre des informations sans fil. Il est plus probable que l'exploitation de la radio et celle du FSO continueront de manière complémentaire, l'une étant préférable à l'autre, en fonction de l'application. La technologie FSO va probablement continuer d'être favorisée pour les communications haut débit à courtes distances, à faible coût, et l'immunité aux interférences est nécessaire. D'autre part, la technologie de communication radio,

va continuer à être utilisée pour la transmission sur longues distances, ou pour les systèmes de communications fonctionnant dans des environnements où les conditions atmosphériques sont d'un impact considérable. De plus, pour une liaison permanente, il apparaît évident qu'en combinant les deux technologies dans un même réseau permet de garantir une liaison sans coupure avec débit dégradé, pour tous les temps. L'une prene le relais de l'autre en cas de coupure.

Dans les régions qui se caractérisent par le brouillard dense, un lien RF de secours «Backup» peut être incorporé pour avoir un système FSO-RF hybride [12] qui est capable de fournir une disponibilité de 99,999% dans toutes les conditions météorologiques. L'utilisation de ce système hybride signifie toutefois qu'un taux réduit de données sera en opération chaque fois que le lien RF de Back-up est en marche, autre difficulté du système hybride comprennent la perte de données lors de bascule de FSO au RF, ou vice versa. Prévenir la perte de données pendant la commutation nécessitera l'utilisation de buffers, en outre, le changement de commutateur est prévu pour être rapide et assez habile pour éviter tout faux déclenchement.

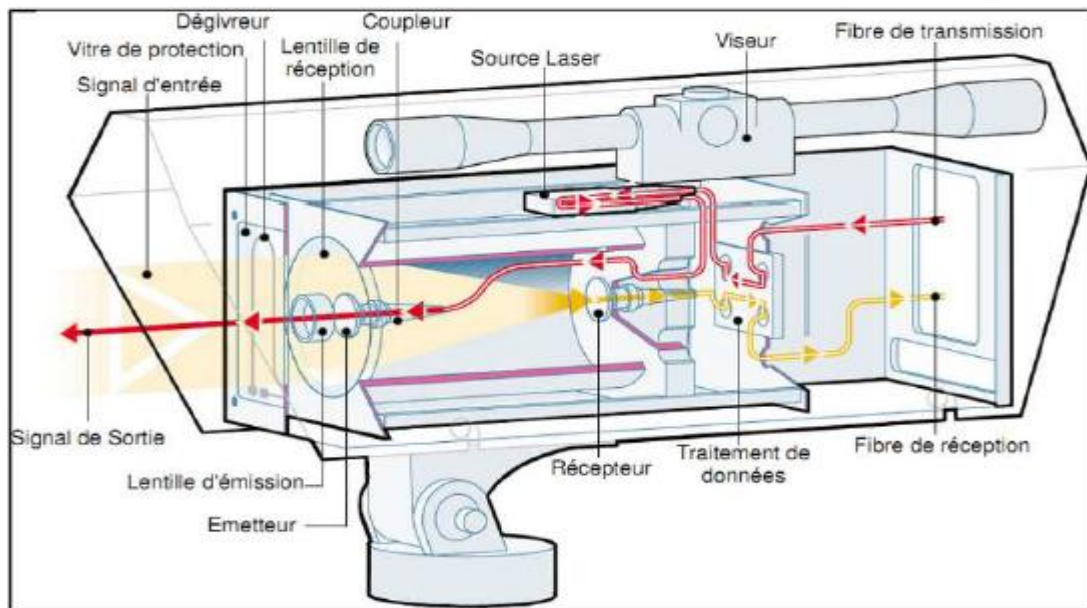
### 1.6 L'émission et la réception optique dans les systèmes FSO

Le schéma typique d'une liaison optique sans fil terrestre est illustré sur la figure 1.06.



**Figure 1.06 :** Schéma typique d'une liaison optique sans fil terrestre FSO.

Comme toute autre technologie de communication, un système FSO comprend essentiellement les trois parties suivantes: l'émetteur, le canal et le récepteur. La plupart des équipements sont bidirectionnels (Full duplex) et associent dans le même coffret un émetteur à un récepteur. Certains systèmes gèrent plusieurs canaux de communication en multiplex. Les transmetteurs (Emetteur/Récepteur) peuvent être situés sur un toit, sur un coin d'un bâtiment ou à l'intérieur derrière une fenêtre. La figure 1.07 montre un exemple typique d'une unité FSO de la société LightPointe [13] permettant à la fois la réception et la transmission de données.

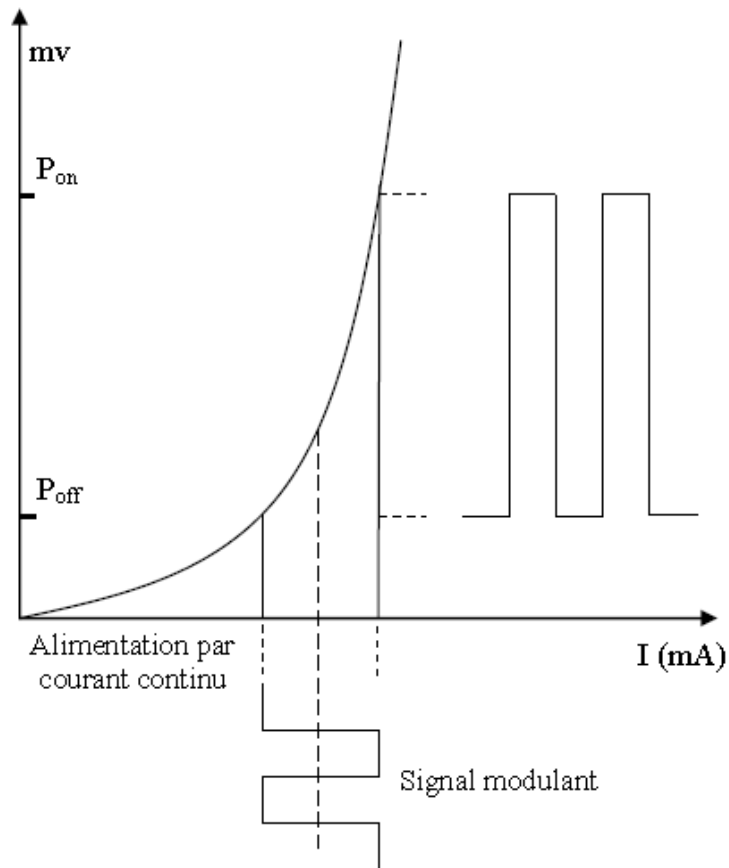


**Figure 1.07 :** *Illustration d'une unité FSO émettrice réceptrice*

### **1.6.1 L'émetteur FSO**

C'est un bloc fonctionnel dont le rôle primordial est la modulation de la source de données sur la porteuse optique, qui se propage ensuite à travers l'atmosphère vers le récepteur. Le type de modulation le plus utilisé est la modulation d'intensité (IM). L'idée réside dans la transmission des informations sur la puissance instantanée du signal porteur. Ce qu'on peut l'avoir soit en faisant varier le courant de conduite de la source optique directement en correspondance avec les données à transmettre comme le montre la figure 1.08, ou via un modulateur externe [14].

Les systèmes FSO disponibles dans le commerce utilisent des longueurs d'onde proche du spectre visible, autour de 850 et 1550 nm [15], ce qui correspond à des fréquences autour de 200 THz. Les longueurs d'onde 850 et 1550 nm sont deux fenêtres atmosphériques (régions spectrales qui ne souffrent pas beaucoup d'absorption de l'atmosphère environnante), et puisque ces longueurs d'onde sont également utilisées dans les communications par fibre optique, alors des composants standards de l'industrie fibre optique peuvent être utilisés dans les systèmes de communication optique sans fil.



**Figure 1.08 :** *Modulation directe par intensité*

Dans l'opération d'émission optique, le rayon envoyé par la source lumineuse passe à travers une série de lentilles comme illustrée dans la figure 1.07 qui sont utilisées pour contrôler la quantité de divergence du faisceau laser. La divergence d'un rayon lumineux varie entre quelques centaines de milliradians et quelques microradians. Par exemple pour une divergence de faisceau de 1 milliradian, le diamètre du faisceau à 1 km est de 1 m. Certains émetteurs plus complexes peuvent avoir également un certain type d'élément optique actif, comme un système de suivi actif pour permettre le réglage de l'alignement de l'unité optique FSO. Il est à noter que le faisceau laser émis est souvent intentionnellement fait d'une manière à avoir un certain angle de divergence de sorte que la section transversale du faisceau au niveau du récepteur soit beaucoup plus grande que l'ouverture optique de l'unité réceptrice, comme le montre la figure 1.06. Le but d'une telle mesure est de compenser les petits mouvements terminaux en raison des facteurs environnementaux tels que le mouvement des immeubles.

Une des principales clé dans tout système de communication optique est la source optique qui peut être facilement modulée, et à des débits très élevés. Dans les systèmes de communication optique

sans fil moderne, une variété de sources optiques est utilisée pour transmettre les données optiques. Dans notre étude, on va se concentrer sur les sources qui se basent sur les semiconducteurs, parce qu'elles sont les plus utilisées dans les systèmes commerciaux. Les principales différences entre ces sources sont la longueur d'onde, la puissance et la rapidité de modulation.

#### 1.6.1.1. Les diodes DEL

Les diodes électroluminescentes (DEL) sont des structures semiconductrices émettant de la lumière. Due à leur puissance d'émission relativement faible, elles sont généralement utilisées dans des applications sur des courtes distances avec des besoins spectrales modérés, jusqu'à 155 Mbps [16], telle que les liaisons optiques sans fil à l'intérieur des bâtiments (Indoor optical wireless communications « IOWC »). L'avantage majeur des sources DEL est leur vie extrêmement longue et le faible coût [17].

#### 1.6.1.2. Les diodes LASER

La diode laser présente des avantages significatifs pour les applications longues distances comparée à la diode DEL. L'industrie des systèmes optique sans fil commercial est centrée sur l'utilisation de semiconducteurs lasers, en raison de leur taille relativement petite, haute puissance et rentable. Généralement, ces lasers sont utilisés dans la fibre optique, par conséquent, la disponibilité n'est pas un problème. Dans la plupart des cas, les lasers à semiconducteurs sont le choix préféré pour les entreprises qui ont besoin d'une source de lumière de puissance élevée et cohérente dans leur conception du système.

#### 1.6.1.3. Les critères de sélection des diodes LASER dans les systèmes FSO

La sélection d'une source laser pour des applications FSO dépend de divers facteurs. Il est important que la longueur d'onde de transmission soit corrélée avec une des fenêtres atmosphériques, comme indiqué précédemment, des bonnes fenêtres atmosphériques sont autour de 850 nm et 1550 nm dans la gamme de longueur d'onde proche infrarouge. Dans la gamme spectrale IR longue, certaines fenêtres de longueur d'onde sont présentes entre 3 et 5 micromètres (surtout 3.5 à 3.6 micromètres et 8-14 micromètres) [16]. D'autres facteurs qui influent sur l'utilisation d'une source lumineuse spécifique sont successivement : le prix et la disponibilité des composants ; la puissance de transmission ; la durée de vie ; les capacités de modulation ; la

sécurité oculaire ; les dimensions physiques ; la compatibilité avec les autres moyens de transmission comme la fibre optique.

Un choix populaire dans les équipements FSO est la diode laser à cavité verticale émettant par la surface, “Vertical Cavity Surface Emitting Laser” ou VCSEL, (prononcé Vixel). Les diodes VCSEL ont les avantages de faible consommation, faible dégagement de chaleur, couplage facile, faible coût, et une bande passante élevée (jusqu'à 5 GHz) [18].

### ***1.6.2 Le récepteur FSO***

C'est un bloc fonctionnel permettant essentiellement de récupérer et d'extraire les données transmises du champ optique incident. L'unité réceptrice se compose d'une série de lentilles qui concentrent le signal lumineux reçu sur un détecteur de lumière « photodiode ». Toutefois, dans les systèmes FSO simples pour les applications à courte portée, la partie transmission et la partie réception peuvent être directement reliées à une fibre optique. Dans ce cas, le signal reste optique à la réception et le but des lentilles dans le récepteur est de concentrer la lumière afin de la coupler dans la fibre. Dans les systèmes où le signal optique est reconverti en un signal électrique, les lentilles de réception concentrent la lumière sur une photodiode, où il est converti en un signal électrique, plus le circuit de décision, l'amplification, le filtrage et le traitement des signaux sont effectués pour garantir une haute fidélité de récupération de données. A la réception, le système doit fortement exclure la lumière ambiante (lumière du soleil par exemple) qui peut perturber le signal reçu. En pratique, le détecteur possède un champ de vue optique assez petit et le dispositif de réception comporte des filtres qui permettent de ne laisser passer que les longueurs d'onde souhaitées.

Généralement, les équipements sont dotés d'un logiciel de supervision qui permet une configuration de la liaison ainsi qu'une description qualitative et quantitative des différents modules. Un autre élément de conception important dans les systèmes FSO est l'effet de maintenir suffisamment la stabilité de pointage. Les systèmes de communication optique sans fil peuvent inclure des dispositifs d'alignement actifs (auto tracking) [19] dans lesquels, la rétroaction du récepteur est utilisée afin de diriger automatiquement le faisceau vers le récepteur. Ces systèmes d'alignement actifs permettent une stabilisation optimale de la transmission (entre les toits des grands immeubles par exemple) lors de mouvements reliés au vent ou consécutivement à toutes autres instabilités mécaniques du système.

#### 1.6.2.1. Les Photodétecteurs

En plus des sources de transmission optique, les détecteurs optiques ont aussi une importance majeure dans la conception et la réalisation d'un système optique sans fil. Le signal généré par un photodétecteur est toujours proportionnelle à la puissance optique instantanée reçue, et comme le signal optique est généralement faible après avoir voyagé à travers le canal de communication atmosphérique, le photodétecteur doit donc répondre à des exigences de performance rigoureuses, telles que la sensibilité élevée au sein de sa gamme de longueurs d'onde de fonctionnement, faible niveau de bruit et une bande passante adéquate pour accueillir le débit de données désiré. L'effet des variations de température sur la réponse du photodétecteur doit être minimal et le dispositif doit également avoir une longue durée de vie. Les photodiodes semiconducteurs sont petites, rapides, sensibles et peuvent fonctionner dans des gammes de longueurs d'onde différentes, ce qui les mettent les photodétecteurs les plus utilisés dans les systèmes de communications optiques sans fil commercialisés.

#### 1.6.2.2. Les critères de sélection des photodétecteurs dans les systèmes FSO

Comme dans le cas des sources optiques, le choix d'un type de détecteur dépend de l'application. La caractéristique de sensibilité doit correspondre à la longueur d'onde de transmission de l'émetteur. Les photodiodes APD sont beaucoup mieux pour les applications sur longues distances, sa grande sensibilité fournit une marge supplémentaire au lien. Toutefois, les photodiodes APD nécessitent une tension stable de haute polarisation, et elles sont plus chères que les diodes PIN.

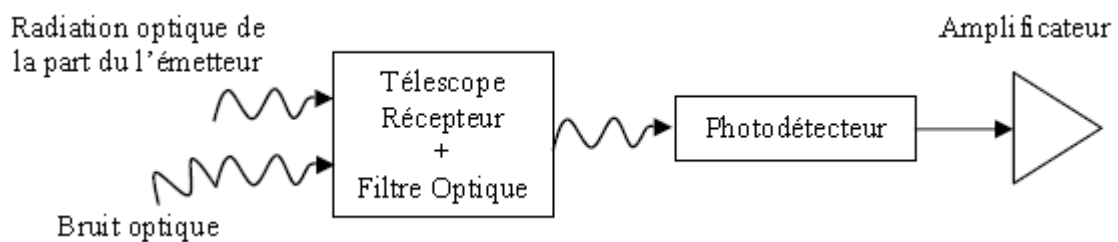
#### 1.6.2.3. Techniques de photodétection

La photodétection est le processus de conversion du rayonnement optique en un signal électrique dont le but est de récupérer les informations transmises à travers un canal. Au niveau de l'émetteur, les informations peuvent être modulées en fréquence, en phase ou en intensité du rayonnement émis par une source optique. Ce rayonnement modulé est alors transmis au récepteur via le canal atmosphérique. La surface de réception (télescope et filtre optique) concentre le rayonnement filtré sur la surface photodéetectrice dans le plan focal. Deux modes de détection sont envisageables pour capter un rayonnement électromagnétique : détection directe (ou incohérente) et détection hétérodyne (ou cohérente), qui diffèrent l'une de l'autre par les rayonnements auxquels ils s'adressent, leur montage, les caractéristiques du signal qu'elles délivrent, et les techniques de traitement associées. A cause de ces différences, qui sont nombreuses et importantes, le choix du

mode de détection est primordial dans la conception d'un récepteur FSO pour avoir une haute fiabilité.

#### *a. La détection directe*

Dans ce type de détection il n'y a pas d'utilisation d'un oscillateur local dans le processus de détection, et pour récupérer les informations par ce type de détection il est essentiel que les informations transmises soient associées à la variation de l'intensité du champ transmis, ainsi ce type de détection est également appelé détection d'enveloppe. Le schéma bloc d'un récepteur qui se base sur la détection directe est illustré sur la figure 1.09.



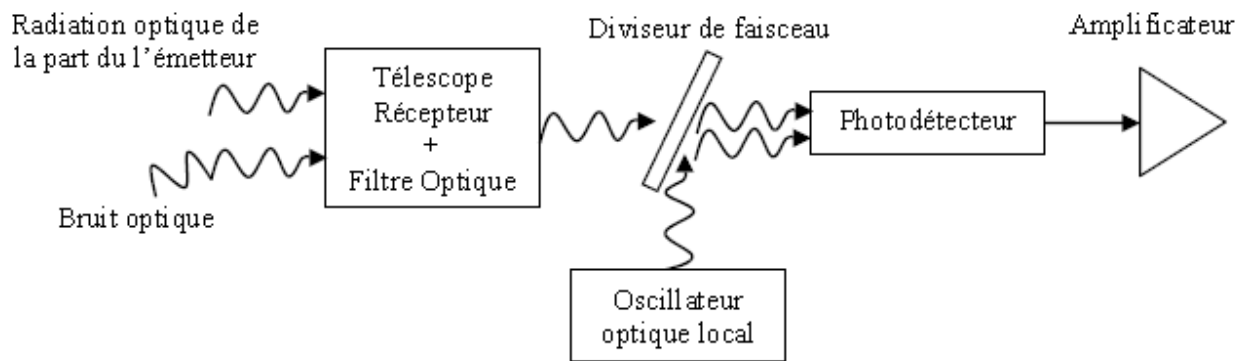
**Figure 1.09 :** Schéma de principe d'un récepteur de détection optique directe [19].

Les modulations multiniveaux (non binaire) compatibles avec la détection directe permettent une amélioration considérable en termes d'efficacité spectrale (efficacité de l'utilisation de la bande passante).

#### *b. La détection cohérente*

La détection cohérente ou la détection hétérodyne est le mode le plus répandu en radar et en radio; elle repose sur le mélange du rayonnement à détecter avec une onde de référence, ou «oscillateur local», créé au niveau du capteur. Ce type de détection est peu utilisé en optronique, car, comme son nom l'indique, il ne s'adresse qu'aux rayonnements cohérents, spatialement et spectralement, c'est à dire de bonne qualité en termes de surface d'onde et de stabilité en fréquence ; de plus, elle exige des montages interférométriques plus difficiles à réaliser en optique qu'en radar à cause de l'utilisation des petites longueurs d'onde. Dans ce type de détection un oscillateur local est utilisé pour générer un rayonnement optique à certaine fréquence/longueur d'onde. La fréquence de l'oscillateur local ne doit pas être la même que celle de la radiation reçue. Le schéma synoptique d'un récepteur cohérent est montré dans la figure 1.10.

Pour des raisons de complexité et de coûts, la détection non cohérente (ou détection directe) est préférée. Dans cette étude, nous ne considérons que les systèmes de détection non cohérents.



**Figure 1.10 :** Schéma de principe d'un récepteur de détection optique cohérente [19].

### 1.6.3 Caractéristiques des équipements FSO

Actuellement, le nombre de constructeurs des équipements de télécommunications FSO est très élevé, et une large variété de ces équipements existe sur le marché. Alors, dans le but d'éviter une description trop détaillée de ces différents produits, nous nous limitons aux paramètres généraux qui nous permettent de définir les caractéristiques globales de tout équipement FSO. Les paramètres principaux dont nous devons tenir compte pour la définition des liaisons optiques en espace libre sont successivement :

#### 1.6.3.1. La portée

La portée de ce type de liaison varie entre quelques dizaines de mètres et quelques kilomètres. Certains constructeurs donnent une portée maximale, d'autres précisent la portée typique pour différentes conditions météorologiques, et enfin quelques constructeurs proposent une portée recommandée, intégrant une marge par rapport à la valeur maximale. Ces valeurs doivent être considérées comme des ordres de grandeur et non pas comme des valeurs absolues.

#### 1.6.3.2. La sécurité

Elle est représentée par la classe laser, c'est un facteur important à prendre en compte dans la conception des systèmes de télécommunications optiques sans fil. Elle conditionne les modalités plus ou moins aisées pour l'installation et la maintenance de la liaison laser. Les paramètres à prendre en compte pour définir la classe laser sont : la longueur d'onde de transmission, la puissance d'émission et la forme du faisceau. Un certain nombre de paramètres secondaires est

également à prendre en compte pour le choix des systèmes FSO. Parmi ceux-ci nous pouvons citer successivement:

- La longueur d’onde de la transmission qui peut influencer la marge brute du système et par conséquent la qualité de service.
- Le type et le nombre d’émetteurs qui peuvent aussi influencer la marge brute du système. Un système à plusieurs émetteurs est moins vulnérable aux effets des scintillations atmosphériques.
- L’asservissement de pointage qui offre une meilleure protection aux chocs et aux vibrations mécaniques.
- Le coût du système qui constitue un critère très important pour les opérateurs afin d’assurer un maximum de rendement économique à partir de la liaison.

*Remarque :* Les principaux constructeurs qui alimentent le marché avec les équipements FSO sont: LightPointe, MRV, BridgeWave, fSONA, Canon, PAV, RAD, Cable Free et Plaintree.

## **1.7 Conclusion**

Avec l’augmentation des demandes en bande passante, l’absence d’une infrastructure à grande vitesse qui relie les clients professionnels et individuels, et l’augmentation des coûts et du temps de déploiement des réseaux à fibre ainsi que la nécessité d’avoir une meilleure sécurisation des réseaux pour des applications gouvernementales stimulent actuellement une plus large adoption des liaisons optiques sans fil.

Peu onéreux, simples à installer et à exploiter, non soumis à des réglementations contraignantes, les équipements de transmission laser se prêtent à presque toutes les configurations de réseaux et couvrent un grand nombre d’applications. Ils permettent de fournir une connectivité optique rapide, fiable et haut débit comparable aux débits de la fibre optique, tout ayant la souplesse du sans fil. Les fournisseurs de services peuvent déployer des solutions FSO où et quand nécessaire, comme ils l’entendent, dans n’importe quelle topologie, à une fraction du coût. Cette souplesse rend la solution FSO extrêmement attrayant.

Dans ce chapitre, les principales caractéristiques qui font la technologie FSO appropriée pour une utilisation dans le réseau d’accès ont été mises en évidence, et les grands défis ont également été introduits. Les domaines où les systèmes FSO ont été jugés aptes à fournir un pont de données ont

également été évoqués, ou probablement l'une des utilisations les plus convaincante et opportune de l'optique en espace libre est de fournir une solution au problème du « dernière kilomètre ».

## CHAPITRE 2

### MODELES MATHEMATIQUES DE LA PROPAGATION DU RAYONNEMENT LASER DANS L'ATMOSPHERE

#### 2.1 Introduction

La conception d'un système de télécommunication optique en espace libre, nécessite une bonne connaissance des propriétés optiques de l'atmosphère. En effet, la performance de tout système optronique est déterminée non seulement par ses caractéristiques techniques intrinsèques résultant de sa conception et de la technologie utilisée, mais également par son comportement dans son environnement opérationnel. Dans ce cadre, la conception des réseaux optiques sans fil offre des défis qui ne sont pas présents dans les réseaux basés sur des fibres optiques. La disponibilité des liaisons optiques sans fil dépend d'une variété de facteurs, y compris la fiabilité des équipements et la conception du réseau, mais ceux-ci sont bien connus et assez quantifiables, le plus grand défi inconnu est l'effet de l'atténuation atmosphérique (brouillard, pluie, etc.), même une atmosphère propre et claire est composée de molécules d'oxygène, d'azote et d'autre gaz. Ces molécules peuvent diffuser et/ou absorber les photons lumineux qui se propagent dans l'atmosphère, et par conséquent atténuent le signal lumineux. Ainsi, il apparaît utile de connaître comment ces systèmes optroniques se comportent vis à vis de telle ou de telle situation climatique ou météorologique et en fonction des conditions présentes dans l'environnement. C'est pourquoi l'industrie des systèmes FSO essaye de trouver des moyens pour compenser les effets indésirables introduits par les différents phénomènes atmosphériques et par l'illumination solaire intense en faisant le choix approprié de la longueur d'onde et en utilisant des solutions de secours. Tout rayonnement électromagnétique utilisé dans n'importe quel système de communication est affecté par l'atmosphère. La bonne connaissance du milieu de propagation, de ses caractéristiques optiques ainsi que celles des particules qui peuvent être présentes nous permet de comprendre l'effet de ce milieu sur la propagation de la lumière afin de pouvoir prédire l'atténuation et quantifier les pertes qu'elle va subir en terme de puissance optique. Elle nous permet aussi de déterminer, de comprendre et d'optimiser les effets de l'atmosphère sur la transmission en espace libre. L'atmosphère est composée principalement d'azote ( $N_2$ , 78 %), de l'oxygène ( $O_2$ , 21%), et de l'argon ( $Ar$ , 1 %), et un certain nombre d'autres éléments, tels que l'eau ( $H_2O$ , de 0 à 2 %) et du dioxyde de carbone ( $CO_2$ , de 0,01 à 0,1 %), présents dans des plus petites quantités [20]. Il y a aussi des petites particules qui contribuent à la composition de l'atmosphère; il s'agit notamment des particules produites par la combustion, de la poussière et les débris. La combinaison de tous

ces éléments comprenant l'atmosphère contribue aux phénomènes qui affectent les rayons lumineux. L'atténuation atmosphérique est causée par un certain nombre de phénomènes sélectifs en longueur d'onde [21] qui sont : l'absorption moléculaire caractérisée par une forte dépendance spectrale, la diffusion moléculaire, l'extinction (absorption et diffusion) par les particules en suspension (aérosols) et les particules en précipitation (pluie, neige...) ainsi que la turbulence atmosphérique due aux variations spatio-temporelles de l'indice de réfraction de l'air.

Dans ce chapitre, nous allons voir l'influence de l'atmosphère terrestre comme milieu de propagation sur la transmission des signaux optiques laser en mettant l'accent sur les phénomènes physiques qui sont l'absorption, la diffusion et la turbulence optique.

## **2.2 Composition et structure générale de l'atmosphère terrestre**

L'atmosphère terrestre est formée d'une série de couches gazeuses concentriques entourant la terre. Nous parlons de l'homosphère entre 0 et 80 à 90 km d'altitude, au-delà nous avons l'hétérosphère. L'homosphère est constituée de trois couches [22]: la troposphère, la stratosphère et la mésosphère. Dans le cas des télécommunications optiques atmosphériques, on s'intéresse particulièrement à la troposphère car la majorité des systèmes de communications basés sur des liaisons FSO est déployée dans cette couche où se produit l'essentiel des phénomènes météorologiques, cette couche contient environ 75% de la masse atmosphérique de la terre [22].

La propagation du rayonnement optique dans l'atmosphère terrestre est influencée par : le mélange atmosphérique gazeux dû à la composition chimique de l'atmosphère, la présence de petites particules en suspension de taille variable (0, 01 à 100  $\mu\text{m}$  environ) [21] qui sont les aérosols, les hydrométéores tels que la pluie et la neige, les lithométéores tels que la poussière, la fumée et le sable ainsi que les variations spatio-temporelles de l'indice de réfraction de l'air, à l'origine, en particulier de la scintillation.

### **2.2.1 Composition gazeuse**

Les constituants gazeux de l'atmosphère sont classés en deux catégories : les constituants à proportion volumique fixe et ceux à proportion volumique variable.

#### **2.2.1.1. Les constituants à proportion volumique fixe**

Les constituants à proportion volumique fixe sont majoritaires et répartis uniformément jusqu'à une altitude de plus de 15 km selon la latitude. On peut citer par exemple :  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $Ar$ ,  $CO_2$ , ...

Dans le domaine du visible, dans l'infrarouge autour de la longueur d'onde de 15  $\mu\text{m}$  et pour des transmissions atmosphériques au niveau du sol, seul parmi ces constituants, le  $\text{CO}_2$  présente des bandes d'absorption importantes.

#### 2.2.1.2. Les constituants à proportion volumique variable

Les constituants à proportion volumique variable sont minoritaires et leur concentration varie en fonction de la situation géographique (latitude, altitude, région continentale ou maritime), de l'environnement (urbain, rural ou maritime) et des conditions météorologiques. Le principal constituant de cette catégorie est la vapeur d'eau ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Sa concentration dépend des paramètres climatiques et météorologiques. A titre d'exemple, dans les zones maritimes sa concentration peut atteindre 2%, tandis qu'au-delà de 20 km d'altitude sa concentration est nulle. La concentration en vapeur d'eau se mesure à partir de l'hygrométrie atmosphérique. Un autre constituant à proportion variable est l'ozone ( $\text{O}_3$ ) dont la concentration varie également en fonction de l'altitude (teneur maximale à 25 km), la latitude et la saison. Il présente une absorption importante dans le domaine de l'ultraviolet et dans l'infrarouge autour de la longueur d'onde de 9,6  $\mu\text{m}$ .

#### 2.2.2 *Les particules en suspension (aérosols atmosphériques)*

Les aérosols atmosphériques sont de fines particules solides en suspension dans l'atmosphère, à l'exception des gouttelettes d'eau et des cristaux de glace qui peuvent composer les brouillards et les nuages. Les aérosols existent même dans les atmosphères les plus claires. La dimension des particules varie entre 0,001 et 100  $\mu\text{m}$ . La concentration des particules des aérosols varie fortement d'une région à l'autre, au cours du temps et en fonction des conditions atmosphériques et climatologiques. L'exemple le plus marquant, concernant ces variations, apparaît en présence de pluie : une augmentation importante de la visibilité est constatée immédiatement après la pluie. En effet, les aérosols sont capturés par la pluie qui les fixe aux gouttes d'eau, entraînant par conséquent une diminution de la concentration des aérosols initialement présents dans l'atmosphère terrestre. Ce phénomène est connu sous le nom de Lessivage Atmosphérique [23]. La visibilité ( $v$ ) est un paramètre souvent utilisée comme un indicateur de cette concentration.

##### 2.2.2.1. Les effets des aérosols sur la propagation du rayonnement optique dans l'atmosphère

L'intensité de la diffusion et de l'absorption du rayonnement par les aérosols dépend de leurs caractéristiques physiques et chimiques, elle dépend également de la longueur d'onde du rayonnement incident. Contrairement aux ondes radioélectriques (HF au millimétrique), les

aérosols présentent une grande influence sur la propagation des ondes visibles et infrarouge parce que leur dimension est voisine de la longueur d'onde correspondante. Les aérosols jouent un rôle majeur dans la perception de la qualité de l'air (réduction de la visibilité), ils peuvent altérer considérablement la transmission du rayonnement optique, comme le prouve par exemple l'importante diminution de la visibilité en présence de pollution ou de brouillard dans l'atmosphère. Afin d'introduire les effets des aérosols sur la propagation du rayonnement optique dans l'atmosphère, la caractérisation de leur nature et de leur distribution constitue un défi auquel est confrontée actuellement la recherche dans le domaine lié à l'atmosphère. La capacité de mesurer les caractéristiques d'un milieu de propagation contenant des aérosols est cruciale pour la mise au point et l'utilisation adéquate de tout matériel de communication ou de surveillance basé sur la propagation du rayonnement optique en espace libre ainsi que pour le déploiement de contre-mesures appropriées.

#### 2.2.2.2. Sources et mécanismes de formation des aérosols

Il existe plusieurs sources de particules aérosolaires mais nous les distinguons en deux sources principales : les sources naturelles qui produisent des particules telles que les cristaux de sels marins, la poussière terrestre, les débris végétaux, le pollen, les émissions volcaniques ainsi que celles produites par les feux de brousse et les sources reliées à l'activité humaine produisant les aérosols artificiels tels que la poussière émise par les chantiers et les différentes particules émises par les différents moyens de transports et de chauffage.

Les aérosols sont des particules en suspension qui présentent des vitesses de chute variables dans l'atmosphère (par exemple pour une particule de  $0,01\ \mu\text{m}$  la vitesse moyenne de chute est de  $0,3\ \text{m/mois}$  alors que pour une particule de  $10\ \mu\text{m}$  cette vitesse passe à  $0,3\ \text{m/minute}$ ) [6].

Selon leurs processus de formation nous classons les aérosols en deux catégories : les aérosols primaires, c'est à dire émis directement dans l'atmosphère sous forme particulaire (cendres volcaniques, embruns marins, poussières désertiques, poussières industrielles,...) et les aérosols secondaires, c'est à dire issus de la transformation chimique d'une phase gazeuse en autre phase particulaire par différents processus (sulfates, composés organiques, etc.).

Selon l'ordre de grandeur du rayon  $r$  de la particule (supposée sphérique), nous distinguons trois classes : les particules d'Aitken et les particules ultrafines: ce sont des aérosols très fins dans la gamme de taille entre  $0,001$  et  $0,1\ \mu\text{m}$ , ils constituent des noyaux de condensation dans le

processus de formation des nuages et des brouillards, les particules fines (mode d'accumulation) : ce sont des particules qui appartiennent à la gamme de taille entre 0,1 et 1  $\mu\text{m}$ , les aérosols atmosphériques de ce mode sont beaucoup plus nombreux que ceux des autres modes et enfin les grosses particules (mode grossier) : ce sont des particules dont la taille varie entre 1 et 100  $\mu\text{m}$ , ces particules sont essentiellement des particules primaires, elles sont beaucoup moins nombreuses que les autres particules et elles ne peuvent rester dans l'atmosphère à l'état libre que pendant une durée limitée, dans une région localisée au voisinage des sources d'émission.

La concentration des particules en suspension dans l'air est fortement dépendante de la région, avec des concentrations beaucoup plus élevées dans des endroits maritimes tandis que des concentrations plus faibles dans les zones continentales. A titre d'exemple dans un milieu marin les particules sont constituées essentiellement d'eau et de cristaux de sel alors que dans les milieux ruraux elles sont constituées en partie de poussières soulevées par le vent [20].

### **2.3 Transmission en espace libre**

Dans le cadre de l'étude des effets de l'atmosphère sur la propagation du rayonnement, la définition d'un certain nombre de phénomènes optiques tels que l'absorption, la diffusion et l'extinction est nécessaire. Lors de sa propagation à travers l'atmosphère, le rayonnement électromagnétique subit une dégradation qui peut être très importante et critique et qui est liée à son interaction avec les différents constituants de l'atmosphère. Tout rayonnement électromagnétique utilisé dans n'importe quel système de communication est affecté par l'atmosphère comme le montre la figure 2.01 [6]. D'autre part, ces effets sont toutefois différents selon le système utilisé : faisceaux hertziens, microondes, faisceaux laser, etc. Ainsi, la longueur d'onde du signal transmis va permettre de déterminer, de comprendre et d'optimiser les effets de l'atmosphère sur la transmission en espace libre. L'optimisation de ces effets passe principalement par le choix d'une longueur d'onde adéquate présentant une atténuation minimum du signal transmis dans les différentes conditions atmosphériques. Parmi ces dernières, le brouillard qui est un facteur très important dans la dégradation du rayonnement électromagnétique dans la gamme des ondes visibles et infrarouge : la taille de ses particules est en effet du même ordre de grandeur que la longueur d'onde utilisée dans les systèmes de télécommunications optiques sans fil. Ainsi, une relation entre les caractéristiques du brouillard (densité, visibilité, etc.) et l'atténuation du signal transmis à une longueur d'onde donnée, s'avère très importante afin de prédire la performance des systèmes optiques sans fil sous l'effet du brouillard.

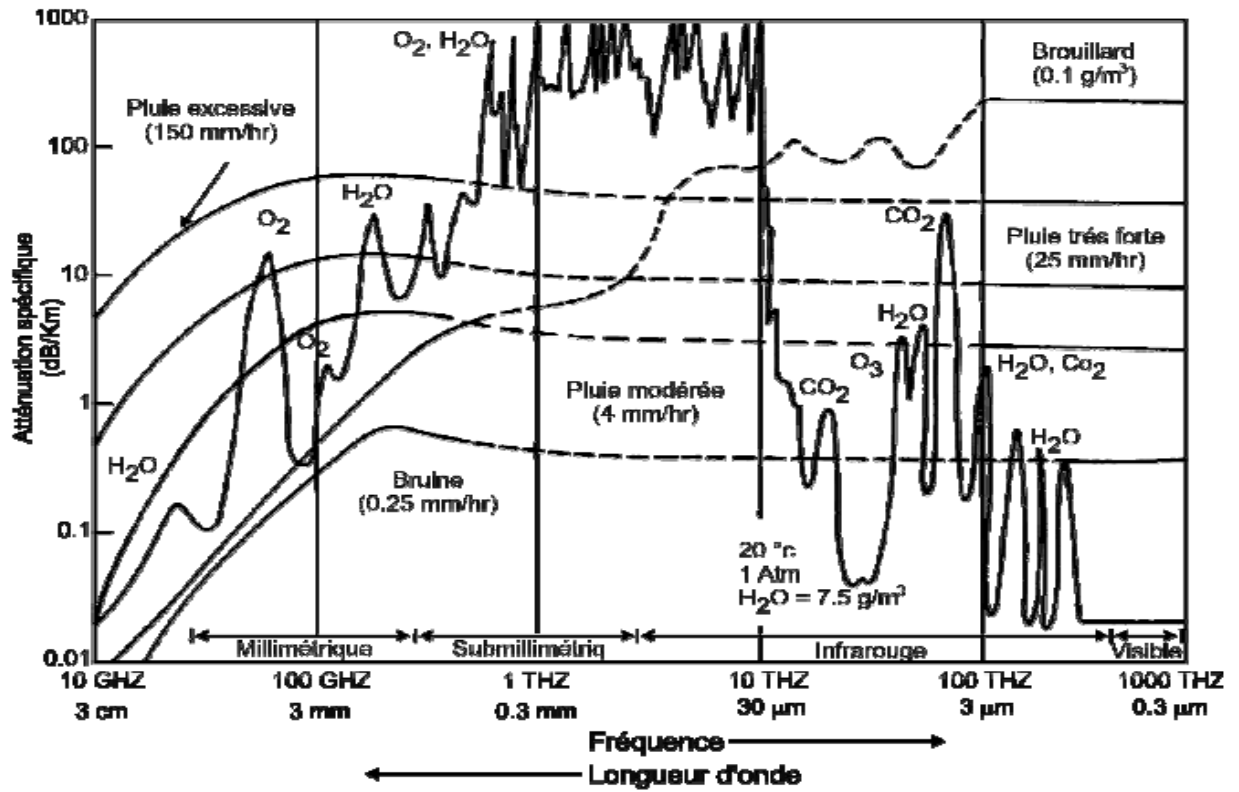


Figure 2.01 : Spectre d'atténuation atmosphérique montrant l'effet de certains constituants de l'atmosphère sur l'atténuation ainsi que celui de la pluie et du brouillard [6].

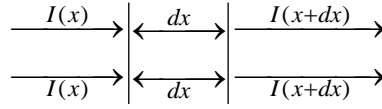
### 2.3.1 Absorption atmosphérique

L'absorption atmosphérique résulte de l'interaction entre les photons du rayonnement incident et les atomes ou molécules de l'atmosphère terrestre. Ceci conduit à la disparition du photon incident, à l'élévation de la température de l'atome ou de la molécule tandis que le nombre de photons du rayonnement se réduit tout au long du parcours, ainsi que l'intensité du rayonnement.

Considérons un faisceau lumineux de longueur d'onde  $\lambda$  qui traverse un milieu absorbant d'épaisseur  $dx$ . Du fait des propriétés absorbantes du milieu, le nombre des photons du rayonnement se réduit tout au long du parcours. Ainsi, l'intensité du rayonnement à la position  $x+dx$ , comme illustrée dans la figure 2.02, s'écrit en fonction de l'intensité à la position  $x$  de la façon suivante [21] :

$$I(\lambda, x+dx) = I(\lambda, x) - dI_a(\lambda, x) \quad (2.01)$$

Où la quantité  $dI_a(\lambda, x)$  correspond à l'intensité de la lumière absorbée par le milieu absorbant. Cette intensité absorbée est proportionnelle à l'intensité incidente  $I(\lambda, x)$  à l'épaisseur du milieu traversé  $dx$  et à un paramètre spectral qui représente l'absorption du milieu à cette longueur d'onde  $(\lambda, x)$ .



**Figure 2.02 :** Absorption de la lumière par un milieu absorbant d'épaisseur  $dx$

Ainsi, on peut relier l'intensité de la lumière absorbée par le milieu  $dI_a(\lambda, x)$  et l'intensité de lumière incidente  $I(\lambda, x)$  par la relation suivante :

$$dI_a(\lambda, x) = \alpha(\lambda, x)I(\lambda, x)dx \quad (2.02)$$

Pour un parcours d'épaisseur  $X$  et à partir des deux équations (2.01) et (2.02) on peut écrire :

$$I(\lambda, X) = I(\lambda, 0) \exp \left[ - \int_0^X \alpha(\lambda, x) dx \right] \quad (2.03)$$

On définit alors la transmission spectrale du milieu par:

$$\tau_a(\lambda, X) = \frac{I(\lambda, X)}{I(\lambda, 0)} = \exp \left[ - \int_0^X \alpha(\lambda, x) dx \right] \quad (2.04)$$

Si le milieu de propagation est homogène, le coefficient d'absorption  $\alpha(\lambda, x)$  sera indépendant de  $x$  et par la suite la transmission du milieu s'écrit sous la forme suivante :

$$\tau_a(\lambda, X) = \exp[-\alpha(\lambda)X] \quad (2.05)$$

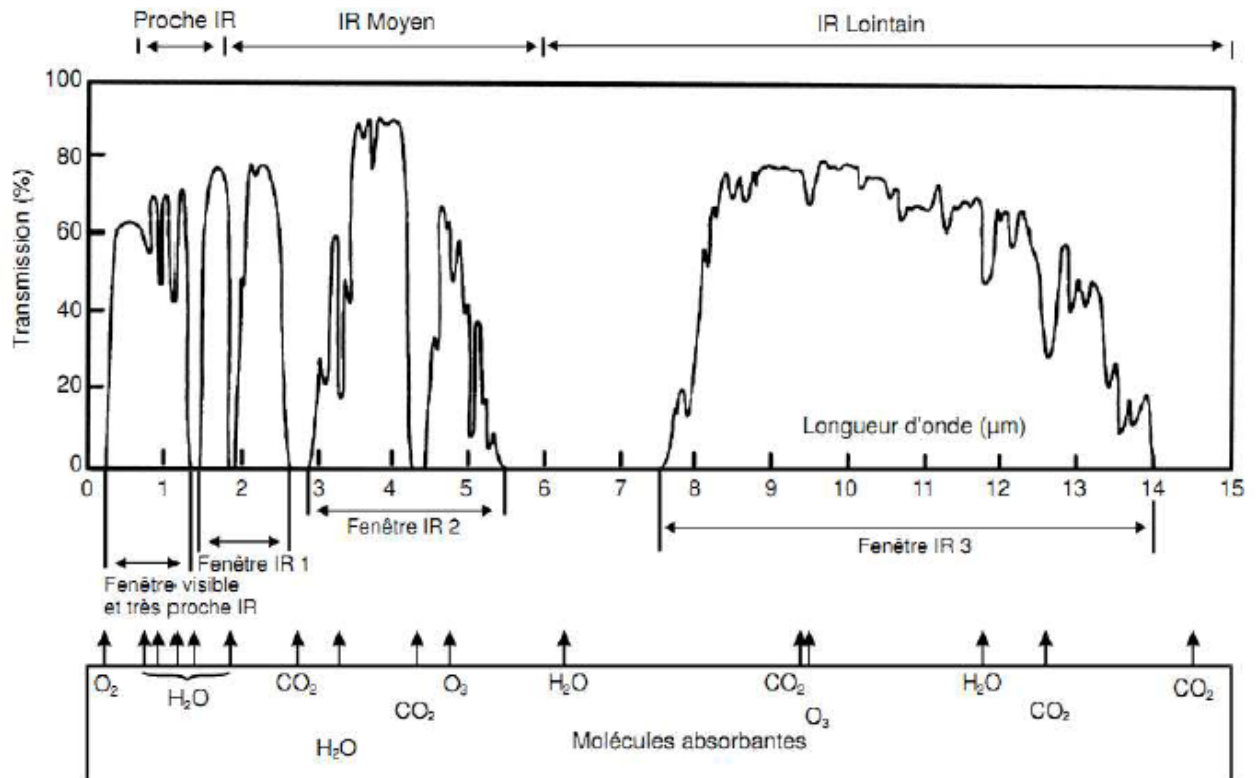
*Remarque :* Les absorbants atmosphériques peuvent être classés en deux catégories générales: les absorbeurs moléculaires et les absorbeurs aérosolaires.

#### 2.3.1.1. Absorption moléculaire

L'absorption moléculaire est un phénomène sélectif lié à la composition moléculaire de l'atmosphère ( $N_2, O_2, H_2, H_2O, CO_2, O_3, Ar$ , etc.), où le coefficient d'absorption moléculaire

dépend de la nature et du type des molécules absorbantes ainsi que de leur concentration comme le montre la figure 2.03 [24] avec des zones transparentes dites fenêtres de transmission atmosphérique et des zones opaques ou fenêtres de blocage atmosphérique.

L'absorption provoque une transition (ou excitation) dans les molécules de la particule à partir d'un niveau d'énergie inférieur à un niveau supérieur. La seule lumière qui peut être absorbée est celle qui a une énergie capable de créer des transitions d'un niveau d'énergie à un autre.



**Figure 2.03 :** Transmission à travers l'atmosphère terrestre en fonction de la longueur d'onde pour un trajet horizontal de 1800 m [6].

Même s'il n'est pas possible de changer la physique de l'atmosphère, il est possible de profiter des fenêtres atmosphériques en choisissant les longueurs d'onde de transmission convenables. Pour assurer une quantité minimale d'atténuation du signal à cause de diffusion ou d'absorption, les systèmes FSO fonctionnent dans les fenêtres atmosphériques dans la gamme infrarouge du spectre. Comme indiqué dans le premier chapitre, les systèmes FSO disponibles dans le commerce fonctionnent dans les fenêtres proche IR spectrales situées autour de 850 nm et 1550 nm. D'autres fenêtres existent dans les gammes de longueurs d'onde entre 3-5 μm et 8-14 μm [25]. Toutefois,

leur utilisation commerciale est limitée par la disponibilité des composants et des difficultés liées à la mise en œuvre pratique, comme la basse température de refroidissement.

La figure 2.03 présente les principales fenêtres de transmission pour la partie du spectre allant jusqu'à 15  $\mu\text{m}$ . Les molécules responsables de chaque bande d'absorption sont indiquées au bas de cette figure. Il apparaît que, dans cette partie du spectre les molécules d'eau ( $H_2O$ ) et de dioxyde de carbone ( $CO_2$ ) sont les molécules les plus absorbantes.

Les fenêtres de transmission dans la gamme optique sont [26]: Visible et IR très proche: de 0.4 à 1.4  $\mu\text{m}$ , Proche IR ou IR I: de 1.4 à 1.9  $\mu\text{m}$  et 1.9 à 2.7  $\mu\text{m}$ , moyen IR ou IR II: de 2.7 à 4.3  $\mu\text{m}$  et 4.5 à 5.2  $\mu\text{m}$ , IR loin ou IR III: de 8 à 14  $\mu\text{m}$ , Extrême IR ou IR IV: de 16 à 28  $\mu\text{m}$ .

Les molécules gazeuses ont des niveaux d'énergie quantifiés propre à chaque espèce, et peut absorber de l'énergie (ou photons) sous l'influence d'un rayonnement électromagnétique incident et la transition d'un niveau d'énergie initial  $e_i$  à un niveau d'énergie supérieur  $e_f$ . L'énergie du rayonnement est alors atténuée par la perte d'un ou de plusieurs photons. Ce processus ne se produit que si la fréquence de l'onde incidente correspond exactement à l'une des fréquences de résonance de la molécule considérée, donnée par:

$$\nu_o = \frac{e_f - e_i}{h} \quad (2.06)$$

Où :  $\nu_o$  est la fréquence de l'onde incidente

$h$  est la constante de Planck.

### 2.3.1.2. Absorption aérosolaire

Comme indiqué précédemment, les aérosols sont présents naturellement sous la forme de poussière, des particules de sel marin, poussière du désert, et des débris volcaniques. Ils peuvent également être créés à la suite des activités humaines, la conversion chimique de traces de gaz à particules solides et liquides et les déchets industriels. Ces particules peuvent être de tailles variables; de la poussière fine moins de 0,1  $\mu\text{m}$  à particules géant de plus de 10,0  $\mu\text{m}$ . Il a été déterminé que 80% de la masse d'aérosol est contenue dans la zone la plus basse de l'atmosphère. Toutefois, ces particules absorbent également dans les longueurs d'onde infrarouges.

### 2.3.2 Diffusion atmosphérique

La diffusion atmosphérique résulte de l'interaction d'une partie du rayonnement incident avec les atomes et/ou les molécules dans le milieu de propagation, ce qui provoque une redistribution angulaire de cette partie du rayonnement avec ou sans modification de la longueur d'onde incidente. L'intensité du rayonnement mesurée à la position  $x+dx$  s'écrit en fonction de l'intensité mesurée à la position  $x$  selon l'équation (2.01). Comme le cas de l'absorption, pour un parcours d'épaisseur  $X$  et à partir des deux équations (2.01) et (2.02) on peut écrire :

$$I(\lambda, X) = I(\lambda, 0) \exp \left[ - \int_0^X \beta(\lambda, x) dx \right] \quad (2.07)$$

Où  $\beta(\lambda, x)$  est le coefficient de diffusion.

On définit alors la transmission spectrale du milieu par:

$$\tau_a(\lambda, X) = \frac{I(\lambda, X)}{I(\lambda, 0)} = \exp \left[ - \int_0^X \beta(\lambda, x) dx \right] \quad (2.08)$$

Où  $\beta(\lambda, x)$  est le coefficient de diffusion.

Si le milieu diffuse à la même longueur d'onde que le rayonnement incident, on parle de diffusion de Rayleigh ou de diffusion de Mie (selon la taille de la particule), sinon on parle de la diffusion de Raman. Nous signalons que dans le cas de la diffusion, la lumière diffusée ne disparaît pas localement comme dans le cas de l'absorption.

La diffusion est un phénomène qui dépend fortement du rapport entre le rayon de la particule (supposée sphérique) et la longueur d'onde du rayonnement incident ainsi que de la nature de la particule (via son indice de réfraction) et sa taille :

Quand la taille de la particule diffusante est relativement petite par rapport à la longueur d'onde du rayonnement incident ( $r < \lambda/10$ ), l'intensité du rayonnement diffusée est la même dans les deux directions. Ce type de diffusion est connu sous le nom de la diffusion Rayleigh [27].

Quand la taille des particules devient plus grande telle que ( $\lambda/10 \leq r \leq 10\lambda$ ), la distribution angulaire de l'intensité de diffusion devient plus complexe avec plus d'énergie diffusée en avant. Ce type de diffusion est décrit par la théorie de diffusion de Mie [27].

Quand la taille des particules est très grande par rapport à la longueur d'onde ( $r > 10\lambda$ ) la diffusion de la lumière est dite non sélective ou géométrique. Ce type de diffusion ne dépend pas de la longueur d'onde incidente.

Par rapport aux longueurs d'onde infrarouges habituellement utilisées dans les liaisons optiques en espace libre, le rayon moyen des particules de brouillard est d'environ la même taille, c'est la raison pour laquelle le brouillard est le principal ennemi des systèmes FSO. Les particules de pluie et de neige, d'autre part, sont plus grandes, et donc présentent de manière significative moins d'effet sur la disponibilité de ces liaisons.

#### 2.3.2.1. Diffusion moléculaire ou diffusion de Rayleigh

Les molécules des différents constituants gazeux de l'atmosphère contribuent également à l'atténuation du rayonnement électromagnétique par diffusion de la lumière. Ce type de diffusion concerne les particules de taille très petite par rapport à la longueur d'onde. Dans ce cas on parle de la diffusion de Rayleigh. Toutefois, pour les systèmes FSO qui fonctionnent avec une longueur d'onde proche infrarouge, l'impact de la diffusion de Rayleigh sur le signal de transmission peut être négligé, car cette diffusion affecte principalement les longueurs d'onde ultraviolettes et les longueurs d'onde visibles.

#### 2.3.2.2. Diffusion de Mie

La diffusion de Mie se produit pour des particules de la taille de la longueur d'onde. Par conséquent, dans la gamme de longueur d'onde proche de l'infrarouge, les particules de brouillard, de la brume et de la pollution (les aérosols) sont les principaux contributeurs au processus de diffusion de Mie. Une partie de l'énergie diffusée peut être rediffusée de nouveau une ou plusieurs fois avant de quitter le milieu diffusant, ceci est connu sous le nom de la diffusion multiple. Dans la plupart des cas, l'effet de la diffusion multiple sur l'intensité du faisceau incident est à peine perceptible surtout dans une atmosphère instable. Cependant l'effet de cette diffusion multiple devient très important et doit être pris en compte, en particulier dans les milieux à très forte concentration de centres diffuseurs (nuages). La diffusion dépend des caractéristiques de la particule, de sa taille par rapport à la longueur d'onde du rayon interceptée, son indice de réfraction, et son isotropie (la propriété de molécules d'avoir des caractéristiques physiques identiques dans toutes les directions) [28]. Toutes ces caractéristiques sont nécessaires pour un calcul précis de la valeur d'atténuation causée par la diffusion, mais ce ne sont pas des valeurs

faciles à trouver. Une autre façon de calculer l'atténuation due à la diffusion a été déjà présentée, cette méthode est basée sur la visibilité plutôt que sur les propriétés des particules, qui ne sont pas toujours connues. Dans le domaine visible et proche infrarouge, le coefficient de diffusion moléculaire  $\beta_m$  est négligeable devant le coefficient de diffusion aérosolaire  $\beta_\lambda$  [29]. A partir du paramètre de visibilité, qui peut être obtenu à partir des stations météorologiques ou des aéroports, une formule simplifiée empirique [26], utilisée dans la communauté FSO pour une longue période, pour calculer le coefficient d'atténuation due à la diffusion de Mie est donnée par :

$$\beta_\lambda = \frac{10 \log_{10}(T_{th})}{v} \left( \frac{\lambda}{\lambda_0} \right)^{-q} \quad (2.09)$$

Où :  $v$  est la visibilité,

$\lambda$  est la longueur d'onde,

$T_{th}$  est le seuil visuel.

Le coefficient  $q$  a fait l'objet de nombreux travaux expérimentaux. Il a été établi empiriquement par Kruse [26].

$$q = \begin{cases} 1.6 & \text{si } v > 50 \text{ km} \\ 1.3 & \text{si } 6 \text{ km} < v < 50 \text{ km} \\ 0.585v^{1/3} & \text{si } v < 6 \text{ km} \end{cases} \quad (2.10)$$

Cette dernière relation a été largement utilisée dans la littérature dans le but de déterminer les bilans de liaisons des équipements FSO. A partir des équations (2.09) et (2.10) il devient évident que, pour n'importe quelles conditions météorologiques, plus la longueur d'onde augmente, plus l'atténuation diminue, ce qui implique une préférence à 1550 nm par rapport aux autres longueurs d'onde proposées pour les équipements FSO. En particulier, ceci est valable pour des valeurs de visibilité inférieures à 1 km, c'est à dire en présence de brouillard. Ainsi, une étude a été établie empiriquement par Kim [26] qui a proposé une autre expression pour le paramètre  $q$ , donnée par:

$$q = \begin{cases} 1.6 & \text{si } v > 50 \text{ km} \\ 1.3 & \text{si } 6 \text{ km} < v < 50 \text{ km} \\ 0.16v + 0.34 & \text{si } 1 \text{ km} < v < 6 \text{ km} \\ v - 0.5 & \text{si } 0.5 \text{ km} < v < 1 \text{ km} \\ 0 & \text{si } v < 0.5 \text{ km} \end{cases} \quad (2.11)$$

L'équation (2.11) implique une indépendance de l'atténuation atmosphérique par rapport à la longueur d'onde en présence d'un brouillard dense réduisant la visibilité en dessous de 500 m. Il en résulte qu'à travers un brouillard dense (visibilité  $\leq 500$  m), un équipement fonctionnant à 1550 nm subit la même atténuation qu'un équipement fonctionnant à 690 ou à 780 nm. Au-delà de 500 m de visibilité, cette relation respecte la conclusion déduite de (2.10), à savoir une atténuation plus faible pour des longueurs d'onde élevées.

### 2.3.3 Extinction atmosphérique

Le rayonnement électromagnétique subit une dégradation qui peut être très importante lors de sa propagation à travers l'atmosphère. Cette dégradation est liée à son interaction avec les molécules de gaz et les aérosols qui constituent l'atmosphère. Souvent le milieu de propagation est à la fois un milieu absorbant et diffusant et dans ce cas on parle d'extinction. La dégradation du rayonnement électromagnétique dans l'atmosphère ou l'extinction atmosphérique résulte de deux processus physiques qui sont l'absorption et la diffusion et qui s'appliquent aussi bien aux constituants moléculaires qu'aux diverses particules en suspension dans l'air. On définit alors le coefficient d'extinction  $\gamma(\lambda, x)$  de la façon suivante :

$$\gamma(\lambda, x) = \alpha(\lambda, x) + \beta(\lambda, x) \quad (2.12)$$

Ainsi, la transmission spectrale globale s'écrit de la façon suivante :

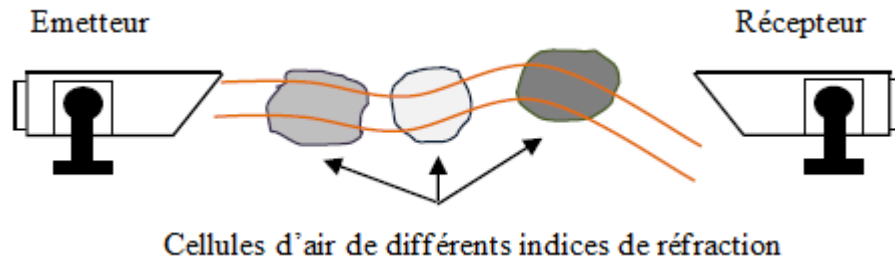
$$\tau(\lambda, X) = \exp \left[ - \int_0^X \gamma(\lambda, x) dx \right] \quad (2.13)$$

Cette dernière est connue aussi par la loi de Beer.

Les longueurs d'onde avec lesquelles fonctionnent en général les équipements FSO à savoir 690, 780, 850 et 1550 nm sont situées dans des fenêtres de transmission atmosphérique où l'absorption par les molécules de l'atmosphère est négligeable [30].

### 2.3.4 La turbulence

Le désert peut paraître l'endroit parfait pour un système de communication optique sans fil, cela est certainement vrai dans la mesure où l'atténuation de l'atmosphère est concerné.



**Figure 2.04 :** *Cellules d'air avec différents indices de réfraction dans le trajet d'une liaison FSO*

Toutefois, dans les climats chauds et secs, la turbulence peut causer des problèmes avec la transmission. Comme le sol se réchauffe par le soleil, l'air se réchauffe aussi, certaines cellules d'air ou de poches d'air comme illustrées sur la figure 2.04 se réchauffent plus que les autres, cela provoque des changements dans l'indice de réfraction, qui à son tour modifie le chemin que la lumière prend dans sa propagation à travers l'air. Le changement d'indice de réfraction semble suivre un mouvement aléatoire parce que ces poches d'air ne sont pas stables dans le temps ou dans l'espace [31]. La méthode de calcul de l'atténuation due à la turbulence, le brouillard et la pluie sera évoquée dans le dernier chapitre.

## 2.4 Conclusion

Depuis quelques années, afin de répondre aux besoins croissants en matière de télécommunications à haut débit et à faible coût, on assiste à un certain regain d'intérêt pour les liaisons optiques sans fil. A la différence des fibres optiques et des systèmes de communication utilisant les faisceaux hertziens, les FSO sont des systèmes facilement déployables et réutilisables dont le coût du déploiement est équivalent au cinquième de celui requis pour le déploiement des fibres optiques. Le principal inconvénient d'utilisation de tel systèmes de télécommunication est la forte influence que peut jouer l'atmosphère sur la propagation du rayon optique et donc sur la disponibilité et la fiabilité du système. L'effet de l'atmosphère terrestre sur la propagation d'un rayonnement laser est dû d'une part, à sa composition chimique et d'autre part, à la présence de différents types de particules en suspension dans l'air. Les différentes conditions météorologiques telles que le brouillard et la présence de différents types de précipitations peuvent réduire

considérablement la transmission du rayonnement en espace libre, ce qui fait qu'une bonne connaissance de ces effets sur la performance d'un lien optique sans fil présente une grande importance lors de la conception de l'émetteur et du récepteur d'un système optique sans fil. Dans le présent chapitre on a décrit la propagation d'un rayonnement optique dans l'atmosphère, en détaillant sa structure générale, sa composition et ses caractéristiques physiques, et les différents phénomènes physiques qui influencent les rayons optiques durant la propagation.

**CHAPITRE 3**  
**ETUDE DE PERFORMANCE DES TECHNIQUES DE MODULATION**  
**UTILISEES PAR LES SYSTEMES FSO SOUS DIFFERENTES INTENSITES DE**  
**BROUILLARD**

**3.1 Introduction**

Suite à la demande croissante d'un système de communication de haute performance à un coût raisonnable et complexité acceptable, le choix du format de modulation est l'un des facteurs principaux dans la réalisation d'un tel système. En raison de la complexité et du coût des techniques de modulation cohérente comme la modulation de phase ou de fréquence [32], la technique de modulation la plus pratique dans les systèmes de communications optiques sans fil est la modulation d'intensité à détection directe (IM/DD) [33], également appelée détection « non cohérente ». En effet, les systèmes de modulation (IM/DD) sont plus simples et moins chers que les systèmes de modulation cohérente, l'idée réside dans la transmission des informations sur la puissance instantanée du signal porteur. Au niveau du récepteur, les photons formant les impulsions optiques sont reçus par un photodétecteur (ADP ou PIN) qui réagit avec la puissance instantanée du signal reçu en générant un courant électrique proportionnel à cette puissance. Comme la puissance optique moyenne émise est toujours limitée dans les systèmes de télécommunications optiques sans fil, la performance des techniques de modulation est souvent jugée selon la puissance optique moyenne nécessaire pour atteindre un taux d'erreur souhaité à un débit de données défini. Il est très souhaitable que la technique de modulation soit efficace au point de vue puissance. Cependant, ce n'est pas le seul facteur décisif dans le choix d'une technique de modulation, la complexité de la conception de l'émetteur et du récepteur, le débit de données, la synchronisation et le besoin en bande passante sont tous aussi d'une grande importance.

Dans la première partie de ce chapitre, on va aborder la modulation d'impulsion PPM « Pulse Position Modulation » puis on va discuter de sa généralisation : la méthode MPPM « Multi-Pulse Position Modulation ». Ces deux méthodes de modulation sont analysées et comparées entre elles en termes d'efficacité spectrale, d'efficacité en puissance et de débit de transmission pour différents paramètres de conception. En revanche la modulation OOK « On Off Keying » sera utilisée comme référence pour la comparaison et l'analyse de performance. Dans la deuxième partie de ce chapitre, on va présenter des résultats expérimentaux des performances des modulations OOK, PPM et MPPM pour différentes intensités de brouillard.

### 3.2 La modulation OOK

La modulation OOK est la modulation la plus simple et la plus utilisée dans les systèmes de communication optique sans fil commercialisés [34] en raison de la facilité de la mise en œuvre, la simplicité de conception du récepteur et le meilleur rapport coût/efficacité. Avec la modulation OOK les données binaires sont représentées par présence ou absence d'une impulsion lumineuse dans chaque intervalle de durée  $T_s$  secondes ou « slot ». La séquence d'informations binaires peut être directement encodée en une suite d'impulsions lumineuses et envoyée à travers le canal. Selon la règle, si le bit d'information est '1' une impulsion laser sera transmise, et si le bit d'information est '0' aucune impulsion ne sera transmise comme le montre la figure 3.01 ci-après.



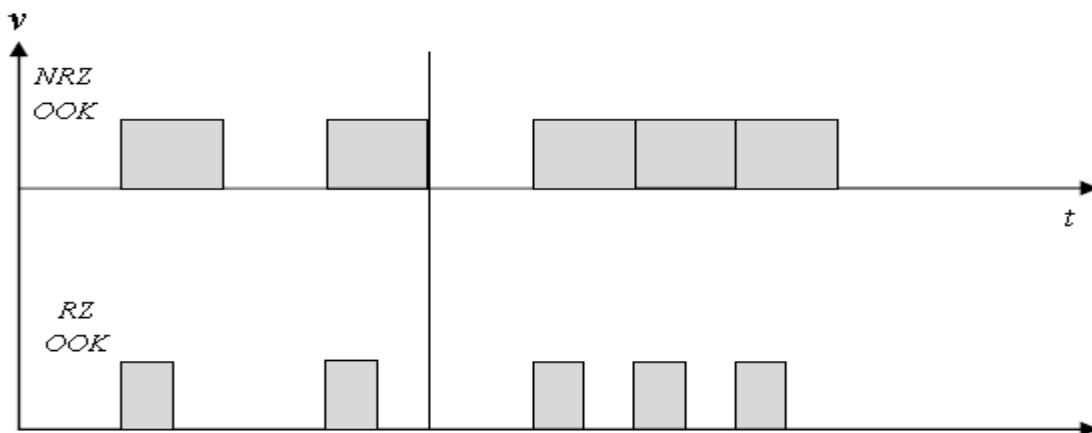
**Figure 3.01 :** La modulation OOK du message 10011010

Le débit atteint par cette méthode de modulation est noté :

$$D = \frac{1}{T_b} \quad (3.01)$$

Où  $T_b$  est la durée du bit.

Le débit de donnée est directement lié à la vitesse à laquelle la source peut être allumée et éteinte. Il y a une variante de OOK [35], dans laquelle la forme des impulsions est présente pour seulement une fraction de durée de bit  $\beta T_b$ , avec ( $0 < \beta < 1$ ), l'avantage de ce régime est une réduction de la puissance transmise.



**Figure 3.02 :** Exemple d'encodage avec RZ OOK et NRZ OOK [35].

Toutefois, comme  $\beta$  diminue, le besoin en bande passante augmente et la puissance requise diminue. Pour  $\beta = 0.5$ , ce mode est communément appelé RZ OOK ou «Retour à Zéro OOK » comme illustré dans la figure 3.02. En RZ OOK, la puissance requise est réduite de moitié par rapport à OOK Non-retour à Zéro (NRZ). Considérant les progrès récents dans le domaine des télécommunications optiques sans fil, la modulation OOK ne peut pas être le meilleur choix pour les futurs systèmes optiques à haute capacité. Toutefois, elle a été largement déployée sur le terrain, en raison de sa simplicité et de sa domination historique, la modulation OOK serait une bonne référence de comparaison. Dans la suite de ce chapitre, la modulation OOK sera utilisée comme référence de normalisation dans l'analyse de performance des autres schémas de modulations.

### 3.3 La modulation PPM

La technique de modulation PPM est une autre technique de modulation compatible avec les systèmes de modulation « IM/DD », elle présente l'avantage de l'efficacité en puissance par rapport à OOK, mais au détriment d'un besoin en bande passante accrue et une plus grande complexité à cause du haut niveau de précision requis dans la synchronisation des symboles. En PPM, chaque séquence de bits de données  $\{0,1\}$  de longueur  $b$  est encodée à un de  $M$  symboles possibles, chaque symbole de durée  $T$  est divisé en une série de  $M$  sous intervalles ou slots de durée  $T_s$ . L'information est transmise par une impulsion dans un slot unique, tandis que dans les autres  $(M - 1)$  slots aucune impulsion ne sera émise. La position de l'impulsion correspond à la valeur décimale de  $b$  ( $b = \log_2 M$ ) qui varie entre 1 et  $M$ , dans ce cas l'information est présentée par la position de l'impulsion, et cela se répète à chaque  $T$  secondes.

L'enveloppe PPM est donnée par :

$$P(t) = \begin{cases} 1 & \text{pour } t \in [(m-1)T_s, mT_s] \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.02)$$

Où  $m = \{1, \dots, M\}$ .

Le récepteur détecte les symboles PPM en déterminant lequel des  $M$  slots contient l'impulsion laser, et en effectuant l'opération inverse d'encodage pour récupérer le flux de bits envoyé.

*Exemple:* Soit une séquence de bits :  $b = [101]$  utilisant un encodage PPM avec  $M = 2^3 = 8$  slots. Afin de transmettre ce flux de bits, il faut tout d'abord trouver la valeur décimale de [101] qui est 5, enfin le codage se traduit par une émission d'impulsion laser de durée ( $T_s = T/M$ ) à la position «5» comme le montre la figure 3.03 ci-dessous.



**Figure 3.03 :** La modulation 8-PPM du message 101

La durée du slot,  $T_s$ , est liée à la durée d'un bit  $T_b$  par l'expression suivante :

$$T_s = \frac{T_b \log_2 M}{M} \quad (3.03)$$

Du fait que l'émetteur envoie une impulsion optique courte et intense dans un seul slot parmi les  $M$  slots; la PPM est bien adaptée aux transmissions sur longues distances où le signal à transmettre doit être bref et intense, la seule contrainte est la nécessité de restituer la base de temps.

Un paramètre essentiel pour juger de la performance de tout régime de modulation est la puissance optique moyenne consommée. La puissance optique moyenne pour tous schémas de modulation peut être normalisée à la puissance moyenne par la modulation OOK à travers un canal idéal. L'exigence moyenne en puissance de la modulation PPM normalisée à celle de OOK est donnée par [36] :

$$\frac{P_{PPM}}{P_{OOK}} = \sqrt{\frac{2}{M \log_2 M}} \quad (3.04)$$

La modulation PPM est connue par sa bonne efficacité en puissance. Cependant, elle est moins efficace que OOK du point de vue bande passante. Le transmetteur OOK émet des impulsions rectangulaire de durée  $1/D$  ( $D$  étant le débit), et par conséquent l'efficacité spectrale de la modulation OOK est 1.0 bit/s/Hz.

*Définition 3.01:* L'efficacité spectrale est définie comme le nombre de bits pouvant être transmis dans une largeur de 1 Hz de bande passante. On définit la fonction « $\eta$ » comme étant l'efficacité spectrale, elle est donnée par  $D/B$ , où  $D$  et  $B$  sont respectivement le débit et la bande passante.

La bande passante d'une modulation est estimée par l'inverse de la largeur d'impulsion, par conséquent l'efficacité spectrale  $\eta$  est calculée comme suit:

$$\eta_{PPM} = \frac{D}{1/T_s} \quad (3.05)$$

En utilisant la formule (3.02) et en remplaçant  $D$  par  $1/T_b$ , alors l'efficacité spectrale de la modulation PPM sera:

$$\eta_{PPM} = \frac{\log_2 M}{M} \quad (3.06)$$

Où  $\eta_{PPM}$  est exprimée en bit/s/Hz.

Le récepteur PPM doit traiter  $2^b$  intervalles de temps (slots) en  $bT_b$  secondes, le taux de traitement du système (émetteur et récepteur) doit être facteur de  $(2^b / b)$  le taux de bits transmis, impliquant une extension en bande passante. Pour les valeurs importantes de  $b$ , cette extension de la bande passante peut être critique, ce qui limite le débit d'information du système.

Par exemple, avec un niveau de codage de 10 bits, et 1024 slots avec PPM, la durée de l'impulsion est 10/1024 fois la durée du bit. Conduisant à une extension en bande passante de 102,4 (1024/10=102,4). Ce qui représente une expansion spectrale très importante.

Plusieurs alternatives à la modulation PPM ont été proposées afin de trouver une solution au problème de la bande passante et améliorer le débit. Comme potentielle alternative à la méthode PPM, la modulation MPPM sera étudiée par la suite.

### 3.4 La modulation MPPM

La modulation MPPM, proposée par Sugiyama et Nosu [37], appelée aussi « Combinatorial PPM » [38] est une généralisation de la méthode PPM, elle permet d'atteindre un débit d'informations nettement amélioré, ainsi qu'une meilleure efficacité spectrale.

En MPPM, chaque symbole est divisé en  $M$  slots et l'émetteur envoie  $w$  impulsions à chaque symbole. L'emplacement de ces impulsions dans le symbole détermine au niveau du récepteur la séquence des bits transmis.

Le nombre de symboles possibles dans MPPM,  $L(M, w)$  est donné par:

$$L_{MPPM} = \binom{M}{w} = \frac{M!}{w!(M-w)!} \quad (3.07)$$

Où  $M$  et  $w$  sont, respectivement, le nombre de slots et le nombre d'impulsions par symbole.

La modulation PPM est un cas particulier de MPPM où  $w = 1$ .

Avec cette formulation, nous allons maintenant citer quelques définitions clés :

*Définition 3.02:* Un code-book  $A(M, w)$  est l'ensemble des symboles créés par la combinaison de  $M$  et  $w$ . Chaque symbole peut représenter  $\log_2 L$  bits. Pour simplifier l'implémentation, la valeur de  $L(M, w)$  doit être puissance de deux. Pour  $w > 1$  c'est rarement le cas, par exemple pour  $L(12, 2)$  on obtient 66 symboles possibles (selon la relation 3.06). L'encodage compatible le plus proche est sur 64 symboles au lieu des 66 possibles ( $2^6 = 64$ ).

*Définition 3.03 :* Dans un code-book  $A(M, w)$ , le rapport  $w/M$  est appelé cycle de travail (Duty cycle) et il sera noté par  $D_c$ . Dans les systèmes optiques, chaque transmission d'un '1' se traduit par une impulsion. Dans ce contexte, nous pouvons prendre le cycle de travail comme une contrainte de puissance moyenne consommée dans un système optique.

*Définition 3.04 :* On définit la valeur "Efficacité de Transmission" comme étant la quantité d'information (bits) transmise par photon. Dans PPM, une impulsion optique présente  $\log_2 M$  bits d'information, et la valeur moyenne du nombre de photons que contient l'impulsion optique est représentée par «  $ph$  », l'efficacité de transmission est calculée comme suit :

$$\xi_{PPM} = \frac{\log_2 M}{ph} \quad (3.08)$$

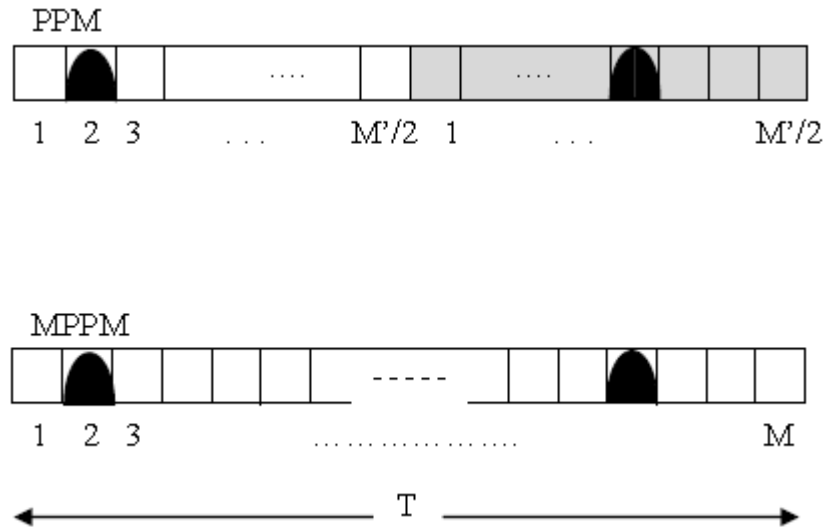
Alors que l'efficacité de transmission de MPPM est donnée par :

$$\xi_{MPPM} = \frac{\log_2 L}{ph} \quad (3.09)$$

En PPM, la durée d'une impulsion optique doit être étroite, ce qui permet d'augmenter la quantité d'informations transmises par symbole. Par contre, il y a un inconvénient à cela, c'est

l'augmentation de la bande passante requise, limitant ainsi la PPM par une faible efficacité spectrale.

MPPM est une modulation qui a été proposée pour améliorer l'efficacité d'utilisation de la bande passante de PPM, cette méthode réduit l'exigence en bande passante jusqu'à moitié, avec la même efficacité de transmission. Pour démontrer cette réduction en bande passante exigée par la modulation MPPM, on va comparer les deux méthodes MPPM et PPM dans les conditions suivantes : soit deux symboles PPM et un symbole MPPM, où le nombre d'impulsions optiques  $w$  dans le symbole MPPM est fixé à 2, et le symbole MPPM est deux fois plus long que celui de PPM. Avec ces conditions, les deux longueurs sont identiques en termes de temps et de nombre d'impulsions. Soit  $M'/2$  le nombre de slots dans un symbole PPM, et  $M$  le nombre de slots dans un symbole MPPM. La figure 3.04 illustre les conditions de comparaison.



**Figure 3.04 :** *Le principe de réduction de la bande passante*

La modulation PPM contient  $M'/2$  slots par symbole, et peut transmettre  $I_{PPM}$  bits d'information au cours des deux symboles:

$$I_{PPM} = \log_2(M'/2)^2 \quad (3.10)$$

D'autre part, MPPM peut transmettre  $I_{MPPM}$  bits d'information par la combinaison des deux positions d'impulsions optiques.

$$I_{MPPM} = \log_2 \binom{M}{2} \quad (3.11)$$

Si le nombre de bits transmis par PPM ( $I_{PPM}$ ) est égale au nombre de bits transmis par MPPM ( $I_{MPPM}$ ), alors les deux efficacités de transmission se coïncident. Du fait qu'un même nombre d'impulsions optiques '2' est envoyé au cours de l'intervalle de temps  $T$ , alors :

$$(M'/2)^2 = M(M-1)/2 \quad (3.12)$$

Généralement  $M \gg 1$ , et donc :

$$\frac{M'}{\sqrt{2}} = M \quad (3.13)$$

Où  $M'$  et  $M$  sont respectivement le nombre de slots correspondant à PPM et MPPM, dans le même intervalle de temps  $T$ . Pour atteindre la même efficacité de transmission, le nombre de slots nécessaires pour PPM doit être  $\sqrt{2}$  fois supérieurs à celui de MPPM. Par conséquent, la largeur de l'impulsion optique peut être élargie par un facteur de  $\sqrt{2}$ , donc la bande passante est réduite par un facteur de  $1/\sqrt{2}$ . Cette réduction de bande passante est plus conséquente par augmentation du nombre d'impulsions optiques  $w$  par symbole.

En règle générale, si  $M \gg w$  on a :

$$M = (\sqrt[w]{w!} / w) \times M' \quad (3.14)$$

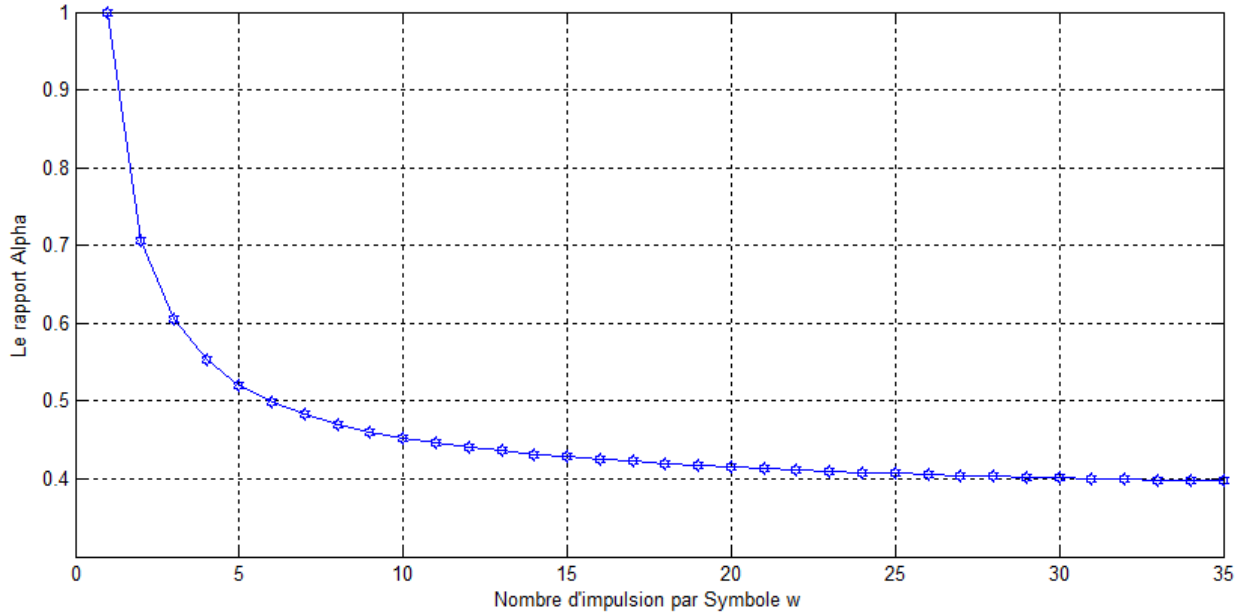
Le rapport de réduction de la bande passante « *Alpha* » est égal à  $(M/M')$ . La variation de *Alpha* en fonction de  $w$  est montrée sur la figure 3.05. Selon cette figure, la bande passante est réduite par rapport à PPM avec l'utilisation de deux impulsions par symbole.

Par exemple,  $w = 5$  produit un rapport de réduction spectrale de 0.52.

L'exigence moyenne en puissance de MPPM normalisée à OOK est donnée par [36] :

$$\frac{P_{MPPM}}{P_{OOK}} = \frac{2w}{\sqrt{Md \log_2 L_{MPPM}}} \quad (3.15)$$

Où  $d$  est la distance de Hamming.



**Figure 3.05 :** *L'effet de la réduction de la bande passante par MPPM*

*Définition 3.05 :* La distance de Hamming est une distance au sens mathématique du terme, elle permet de quantifier la différence entre deux symboles. Par exemple, la distance de Hamming entre 1011101 et 1001001 est 2 [39].

Une des plus simples estimations de la bande passante d'une modulation est l'inverse de la largeur d'impulsion. Comme dans le cas de PPM, la durée d'un bit  $T_b$  multipliée par le nombre de bits par symbole nous donne la durée du symbole :

$$T = T_b \cdot \log_2 \left( \frac{M}{w} \right) \quad (3.16)$$

Par conséquent, la durée d'un slot est donnée par :

$$T_s = \frac{T_b \cdot \log_2 \left( \frac{M}{w} \right)}{M} \quad (3.17)$$

L'efficacité spectrale de MPPM est donnée par :

$$\eta_{MPPM} = \frac{D}{1/T_s} \quad (3.18)$$

On remplace  $T_s$  par sa formule (3.17) et  $D$  par  $1/T_b$ , alors l'efficacité spectrale de la modulation MPPM sera donnée par :

$$\eta_{MPPM} = \frac{\log_2 \left( \frac{M}{w} \right)}{M} \quad (3.19)$$

Où  $\eta_{MPPM}$  est exprimée en bit/s/Hz.

### 3.5 Résultats et discussion

Dans le domaine des télécommunications optiques sans fil, chaque système a un paramètre de conception prioritaire par rapport aux autres. Par exemple, les systèmes optiques sans fil mobile et les liaisons satellitaires se concentrent beaucoup plus sur l'efficacité en puissance, tandis que les systèmes terrestres préfèrent la simplicité de conception. Dans la suite de ce chapitre nous allons faire une comparaison analytique entre PPM et MPPM avec deux et quatre impulsions, respectivement, 2MPPM et 4MPPM, et puis nous allons voir les points forts de chaque technique de modulation.

#### 3.5.1 Le débit de PPM et de MPPM

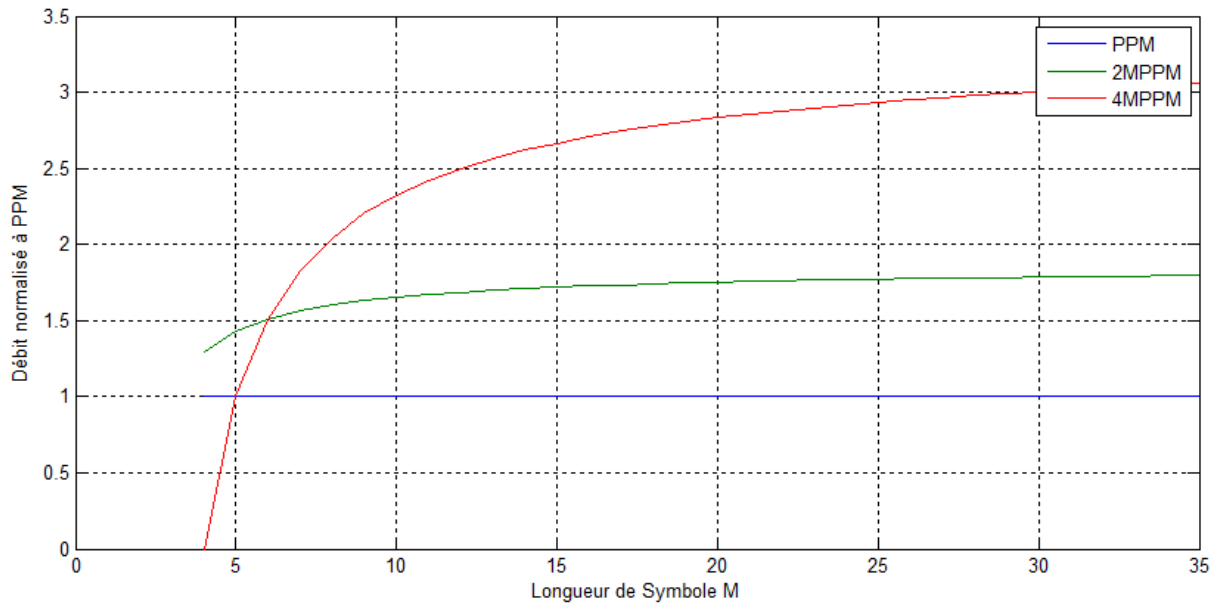
Pour les systèmes de communication optique sans fil le débit  $D$  qu'une modulation peut atteindre est important, par contre ce n'est pas le seul paramètre qui permet d'en juger de la performance d'une modulation. Le débit atteint par PPM est donné par :

$$D = \frac{\log_2 M}{T} \quad (3.20)$$

Pour juger l'amélioration en débit d'information, nous allons définir le paramètre  $R$ , qui représente le rapport du débit d'information de n'importe quel schéma de modulation à celui de PPM.

$$R = \frac{D_{MPPM}}{D_{PPM}} = \frac{\log_2 L}{\log_2 M} \quad (3.21)$$

La figure 3.06 présente l'amélioration en débit de MPPM par rapport à PPM. Pour  $w = 2$  et  $w = 4$  le débit atteint par la modulation MPPM est plus élevé que celui de PPM, il augmente en fonction de la longueur du symbole. Le débit atteint par MPPM avec quatre impulsions (4MPPM) est beaucoup plus élevé que celui de MPPM à deux impulsions (2MPPM). Pour  $M = 32$ , le débit atteint par 4MPPM est trois fois plus grand que celui de la modulation PPM, et d'environ 1.7 fois plus grand comparé à 2MPPM.



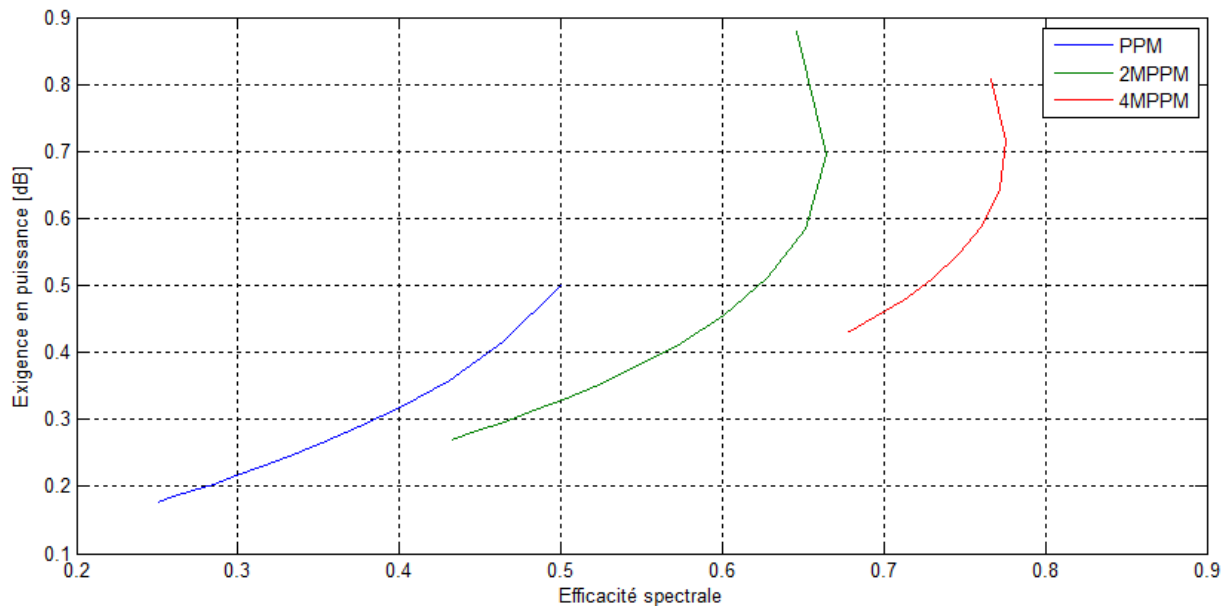
**Figure 3.06 :** L'amélioration en débit de MPPM par rapport à PPM pour  $w = \{2, 4\}$  et pour différentes valeurs de  $M$

### 3.5.2 L'exigence en puissance et l'efficacité spectrale de PPM et de MPPM

L'efficacité spectrale ou l'efficacité en bande passante d'une modulation correspond au taux d'informations qui peuvent être transmis sur une bande passante donnée dans un système de communication spécifique. Autrement dit, elle caractérise la capacité d'une modulation à "faire passer" un débit maximum dans une largeur de canal minimum. Bien que la conservation de la bande passante n'a pas d'intérêt particulier dans les communications optique sans fil, car elles fonctionnent sur un spectre non réglementée, l'efficacité spectrale est liée à la vitesse des composants optoélectroniques nécessaires pour le fonctionnement à un débit donné.

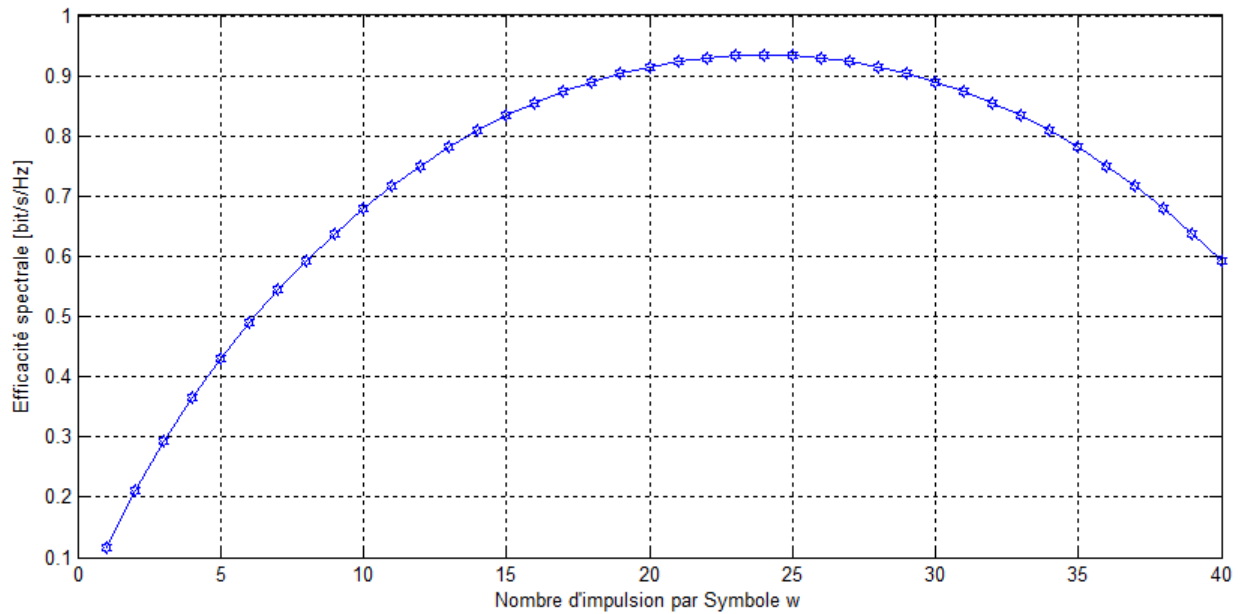
Pour la PPM, si on augmente  $M$  dans le but d'améliorer le débit, alors l'efficacité d'utilisation de la bande se dégrade rapidement. Par exemple, pour  $M = 64$  le rapport  $D/B$  est 0,1, c'est à dire,

l'efficacité d'utilisation de la bande est de 10 % seulement, ce qui montre que la PPM souffre d'une faible efficacité en bande passante. La figure 3.07 présente l'exigence en puissance normalisée en fonction de l'efficacité spectrale pour PPM, 2MPPM et 4MPPM.



**Figure 3.07 :** L'exigence en puissance normalisée en fonction de l'efficacité spectrale pour PPM, 2MPPM et 4MPPM

D'après la figure 3.07, la bande passante exigée des deux modulations PPM et MPPM est proportionnelle à la longueur de symbole  $M$ . MPPM présente l'avantage d'avoir une efficacité spectrale plus élevée comparée à PPM, cet avantage devient plus conséquent quand le nombre d'impulsions par symbole augmente. Pour PPM et MPPM, on note que l'exigence moyenne en puissance normalisée diminue (augmentation de l'efficacité en puissance) avec l'augmentation de la longueur de symbole  $M$  et avec un comportement différent. MPPM présente une plus grande exigence en puissance que PPM, et elle s'augmente encore plus avec le nombre d'impulsions par symbole  $w$ . Pour montrer l'effet de l'augmentation du nombre d'impulsions sur l'amélioration de l'efficacité spectrale, on présente la figure 3.08 qui donne l'efficacité spectrale pour différentes valeurs de  $w$ , avec  $M = 48$ .



**Figure 3.08 :** *L'efficacité spectrale de MPPM pour différentes valeur de  $w$ , où  $M=48$*

D'après la figure 3.08, on remarque que la modulation MPPM présente une efficacité spectrale proportionnelle au nombre d'impulsions par symbole  $w$ , et cela jusqu'à  $w = M/2$ , où l'efficacité spectrale atteint une valeur maximale de 0.93, au-delà de cette valeur elle décroît avec le nombre d'impulsions  $w$ .

### 3.6 Les modulations OOK, PPM et MPPM sous un brouillard contrôlé

Les caractéristiques de la modulation, à savoir, la période, le cycle de travail «  $D_c$  », la largeur et l'amplitude des impulsions jouent un rôle important dans la performance du système de communications FSO. Dans ce qui suit nous allons présenter des résultats d'analyse expérimentales des performances des modulations OOK, PPM et MPPM en présence de différentes intensités de brouillard (léger, modéré, épais et dense).

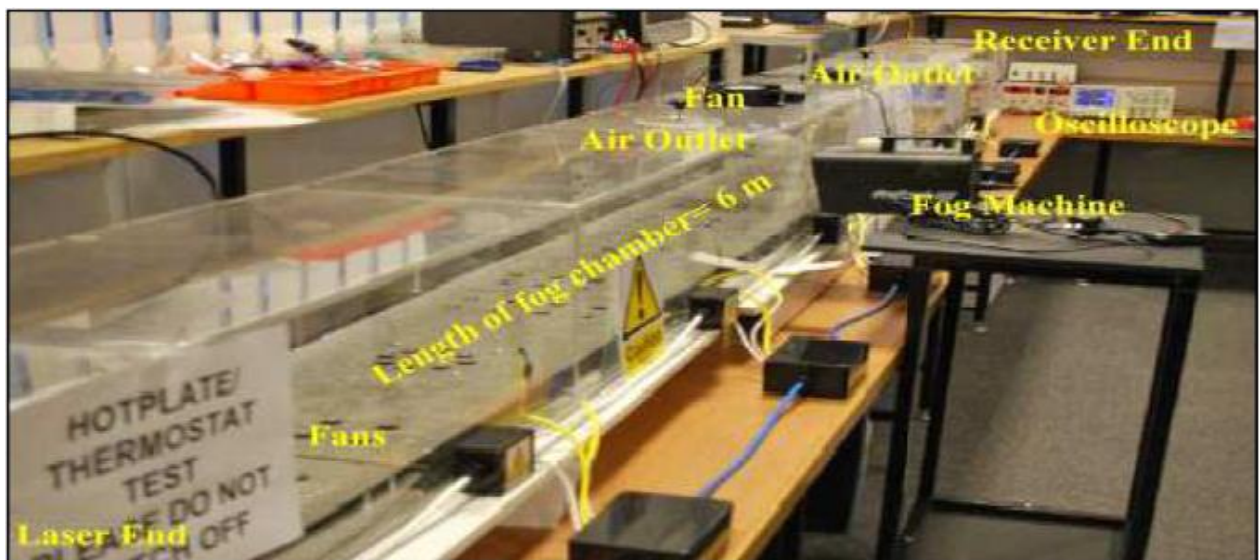
Le brouillard est la principale source d'atténuation dans l'atmosphère, et pourrait considérablement réduire la disponibilité des liaisons FSO. Cette atténuation varie de 0,2 dB/km pour un temps clair, à 130 dB/km et 480 dB/km, respectivement, pour le brouillard continental modéré et le brouillard dense maritime [40].

Dans la pratique, il est très difficile d'estimer l'effet du brouillard sur la disponibilité des liaisons FSO dans des conditions et des lieux différents. Ceci est principalement dû à la longue période d'attente pour observer la réapparition de ce phénomène atmosphérique. En outre, les équipements

de mesure et les systèmes requis sont complexes et coûteux. Nous avons utilisé une chambre de laboratoire pour simuler le canal atmosphérique et afin d'étudier les effets de brouillard sur le faisceau optique, cette chambre va nous permettre de caractériser les systèmes FSO et d'analyser les performances dans un environnement contrôlé, sans la nécessité d'une longue attente comme dans le cas des études réelles.

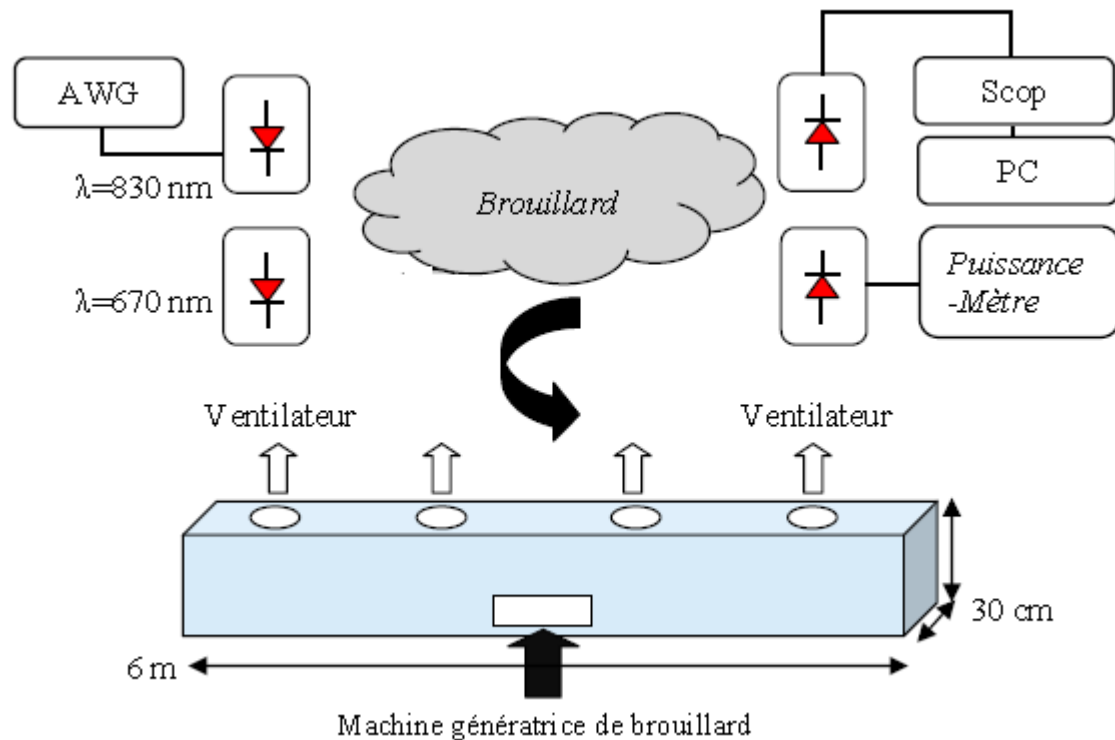
### 3.6.1 Mise en place de l'expérience

L'expérience a été réalisée au sein du laboratoire du groupe de recherche de la communication optique « NCL », Ecole de l'Informatique, Ingénierie et Sciences de l'Information de l'université de Northumbria, Newcastle, Angleterre [41].



**Figure 3.09 :** *Le dispositif FSO expérimental*

Le système FSO utilisé dans l'expérience est représenté sur les figures 3.09 et 3.10. Le canal FSO est déployé sur une chambre de verre fermée de dimensions de  $600 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$  avec quatre ventilateurs pour contrôler la quantité du brouillard, gérer le flux de brouillard dans la chambre de façon homogène et contrôler le contraste visuel (visibilité) le long de la chambre. Le brouillard est introduit dans la chambre à l'aide d'une machine génératrice de brouillard avec un débit de sortie de  $0,94 \text{ m}^3/\text{s}$  pendant moins de deux secondes.

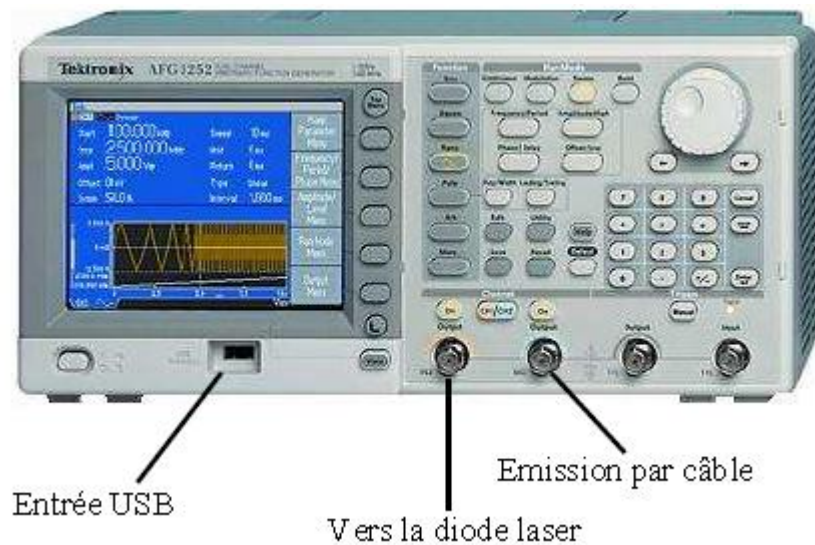


**Figure 3.10 :** *Bloc diagramme du montage expérimental*

L'émetteur est constitué de deux sources laser, l'une émettant à 670 nm est utilisée pour la mesure de la visibilité, l'autre émettant à 830 nm est utilisée pour transmettre les données.

Dans notre expérience, les signaux OOK, 4PPM et 2MPPM sont présentés par une séquence binaire pseudo-aléatoire (PRBS, Pseudo Random Bit Sequence), et générés par un générateur de signaux arbitraires (AWG, Arbitrary Waveform Generator), figure 3.11. Les signaux sortants du générateur sont utilisés pour moduler directement le signal lumineux issu de la diode laser, avec une puissance crête maximale de 10 mW.

D'autre part, le dispositif récepteur est constitué d'un Power-Meter pour surveiller en continu la puissance reçue à différents niveaux de brouillard, et qui sert à calculer la visibilité par la suite. Un système d'acquisition automatique de données est utilisé grâce à la connexion du récepteur à un ordinateur via le bus GPIB et un environnement de contrôle LABVIEW, pour la récupération du signal envoyé. L'expérience est réalisée en remplissant la chambre avec une quantité contrôlable de brouillard pour obtenir une gamme allant de très faible à haute visibilité. Dans l'expérience, le brouillard occupe le volume de la chambre d'une façon homogène avant la prise des mesures.



**Figure 3.11 :** *Le générateur de signaux utilisé*

### 3.6.2 Effet du brouillard sur la liaison FSO

L'atmosphère terrestre est constituée de nombreux types de gaz et d'aérosols. Le brouillard atténue le faisceau optique en raison de la diffusion de Mie. Il se compose de très fines particules sphériques d'eau en suspension dans l'air à granulométrie variable (de 1 à 25  $\mu\text{m}$  de diamètre) [42]. Les particules de brouillard réduisent la visibilité près du sol. La définition météorologique du brouillard est définie lorsque la visibilité est à près de 1 km [43]. Différents types de brouillard sont classés en fonction d'un certain nombre de facteurs : l'emplacement, la distribution de la taille des particules et le diamètre moyen des particules. La concentration des particules et la distribution de taille varient dans l'espace ; de ce fait, il est difficile de prédire l'atténuation provoquée par le brouillard dans une liaison optique atmosphérique. La visibilité d'une liaison (à savoir la portée visuelle météorologique) est utilisée pour mesurer l'atténuation due au brouillard. Koschmieder a défini la visibilité comme étant la distance à laquelle le contraste visuel d'un objet baisse de 5% par rapport au contraste visuel original (100%) le long du trajet de propagation [44]. Cette baisse de 5% est connue comme étant le seuil visuel  $T_{th}$  (visual threshold) du trajet de propagation atmosphérique. La visibilité météorologique  $V$  (km) peut donc être exprimée en termes de coefficient d'atténuation atmosphérique, à une longueur d'onde donnée et un seuil visuel  $T_{th}$  défini, par [42]:

$$V = \frac{10 \log_{10}(T_{th})}{\beta_{\lambda}} \quad (3.22)$$

Où  $\beta_{\lambda}$  est le coefficient de diffusion en présence du brouillard,

$V$  est exprimée en dB/km.

D'autre part, la transmittance du canal est calculée en comparant la puissance optique moyenne reçue en présence et en absence de brouillard, dérivée de la loi de Beer-Lambert, donnée par [42] :

$$T = \frac{I(f)}{I(0)} = \exp(-\beta_{\lambda} z) \quad (3.23)$$

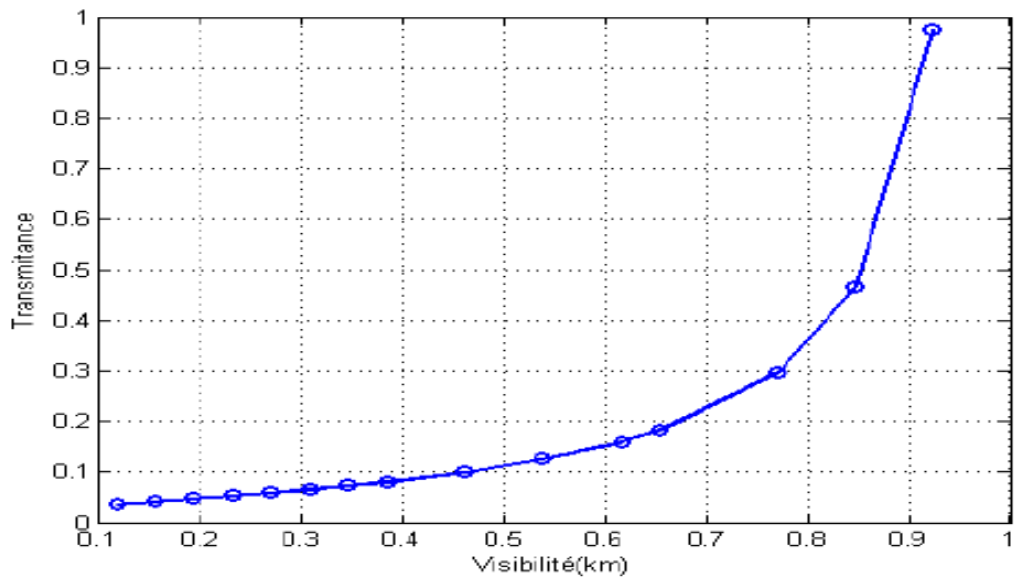
Où :  $z$  est la longueur de propagation,  $I(f)$  et  $I(0)$  sont respectivement les moyennes des intensités optiques reçues en présence et en absence de brouillard.

Type de brouillard	dense	épais	modéré	léger
Visibilité [m]	25 - 70	70 - 250	250 - 500	500 - 1000
Transmittance	<0.36	0.36 – 0.67	0.67 – 0.85	0.85 – 0.92

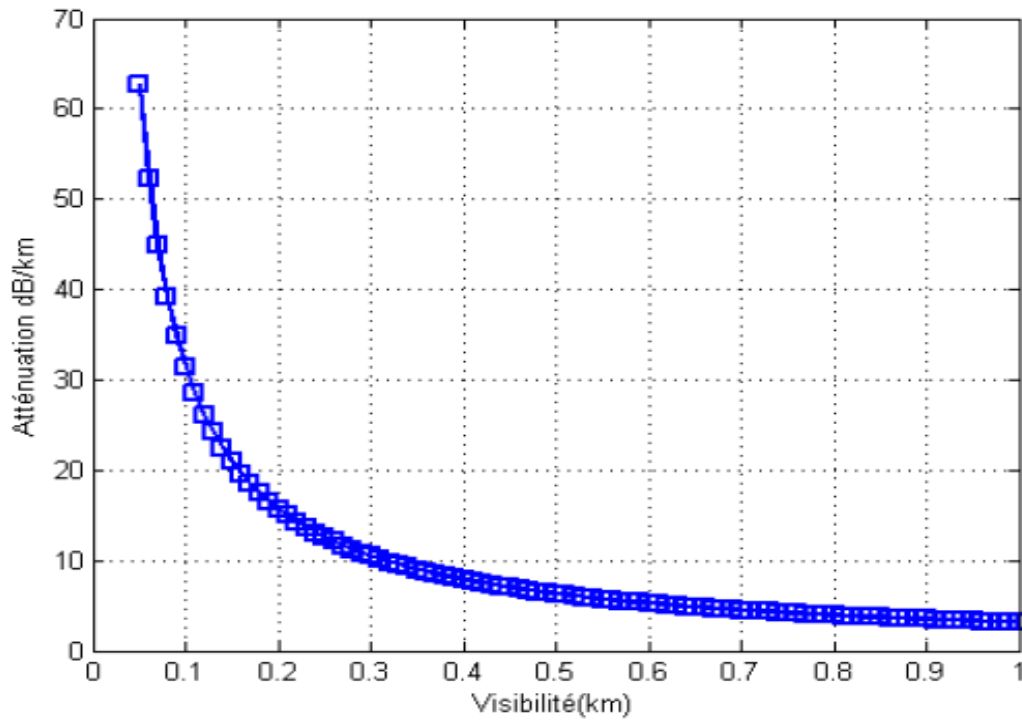
**Tableau 3.01 : Transmittance pour différentes valeurs de visibilité**

D'après ce tableau 3.01, la visibilité pour différentes intensités de brouillard en fonction de la transmittance mesurée dans notre expérience est illustrée sur la figure 3.12 [45].

Le coefficient de diffusion du brouillard dépend de la longueur d'onde du faisceau et de la visibilité. Le modèle de Kim a été développé pour prendre en compte l'effet de la longueur d'onde, donné par la relation (2.09). Selon le modèle de Kim, l'atténuation due au brouillard pour une distance inférieure à 500 m ne dépend pas de la longueur d'onde, donc, la longueur d'onde choisie dans notre expérience ne va pas influencer les performances de la liaison. L'atténuation en fonction de la visibilité est présentée sur la figure 3.13. Cette figure montre que pour une visibilité de moins de 50 m, l'atténuation est proche de 64 dB/Km, ce qui influe considérablement sur la marge brute d'une liaison, et par conséquent sur la distance de déploiement d'une liaison FSO.



**Figure 3.12 :** *Transmittance en fonction de la visibilité, jusqu'à 1 km*

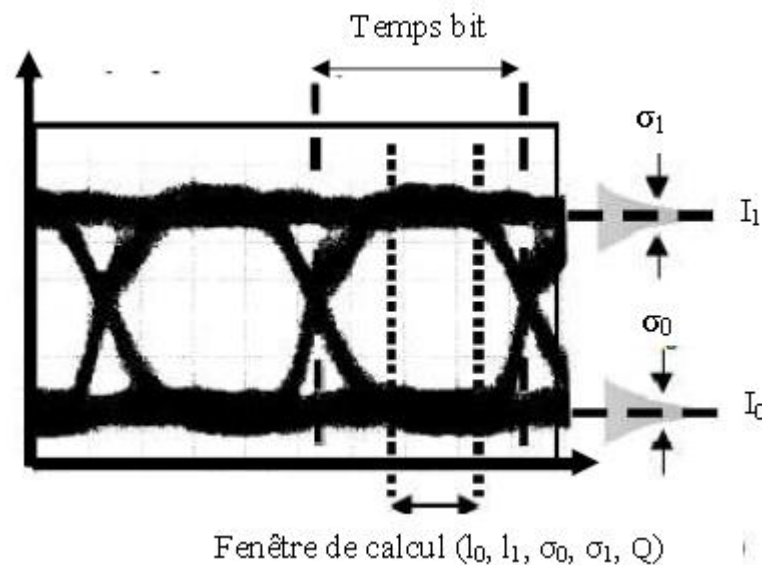


**Figure 3.13 :** *L'atténuation en fonction de la visibilité*

### 3.6.3 Résultats et discussion

Une fois le signal transmis, il faut pouvoir l'interpréter en termes de niveaux logiques «0» et «1» au niveau de la réception. Le signal reçu est un signal analogique variant autour d'un niveau bas et d'un niveau haut. L'association d'une valeur basse à un «0» est faite par échantillonnage du signal

transmis et en comparant la valeur échantillonnée à une certaine valeur appelée « seuil de décision ». Si la tension est inférieure à la tension seuil, le bit transmis est interprété comme un « 0 ». Sinon, il est interprété comme un « 1 ». Or le signal délivré par le photorécepteur est affecté par le brouillard et entaché de bruit dû à tous les éléments de la chaîne optoélectronique (source, modulation, canal de propagation, détecteur, amplificateur). Les valeurs basses et hautes prennent une succession de valeurs aléatoires centrées autour des niveaux moyens  $I_0$  et  $I_1$  et d'écart type  $\sigma_0$  et  $\sigma_1$ , qui sont représentées sur la figure 3.14, ainsi qu'un diagramme de l'œil.

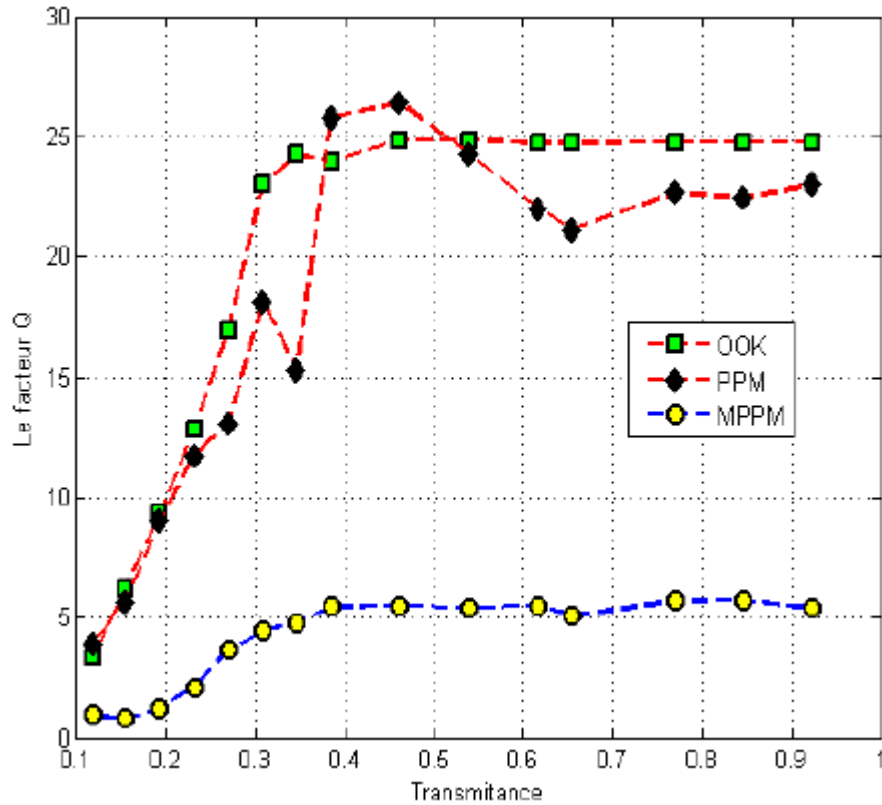


**Figure 3.14 :** *Diagramme de l'œil*

Le facteur de qualité  $Q$  qui représente le rapport signal/bruit au niveau du récepteur est donné par [46]:

Il est à noter que le facteur de qualité dépend des niveaux moyens. Il diminue d'autant plus que le signal transmis est atténué. La figure.3.15 présente le facteur de qualité calculé dans notre expérience en fonction de la transmittance, pour les modulations OOK, PPM et MPPM.

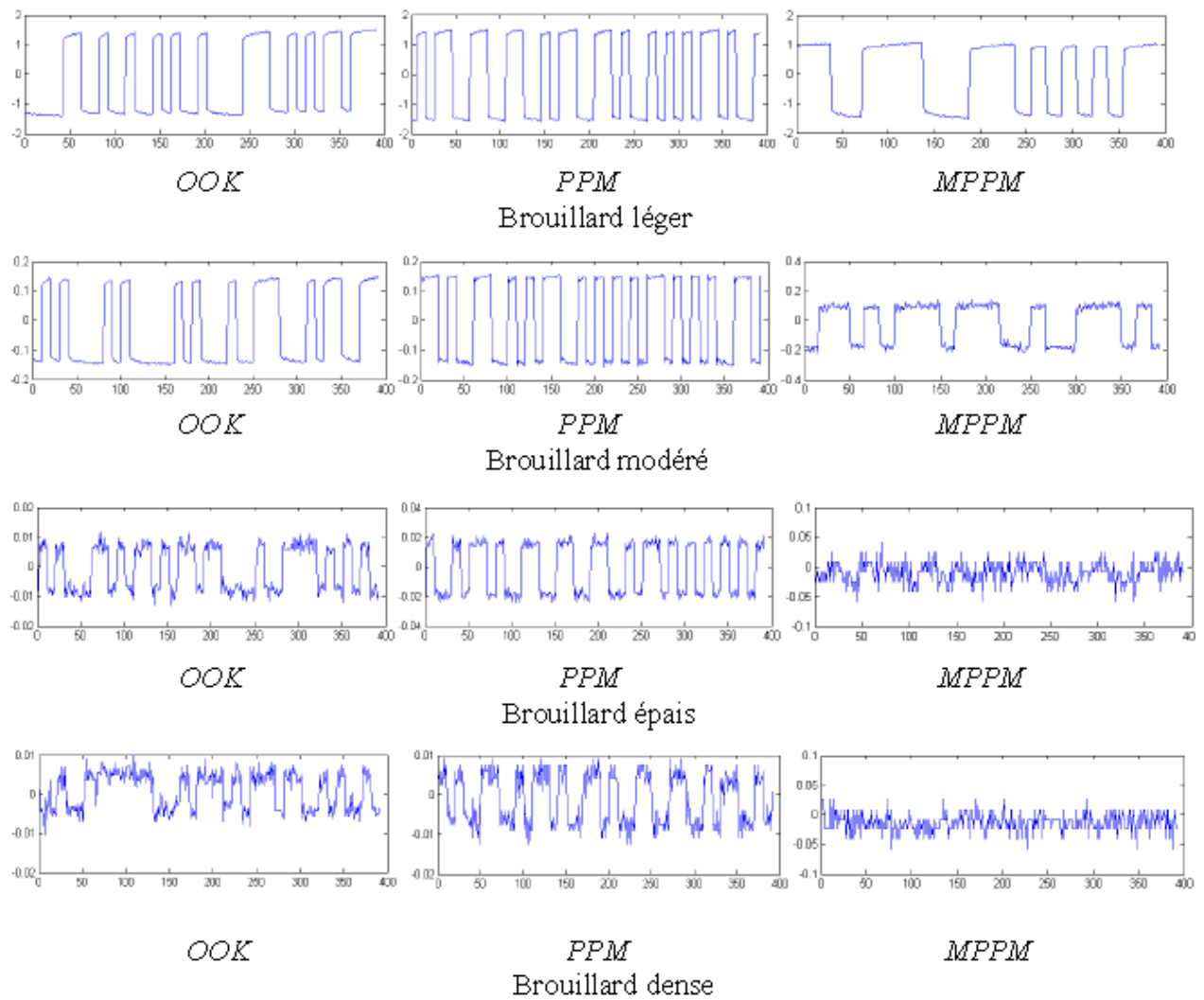
Selon la figure 3.15, la modulation OOK présente un meilleur facteur de qualité, autour de 25, qui se stabilise pour les transmittances supérieur à 0.45. Par ailleurs, la modulation MPPM présente un facteur de qualité plus bas, autour de cinq pour les transmittances supérieur à 0.4. D'autre part, la modulation PPM présente un très bon facteur de qualité, comparable avec celui de la modulation OOK.



**Figure 3.15 :** *Le facteur de qualité 'Q' en fonction de la transmittance*

Les signaux reçus à travers les modulations OOK, PPM et MPPM sous différentes intensités de brouillard sont présentés sur la figure 3.16.

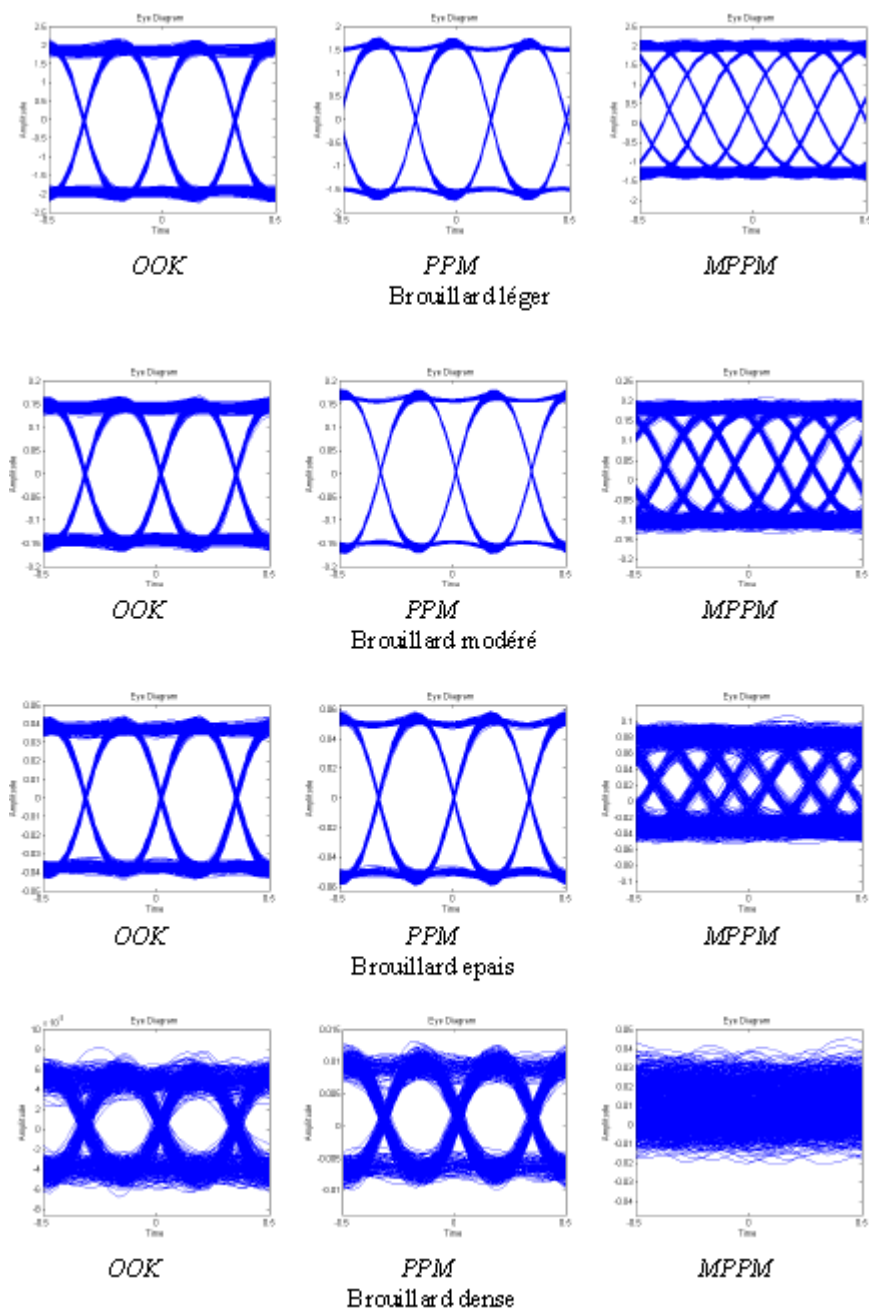
La figure 3.16 ci-après montre clairement que le signal MPPM est reçu sans aucune déformation dans le cas du brouillard léger et modéré, et il est le plus déformé au niveau de la réception dans le cas du brouillard épais et dense. D'autre part, les signaux des modulations OOK et PPM sont reçus avec peu de déformation juste dans le cas du brouillard dense. Ces résultats montrent que l'utilisation de plusieurs impulsions dans une période bien définie a une grande influence sur la qualité de signal sous le brouillard, tant que les impulsions sont larges alors la récupération de flux des données est plus facile. Les diagrammes de l'œil des signaux des modulations OOK, PPM et MPPM au niveau de la réception sous différentes intensités de brouillard sont présentés sur la figure 3.17.



**Figure 3.16 :** Les signaux des modulations OOK, PPM et MPPM au niveau de la réception pour différentes intensités de brouillard

Dans 5MPPM avec deux impulsions, 3 bits sont envoyés, et dans le cas 4PPM, deux bits sont envoyés. Autrement dit, pour envoyer 12 bits, MPPM exige 20 slots dont 8 sont occupées par des impulsions, et PPM exige 24 slots dont 6 sont occupées par des impulsions. Cela veut dire que l'impulsion de PPM est 1.2 fois plus large que celle de MPPM pour le même débit de transmission. Pour calculer le taux d'erreur de transmission dans le canal de simulation, on a utilisé dans notre expérience un câble coaxial pour envoyer les données de l'émission vers la réception, en parallèle avec l'émission laser sans fil. La comparaison des deux signaux à travers les deux canaux va nous permettre de trouver les bits erronés, et par conséquent le taux d'erreur de la transmission sans fil. Les taux d'erreur mesurés pour les différentes modulations OOK, PPM et

MPPM sous différentes intensités de brouillard (Clair, Modéré, Epais et Dense) sont présentés dans le tableau 3.02 ci-après.



**Figure 3.17 :** Les diagrammes de l'œil de OOK, PPM et MPPM au niveau de la réception sous différentes intensités de brouillard

	Taux d'erreur			
Brouillard	clair	modéré	épais	dense
OOK	0	0	0	0
4PPM	0	0	0	0
2MPPM	0	0	$4.5 \cdot 10^{-4}$	0.4

**Tableau 3.02 :** Les taux d'erreur mesurés des modulations OOK, PPM et MPPM

Les taux d'erreurs obtenus pour les modulations OOK, PPM et MPPM montrent que dans le cas du brouillard clair et modéré les trois modulations ne présentent aucune erreur de transmission. Dans le cas du brouillard épais et dense, les modulations OOK et PPM présentent un taux d'erreur nul. Par contre, la modulation MPPM présente un taux d'erreur de  $4.5 \cdot 10^{-4}$  dans le cas du brouillard épais et un taux d'erreur très important de 0,4 dans le cas du brouillard dense. Ces résultats confirment que l'utilisation de plusieurs impulsions dans une période bien définie a une grande influence sur la qualité du signal en présence du brouillard, surtout lorsqu'il est dense. Lorsque les impulsions sont brèves le taux d'erreur augmente et par conséquent la récupération de flux de données au niveau de réception devient plus difficile. D'autre part, il est à noter que l'augmentation de la puissance d'émission peut améliorer la qualité du signal reçu et réduire le taux d'erreur, à condition qu'elle soit comprise dans l'intervalle de sécurité oculaire défini par des normes.

### 3.7 Conclusion

Dans les systèmes de communications optiques sans fil, une plus grande efficacité en puissance peut être obtenue en employant des techniques de modulation d'impulsions. Dans la première partie de ce chapitre on a présenté deux types de modulation compatibles avec les systèmes (IM/DD) : la PPM et la MPPM. On a présenté des résultats d'analyse des performances et de comparaison entre les deux méthodes modulation. Les résultats ont montrés que la modulation MPPM est très efficace pour les systèmes à hauts débits, ou pour les systèmes qui exigent une bonne efficacité spectrale. Dans la deuxième partie du chapitre, on a présenté des résultats expérimentaux sur la performance des modulations OOK, PPM et MPPM en présence de différentes intensités du brouillard (léger, modéré, épais et dense). Les résultats obtenus montrent que les modulations OOK et PPM présentent une très bonne performance sous les différentes intensités de brouillard, tandis que la modulation MPPM présente une bonne performance dans le cas de brouillard clair et modéré mais elle présente un taux d'erreur important dans le cas du brouillard dense. Ces résultats montrent que les modulations OOK et PPM sont des très bonnes

méthodes en présence du brouillard sous différentes intensités. Chaque système optique sans fil a ses propres exigences, à savoir, la bonne efficacité spectrale, la simplicité, le haut débit ou la synchronisation. La modulation PPM présente une bonne efficacité en puissance par rapport à OOK, mais au détriment d'un besoin en bande passante accrue et une plus grande complexité à cause du haut niveau de précision requis dans la synchronisation des symboles. La MPPM présente une bonne efficacité spectrale, mais elle a quelques limites, sur lesquelles des améliorations sont souhaitées. La synchronisation à titre d'exemple est une préoccupation majeure dans la conception d'une modulation afin de simplifier l'opération de récupération de flux de données et la conception des émetteurs récepteurs. D'autre part, malgré l'amélioration que MPPM présente en termes d'efficacité spectrale par rapport à PPM, elle n'est pas vraiment souhaitable lorsque la bande passante est une contrainte dans un système de communication. Avec ces inconvénients à l'esprit, on va présenter dans le chapitre suivant des concepts de modulation alternatifs afin de résoudre ces problèmes tous en gardant les avantages de cette modulation.

## **CHAPITRE 4**

### **NOUVELLES TECHNIQUES DE MODULATION POUR LES FUTURS SYSTEMES FSO**

#### **4.1 Introduction**

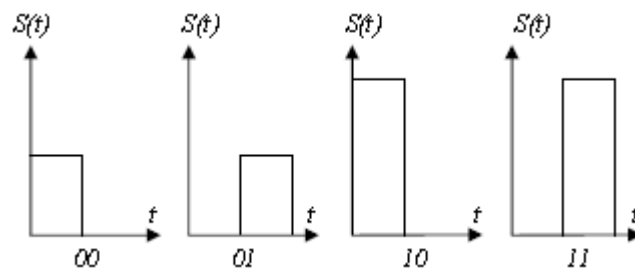
Le choix approprié du type de modulation est un des paramètres principaux dans la conception des systèmes de communications optiques sans fil. Par conséquent, une méthode de modulation simple avec une haute fiabilité, faible coût, bonne efficacité spectrale, débit considérable et à faible consommation d'énergie est très souhaitable. La PPM est une méthode de modulation populaire dans les systèmes de communication optiques sans fil. La PPM est plus efficace en terme de puissance que OOK, mais elle présente plusieurs inconvénients tels que la complexité de la mise en œuvre à cause du haut niveau de précision requis dans la synchronisation des slots et des symboles, et une décroissance rapide de l'efficacité spectrale avec une augmentation de l'efficacité en puissance. Comme alternative potentielle à la méthode PPM, la modulation MPPM a été proposée. Cette dernière réduit, environ à moitié, la bande passante de transmission requise avec la conservation de la même efficacité de transmission. La MPPM a une bonne efficacité spectrale par rapport à PPM, mais elle n'est pas une solution souhaitée pour les systèmes FSO qui exigent une très bonne efficacité spectrale. D'autre part, quand il s'agit de la bande passante, les modulations multi-niveaux sont très efficaces. La modulation PAM (Pulse Amplitude Modulation) par exemple, donne un excellent rendement spectral en transmettant plus d'informations par symbole, mais avec une faible efficacité en puissance. Pour améliorer le débit dans la modulation MPPM et résoudre le problème de synchronisation des symboles, on va introduire deux nouveaux concepts de modulation. Le premier système de modulation combine la modulation PAM et MPPM. Nous allons présenter dans ce chapitre les expressions de l'efficacité en puissance, l'efficacité spectrale, le débit normalisé, et des résultats de comparaison avec MPPM et la conventionnelle PAM-MPPM.

#### **4.2 La modulation hybride PAM-MPPM**

La combinaison des modulations MPPM et PAM est une solution prometteuse pour avoir un nouveau concept de modulation tout en ayant les avantages des deux méthodes. Dans cette section, on va présenter la modulation hybride PAM-MPPM dans sa traditionnelle forme et avec les modifications proposées, en donnant les résultats de comparaison.

### 4.2.1 La modulation PAM

La plupart des systèmes de communication optiques sans fil s'appuient sur des techniques de modulation de niveau binaire, ces techniques de modulation transmettent les informations dans chaque période de symbole par la variation de deux états d'intensité (absence ou présence de l'intensité lumineuse), l'avantage de ces systèmes est qu'ils sont généralement simple dans leurs mise en œuvre et qu'ils sont peu coûteux. Les modulations d'impulsion par position utilisent ce principe et présentent une bonne efficacité en puissance, en revanche souffrent de la faible efficacité spectrale.



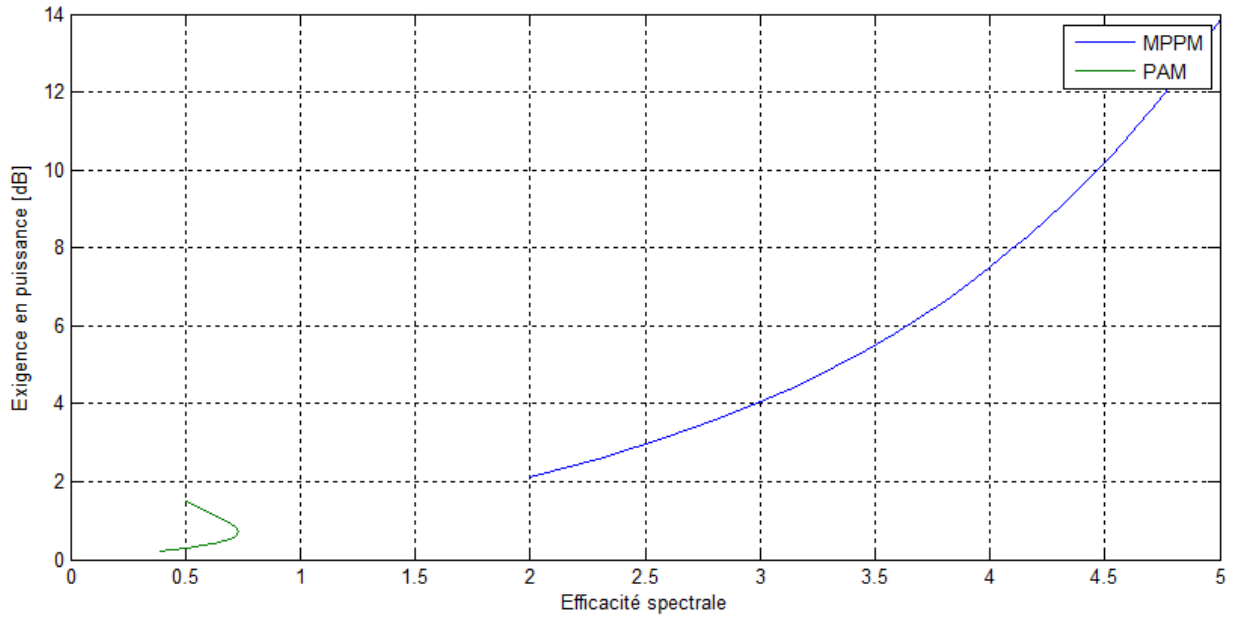
**Figure 4.01 :** Exemple d'encodage PAM

Les modulations Multi-Niveaux et en particulier la PAM portent l'information à travers l'amplitude des impulsions selon la figure 4.01. Ce type de modulations est assez puissant en termes d'efficacité spectrale, et très faible en termes d'efficacité en puissance. Les exigences en bande passante et en puissance pour PAM, PPM, MPPM normalisées par OOK, sont indiquées dans le tableau 4.01 [47]. La combinaison de la modulation par amplitude avec la modulation d'impulsion par position est une solution prometteuse pour bénéficier des avantages des deux catégories de modulation pour atteindre une efficacité optimale en puissance et en bande passante.

La figure 4.02 présente l'exigence en puissance des modulations PAM et MPPM normalisée à OOK en fonction de l'exigence spectrale. A partir de cette figure on peut noter la grande efficacité en puissance que présente la MPPM, et voir que la modulation multi-niveaux (PAM) est une excellente solution pour un système qui exige une grande efficacité spectrale.

	Exigence en puissance	Exigence en bande passante
<b>PAM</b>	$\frac{P_{PAM}}{P_{OOK}} = \frac{M-1}{\sqrt{\log_2 M}}$	$B_{PAM} = \frac{1}{\log_2 M}$
<b>PPM</b>	$\frac{P_{PPM}}{P_{OOK}} = \sqrt{\frac{2}{M \log_2 M}}$	$B_{PPM} = \frac{M}{\log_2 M}$
<b>MPPM</b>	$\frac{P_{MPPM}}{P_{OOK}} = \frac{2w}{\sqrt{Md \log_2 L}}$	$B_{MPPM} = \frac{M}{\log_2 L}$

**Tableau 4.01 :** Les exigences en bande passante et en puissance de PAM, PPM, MPPM normalisées par OOK



**Figure 4.02 :** Puissance normalisée en fonction de l'exigence spectrale de PAM et 3MPPM

#### 4.2.2 La modulation PAM-MPPM conventionnelle

Pour bénéficier des avantages des deux catégories de modulation (multi niveaux et multi pulses); la modulation MPAPM (Multiple Pulse Amplitude and Position Modulation) a été proposée [47]. La combinaison PAM-MPPM apporte une grande amélioration en efficacité spectrale, puisque l'impulsion peut prendre deux niveaux ou plus, où la relation entre les niveaux est un paramètre de conception. Dans ce format de modulation, chaque séquence de  $b$  bits est encodée avec un des  $L = 2^b$  symboles, chacun de durée  $T = \frac{\log_2 L}{D}$  ( $D$  est le débit) est partitionné en  $M$  slots de durée  $T_s = T/M$ . Par la combinaison Position-Amplitude, le nombre de symboles possible (code-book) par cette méthode est donné par:

$$L_{MPAPM} = 2^w \binom{M}{w} = 2^w \frac{M!}{w!(M-w)!} \quad (4.01)$$

Où  $w$  est le nombre d'impulsions par symbole.

Pour la clarté et la simplicité de l'analyse, on va prendre trois impulsions par symboles avec deux niveaux pour chacune. De ce fait, les trois impulsions dans la modulation MPAPM peuvent prendre un des deux niveaux (A1, A2) pour transmettre un des  $L$  symboles. Le nombre de symboles possible par 3MPAPM avec la combinaison Position-Amplitude est donné par :

$$L_{3MPAPM} = 2^3 \binom{M}{3} = 8 \frac{M!}{3!(M-3)!} = \frac{4}{3} M(M-1)(M-2) \quad (4.02)$$

La valeur de  $L$  n'est généralement pas une puissance de deux, alors on doit éliminer quelques combinaisons résultantes pour avoir  $L = 2^b$ .

#### 4.2.2.1. Le Débit de MPAPM

Le débit atteint avec la modulation MPPM et MPAPM est donné par:

$$D = \frac{\log_2 L}{T} \quad (4.03)$$

Où :  $L$  est le nombre de symboles possible pour MPPM ou MPAPM et  $T$  est la durée de symbole,

$D$  est exprimé en bit/s.

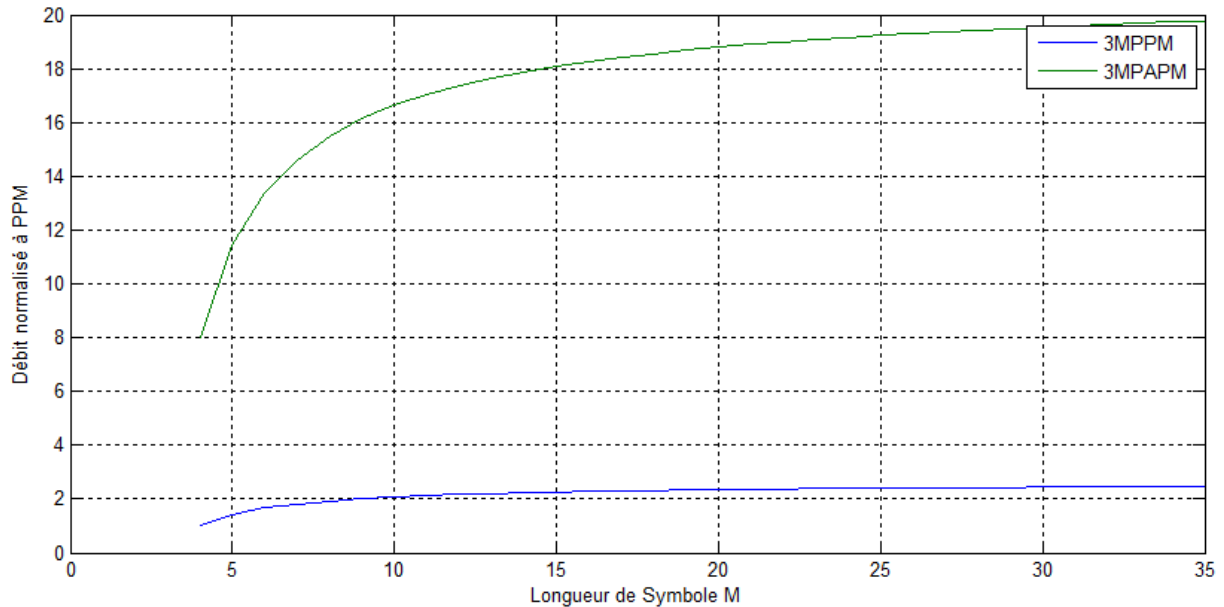
Pour montrer l'amélioration en débit on va utiliser le paramètre  $R$  qui représente le débit normalisé.

$$R = \frac{D_M}{D_{PPM}} = \frac{\log_2 L}{\log_2 M} \quad (4.04)$$

Où:  $D_M$  est le débit de MPPM ou de MPAPM.

La figure 4.03 représente le débit normalisé ( $R$ ) de 3MPPM et 3MPAPM en fonction de la longueur du symbole  $M$ . Pour  $M = 4$ , le débit atteint par 3MPAPM est exactement deux fois et

demie plus grand que celui de 3MPPM, ce rapport diminue avec l'augmentation de la valeur de  $M$ , pour être presque constant d'environ 1,3 à partir de  $M = 32$ . Cela montre que la combinaison des modulations MPPM et PAM a vraiment améliorée le débit de transmission.



**Figure 4.03 : Débit normalisé de 3MPPM et 3MPAPM**

#### 4.2.2.2. Exigence en puissance et efficacité spectrale de MPAPM

L'efficacité spectrale et l'efficacité en puissance sont en générale inversement proportionnelles. Concernant l'exigence en puissance, chacune des impulsions dans 3MPAPM peut prendre deux niveaux possibles. Dans ce travail, la relation entre les amplitudes (intensités des impulsions)  $A_1$  et  $A_2$  utilisée dans 3MPAPM est donnée par:

$$A_2 = 2.A_1 \quad (4.05)$$

L'exigence moyenne en puissance de la modulation MPAPM normalisée à OOK a été étudiée par Yu Zeng et Al [47]. Dans ce qui suit, on va essayer de présenter des relations plus générales.

Dans le cas général, tous les symboles MPAPM doivent avoir une puissance moyenne parmi les  $w+1$  suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} P_1 = 0A_1 + wA_2 \\ P_2 = 1A_1 + (w-1)A_2 \\ P_3 = 2A_1 + (w-2)A_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ P_w = (w-1)A_1 + A_2 \\ P_{w+1} = wA_1 + 0A_2 \end{array} \right. \quad (4.06)$$

La puissance moyenne des  $(w+1)$  puissances est donnée par :

$$\begin{aligned} P_{MPAPM} &= \frac{P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_{w+1}}{w+1} \\ &= \frac{A_1 + 2A_1 + 3A_1 + \dots + wA_1 + \dots + A_2 + 2A_2 + 3A_2 + \dots + wA_2}{w+1} \end{aligned} \quad (4.07)$$

Après simplification, la valeur moyenne des  $(w+1)$  puissances est donnée par :

$$P_{MPAPM} = (A_1 + A_2) \frac{w}{2} \quad (4.08)$$

La valeur moyenne des  $(w+1)$  puissances pour MPAPM est donnée par :

$$P_{MPAPM} = \frac{3w}{2} A_1 \quad (4.09)$$

La puissance moyenne par symbole pour MPPM est donnée par :

$$P_{MPPM} = wA_1 \quad (4.10)$$

D'après les relations (4.09) et (4.10), la relation liant les deux puissances moyennes MPPM et MPAPM est donnée par:

$$\frac{P_{MPAPM}}{P_{MPPM}} = \frac{3}{2} \quad (4.11)$$

La puissance moyenne normalisée de la modulation MPAPM est donnée par:

$$\frac{P_{MPPM}}{P_{OOK}} \times \frac{P_{MPAPM}}{P_{MPPM}} = \frac{P_{MPAPM}}{P_{OOK}} \quad (4.12)$$

L'exigence moyenne en puissance de MPAPM normalisée à OOK est donnée par:

$$\frac{P_{MPAPM}}{P_{OOK}} = \frac{3w}{\sqrt{Md \log_2 L_{MPPM}}} \quad (4.13)$$

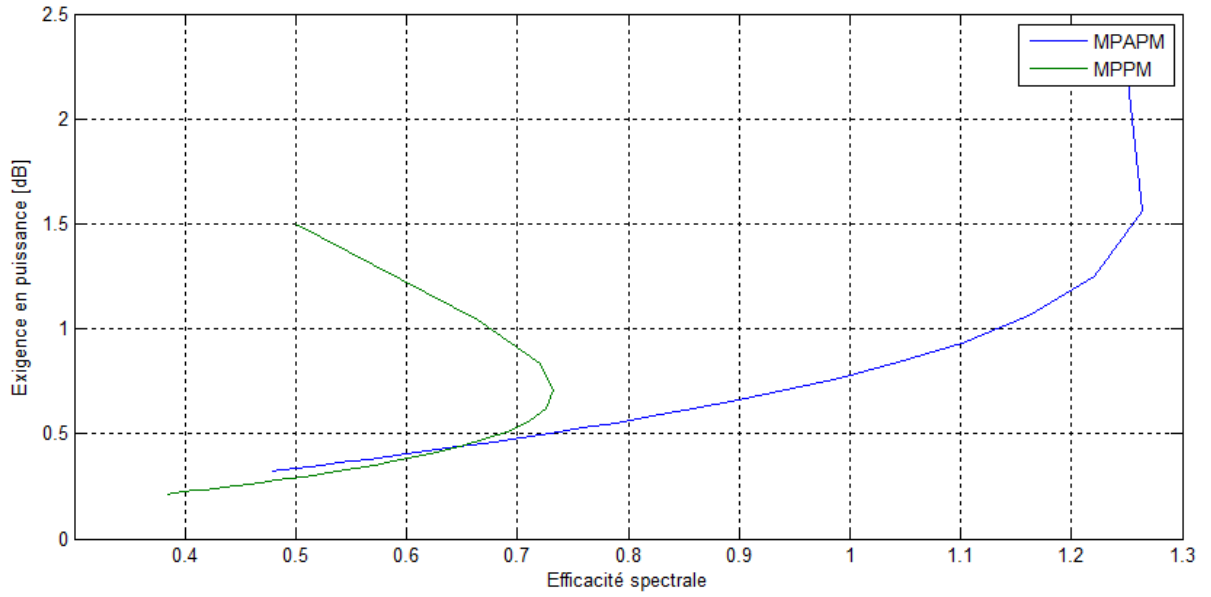
Concernant l'efficacité spectrale, il y a plusieurs méthodes pour définir la bande passante, la méthode la plus simple est l'inverse de la durée du slot.

$$B_{MPAPM} = \frac{M}{T_b \log_2 L_{MPAPM}} \quad (4.14)$$

L'efficacité spectrale, exprimée en bit/s/Hz, caractérise la capacité d'une modulation à permettre un débit maximum dans une largeur de canal minimum. L'efficacité spectrale de 3MPAPM est donnée par:

$$\eta_{3MPAPM} = \frac{\log_2 L_{3MPAPM}}{M} = \frac{\log_2 \left( \frac{4}{3} M(M-1)(M-2) \right)}{M} \quad (4.15)$$

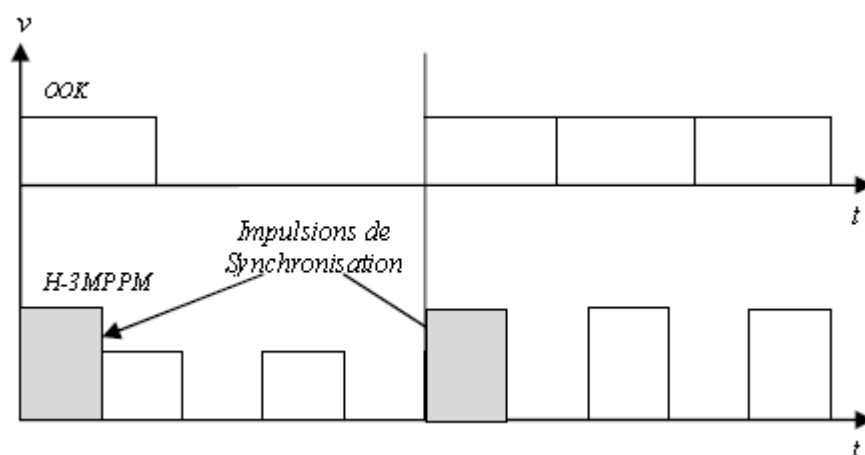
La figure 4.04 présente l'exigence en puissance normalisée, basée sur l'efficacité spectrale pour 3MPPM et 3MPAPM pour différentes valeurs de  $M$ , allant de 4 à 32. Cette figure montre que pour les deux concepts de modulation, l'efficacité spectrale diminue quand  $M$  augmente, avec différents comportements. 3MPAPM est beaucoup plus efficace que MPPM en termes de bande passante, et elle l'est moins en termes de puissance. Pour  $M = 4$ , l'efficacité spectrale de 3MPAPM est d'environ 2,5 fois celle du MPPM avec 1,9 dB de pertes en efficacité de puissance. Pour  $M = 32$ , l'efficacité spectrale de 3MPAPM est d'environ 1,3 celle de MPPM avec toujours les mêmes pertes dans l'efficacité en puissance. Ces résultats montrent l'intérêt de l'utilisation de deux niveaux par impulsion dans l'amélioration de l'efficacité spectrale. Cette dernière est inversement proportionnelle à l'efficacité en puissance, ce qui explique l'augmentation de l'exigence en puissance de MPAPM comparée à MPPM.



**Figure 4.04 :** *Exigence en puissance en fonction de l'efficacité spectrale pour 3MPPM et 3MPAPM*

#### 4.2.3 Harmonic MPPM (H-MPPM)

Les modulations PPM, MPPM et MPAPM souffrent de problème d'absence de synchronisation, essentiel pour avoir une transmission efficace, simple et moins complexe dans un système de communications optique sans fil. Pour résoudre ce problème d'absence de synchronisation des symboles, on va présenter un nouveau concept de modulation : H-MPPM (Harmonic MPPM) [48] basé sur MPAPM. On va maintenir le système de base, chaque impulsion peut prendre deux niveaux, mais avec quelques modifications. Parmi les  $w$  impulsions, on va implanter une impulsion  $P_1$  au début de chaque symbole pour la synchronisation, et les autres impulsions  $P_n$  seront porteuses d'information. L'amplitude de l'impulsion de synchronisation  $P_1$  dépend de l'amplitude des impulsions porteuses d'information  $P_n$  du symbole précédent, qui ont la même amplitude. Si l'amplitude des impulsions  $P_n$  est  $A_1$ , alors l'amplitude de  $P_1$  est  $A_2$  selon la figure 4.05, et si l'amplitude des impulsions  $P_n$  est  $A_2$ , alors l'amplitude de  $P_1$  est  $A_1$ . Les amplitudes des impulsions changent d'une façon harmonique, d'où la notation Harmonic MPPM.



**Figure 4.05 :** Exemple d'encodage d'une série de bit de données H-3MPPM

Les impulsions  $P_n$  ont la même amplitude, soit  $A_1$  ou  $A_2$ , nous offrant ainsi deux intérêts : la simplification de l'opération de démodulation au niveau du récepteur et la mise en place de l'opération de synchronisation.

#### 4.2.3.1. Simplification de l'opération de démodulation au niveau du récepteur

Si les impulsions  $P_n$  sont envoyées avec l'amplitude  $A_2$  et le système de décision détecte une ou plusieurs impulsions avec une amplitude  $A_1$  (atténuation durant le trajet), alors le système de décision va attribuer automatiquement l'amplitude  $A_2$  à ces impulsions. Ce qui n'est pas le cas avec des impulsions qui prennent à la fois des amplitudes différentes.

#### 4.2.3.2. Mise en place de l'opération de synchronisation

Puisque l'amplitude de l'impulsion de synchronisations  $P_1$  est toujours différente de l'amplitude des impulsions porteuses de l'information  $P_n$ , donc au niveau du récepteur, la distinction entre les impulsions de synchronisation et celles porteuses de l'information sera possible. Dans le cas contraire, l'impulsion de synchronisation implantée au début de chaque symbole sera inutile, puisque sa valeur pourrait être prise par les autres impulsions.

*Remarque :* Pour la modulation H-MPPM, la durée de chaque symbole  $T$  est partitionnée en  $M$  slots, chacun a une durée de  $T/M$ . Parmi les  $M$  slots,  $w$  slots contiennent des impulsions avec deux niveaux d'amplitude possible ( $A_1, A_2$ ).

#### 4.2.3.3. Nombre de symboles possible avec H-MPPM

Le nombre de symboles possible avec H-MPPM est :

$$L_{H-MPPM} = 2 \binom{M-1}{w-1} = 2 \frac{(M-1)!}{(w-1)!(M-w)!} \quad (4.16)$$

Pour  $w=3$ , on a :

$$L_{H-3MPPM} = 2 \binom{M-1}{2} = (M-1)(M-2) \quad (4.17)$$

D'habitude  $L$  n'est pas une puissance de deux, alors généralement on doit éliminer quelques combinaisons résultantes pour atteindre  $L = 2^b$ .

#### 4.2.3.4. Le Débit de H-MPPM

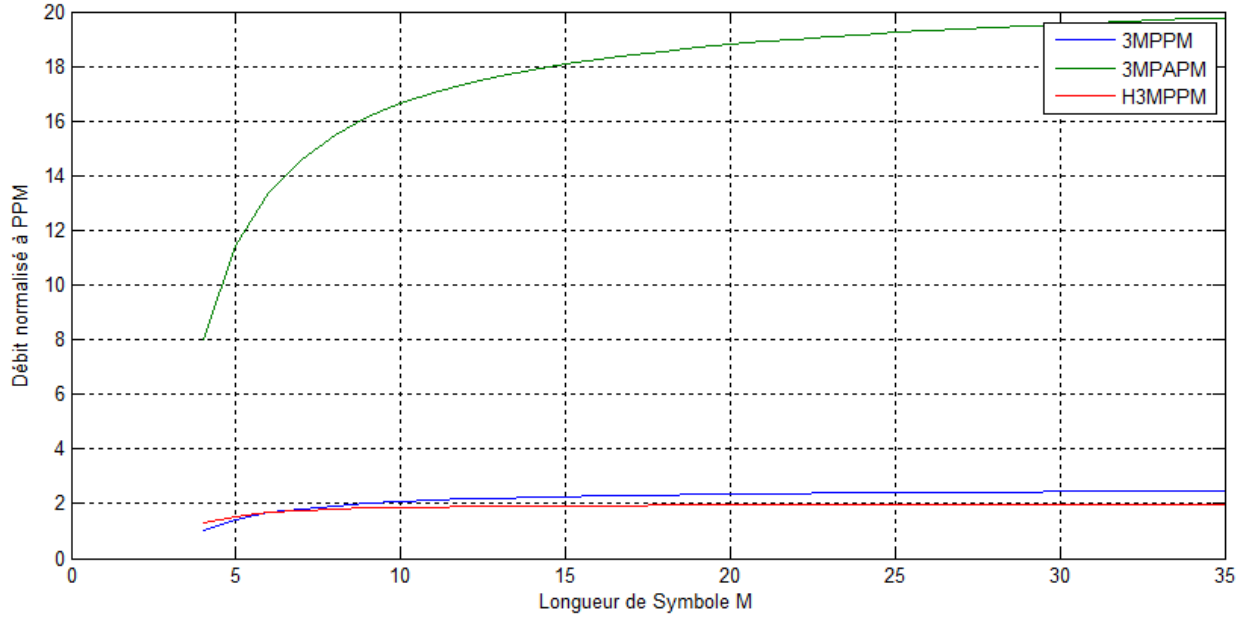
Le débit de transmission de la modulation H-3MPPM normalisé à celui de la PPM est donné par :

$$R = \frac{D_{H-MPPM}}{D_{PPM}} = \frac{\log_2 L_{H-MPPM}}{\log_2 M} \quad (4.18)$$

La figure 4.06 ci-après représente le débit normalisé des modulations 3MPPM, 3MPAPM et H-3MPPM basées sur la longueur de symbole  $M$ .

H-3MPPM présente le rapport de débit le plus bas parmi les trois méthodes de modulations. Au-delà de  $M = 6$ , la modulation 3MPPM présente un rapport  $R$  plus élevé que H-3MPPM, qui augmente en fonction de  $M$ , pour atteindre un rapport de 1,25 quand  $M = 32$ .

D'autre part, 3MPAPM présente le rapport de débit le plus élevé par rapport à 3MPPM et H-3MPPM. Par exemple, pour  $M = 4$  le rapport de débit de 3MPAPM est exactement deux fois supérieur à celui de H-3MPPM. La différence entre les rapports diminue avec l'augmentation de  $M$  pour atteindre une valeur de 1,5 pour  $M = 32$ .



**Figure 4.06 :** Débit normalisé de 3MPPM, 3MPAPM et H-3MPPM

Ces résultats montrent que la modulation H-MPPM n'est pas la solution idéale lorsque le débit représente une plus grande importance. La dégradation en débit est causée par la diminution du nombre de symboles offert par H-MPPM, qui est le résultat de l'attribution d'une seule amplitude à la fois aux impulsions porteuse d'information.

#### 4.2.3.5. Exigence en puissance et efficacité spectrale de H-MPPM

Pour effectuer une meilleure comparaison entre H-MPPM et MPAPM, la relation entre les amplitudes  $A_1$  et  $A_2$  de H-MPPM sera la même que pour la modulation MPAPM.

Tous les symboles de H-MPPM doivent avoir une parmi les quatre puissances moyennes suivantes:

$$\begin{cases} p_1 = A_1 + (w-1)A_2 \\ p_2 = (w-1)A_1 + A_2 \\ p_3 = wA_1 \\ p_4 = wA_2 \end{cases} \quad (4.19)$$

Par conséquent, la puissance moyenne de H-MPPM est donnée par:

$$P_{H-MPPM} = \frac{A_1 + (w-1)A_2 + (w-1)A_1 + A_2 + wA_1 + wA_2}{4} \quad (4.20)$$

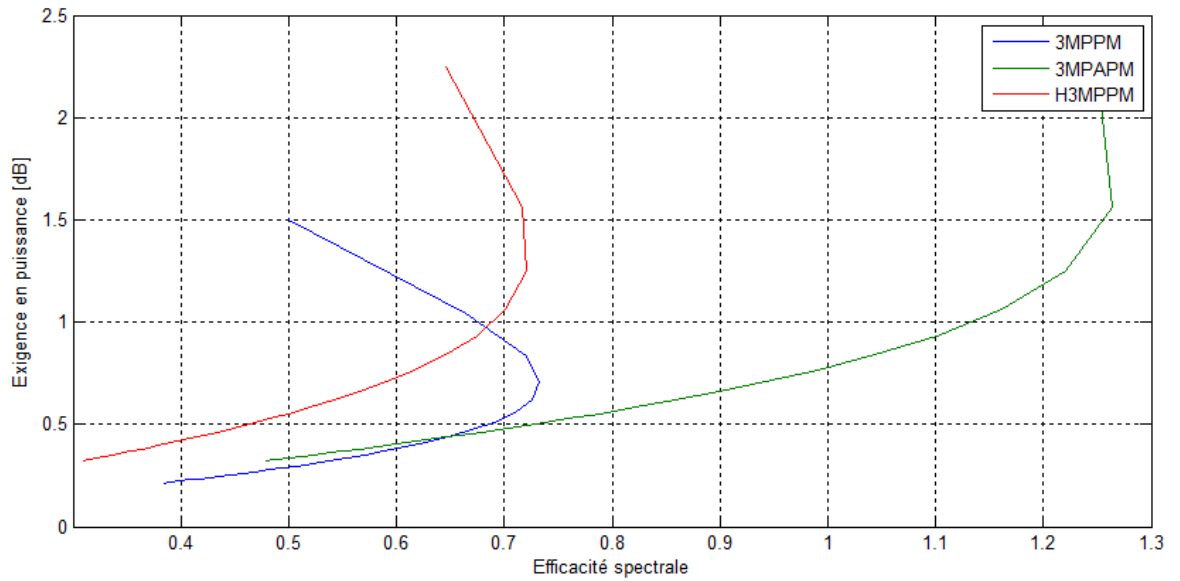
La relation entre les deux amplitudes  $A_1$  et  $A_2$  est donnée par (4.05), de ce fait, la puissance moyenne des quatre puissances de H-MPPM est donnée par :

$$P_{H-MPPM} = \frac{3w}{2} A_1 \quad (4.21)$$

On remarque d'après les relations (4.09) et (4.21) que malgré les modifications effectuées, les deux méthodes de modulation présentent la même puissance moyenne, de ce fait, les deux types de modulation ont la même formule générale de l'exigence normalisée en puissance, qui est donnée par (4.13). L'efficacité spectrale de H-3MPPM est donnée par:

$$\eta_{H-3MPPM} = \frac{\log_2 L_{H-3MPPM}}{M} = \frac{\log_2 [(M-1)(M-2)]}{M} \quad (4.22)$$

La figure 4.07 montre l'exigence en puissance en fonction de l'efficacité spectrale pour différentes longueurs de symbole  $M$  pour les trois modulations 3MPPM, 3MPAPM et H-3MPPM.



**Figure 4.07 :** Exigence en puissance en fonction de l'efficacité spectrale pour 3MPPM, 3MPAPM et H-3MPPM

Cette figure montre que la modulation H-3MPPM dépasse 3MPPM pour  $M = 4$  et 5 en termes d'efficacité spectrale, et au-delà de  $M = 6$  la modulation H-3MPPM a la plus faible efficacité spectrale. Du point de vue efficacité en puissance, les deux modulations 3MPAPM et H-3MPPM présentent la même efficacité, et c'est la modulation 3MPPM qui présente la meilleure efficacité

en puissance pour toutes les valeurs de  $M$ . Ces résultats montrent que la modulation H-MPPM présente la plus faible efficacité du point de vue puissance, et le plus faible débit de données parmi les trois types de modulations, ce qui fait que la synchronisation des symboles est le seul avantage apporté par cette méthode.

#### 4.2.4 Anisochronous H-MPPM (AH-MPPM)

La méthode de modulation proposée H-MPPM a résolu le problème de synchronisation des symboles, mais présente un modeste débit, et une dégradation dans l'efficacité spectrale malgré l'attribution de deux niveaux aux impulsions. Anisochrone HMPPM (AH-MPPM) est une forme modifiée de H-MPPM, qui présente un débit de transmission plus élevé et une meilleure efficacité spectrale en éliminant tous les slots non utilisés au sein de chaque symbole.

Les modulations numériques d'impulsion se divisent en deux catégories, à savoir isochrone et anisochrone. Les systèmes isochrones encodent des données en faisant varier la position ou la largeur d'une impulsion, mais la structure globale du symbole reste invariable, comme c'est le cas de MPPM et H-MPPM. En revanche, dans les régimes anisochrones les symboles n'ont pas de structure fixe [49]. Dans le nouveau concept AHMPPM et afin d'éviter que le temps entre les impulsions de deux symboles voisins soit égal à zéro, un slot de garde supplémentaire (Inter Symbol Gap "ISG") sera ajouté à chaque symbole immédiatement après la dernière impulsion.

Dans AH-MPPM un symbole qui encode  $b$  bits de données est représenté par  $w$  impulsions suivies par un slot vide de garde. La longueur minimale et la longueur maximale des symboles sont respectivement données par  $(w+1)T_s$  et  $MT_s$ . Ainsi, la durée moyenne des symboles est donnée par:

$$T_{mean} = \frac{M + w + 1}{2} T_s \quad (4.23)$$

Le nombre de symboles possible avec AH-MPPM est donné par:

$$L_{AH-MPPM} = 2 \binom{M-2}{w-1} = 2 \frac{(M-2)!}{(w-1)!(M-w-1)!} \quad (4.24)$$

Pour  $w=3$ , on a :

$$L_{AH-MPPM} = 2 \binom{M-2}{2} = \frac{(M-2)!}{(M-4)!} = (M-2)(M-3) \quad (4.25)$$

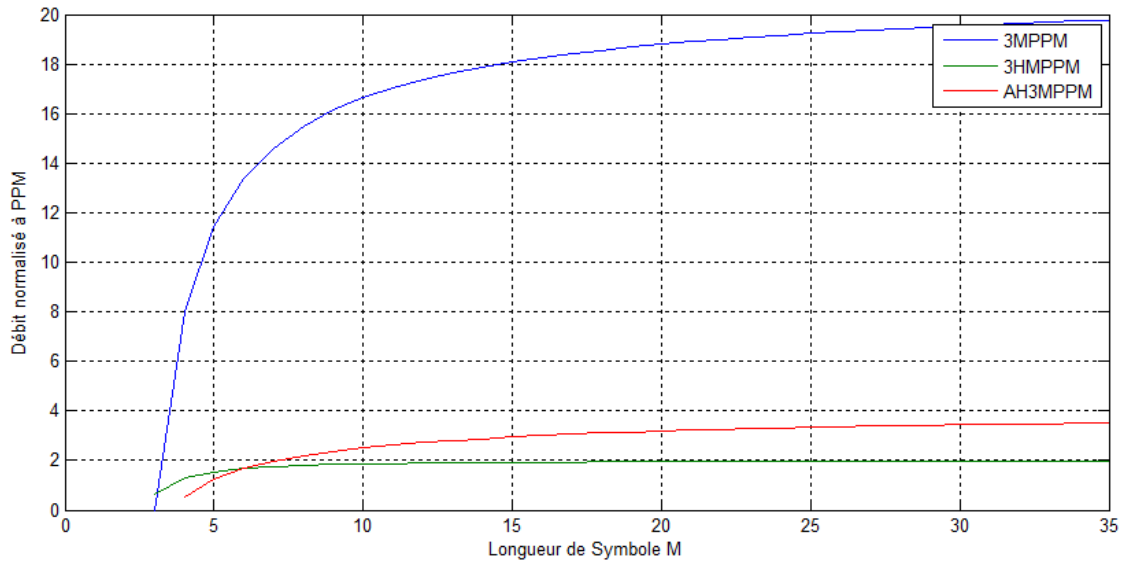
#### 4.2.4.1. Le débit de AH-MPPM

Une des principales raisons de la migration du concept isochrone au concept anisochrone est l'amélioration du débit de données. Le débit qui peut être atteint avec AHMPPM est fonction de la longueur moyenne des symboles:

$$D_{AH-MPPM} = \frac{\log_2 L_{AH-MPPM}}{T_{mean}} \quad (4.26)$$

Pour montrer l'amélioration en débit d'information, nous utilisons le paramètre  $R$ , qui représente le débit de données normalisé de la modulation AH-MPPM basé sur la longueur moyenne des symboles.

$$R = \frac{D_{AH-MPPM}}{D_{PPM}} = \frac{2M \log_2 L_{AH-MPPM}}{(M+w+1) \log_2 M} \quad (4.27)$$



**Figure 4.08 :** Débit normalisé de 3MPAPM, H-3MPPM et AH-3MPPM

La figure 4.08 montre les différents rapports de débit de 3MPAPM, H-3MPPM et AH-3MPPM basés sur la longueur des symboles  $M$ .

D'après cette figure, la modulation AH-3MPPM montre un meilleur débit que H-3MPPM à partir de  $M = 7$ , qui augmente en fonction de  $M$ , pour être environ 1,7 fois celui de H-3MPPM à  $M = 32$ . D'autre part, la modulation 3MPAPM présente un meilleur débit que AH-3MPPM pour des valeurs de  $M$  inférieures à 15. Au-delà de 15, la modulation AH-3MPPM est meilleure. Ces résultats montrent l'avantage d'introduire le concept anisochrone sur l'amélioration du débit pour une modulation donnée.

#### 4.2.4.2. Exigence en puissance et efficacité spectrale de AH-MPPM

Le rapport entre les deux amplitudes  $A_1$  et  $A_2$  dans AH-MPPM est le même que pour H-MPPM, et la formule générale de l'exigence en puissance moyenne normalisée pour AH-MPPM est la même que dans le cas de la modulation H-3MPPM, donné par (4.13). L'efficacité spectrale de la modulation AH-MPPM basée sur la longueur moyenne des symboles est donnée par:

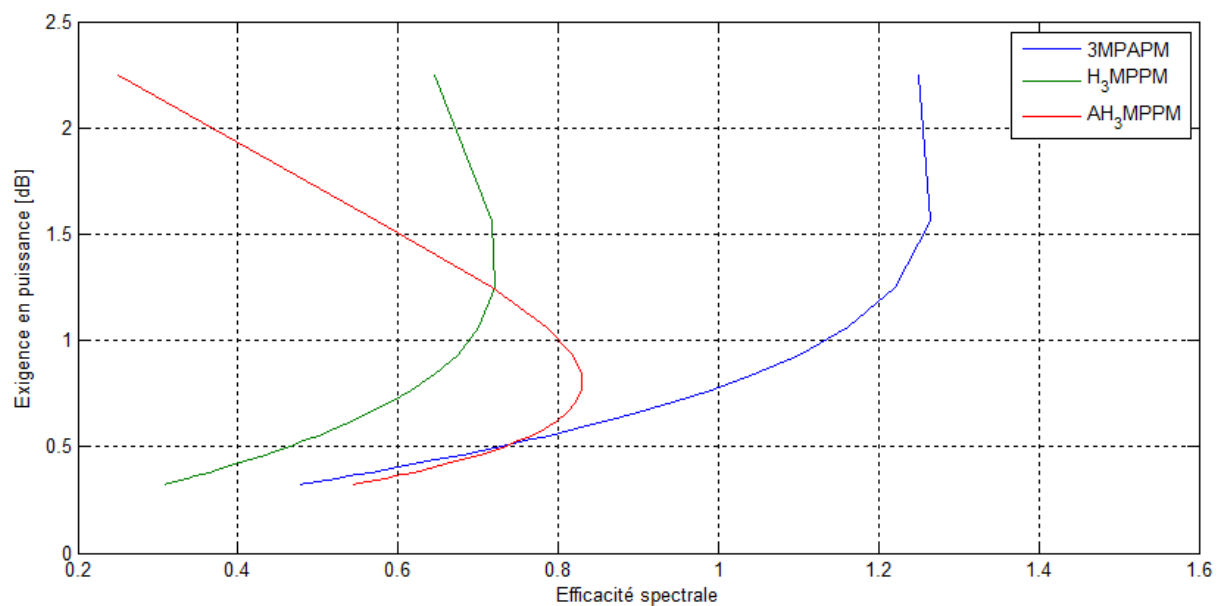
$$\eta_{AH-MPPM} = \frac{\log_2 L_{AH-MPPM}}{M_{mean}} = \frac{2 \log_2 L_{AH-MPPM}}{(M + w + 1)} \quad (4.28)$$

L'efficacité en bande passante et l'exigence en puissance normalisées pour 3MPAPM, H-3MPPM, et AH-3MPPM, sont données dans le tableau 4.02 ci-après.

La figure 4.09 ci-dessous montre l'exigence en puissance en fonction de l'efficacité spectrale des modulations 3MPAPM, H-3MPPM et AH-3MPPM pour différentes valeurs de  $M$ . Comme on peut le noter, en termes d'efficacité spectrale la modulation AH-3MPPM est meilleure que H-3MPPM pour toute valeur de  $M$  supérieur à 4, et comparée à 3MPAPM, AH-3MPPM présente moins d'efficacité spectrale pour  $M$  inférieur à 19, et elle est meilleure pour les valeurs de  $M \geq 20$ . Quand il s'agit d'efficacité en puissance, la modulation AH-3MPPM présente l'efficacité en puissance la plus faible parmi les trois types de modulations, avec pertes de 0.1 dB à  $M = 5$  pour atteindre 1.1 dB à  $M = 32$ .

	MPAPM	H-MPPM	AH-MPPM
L	$2^w \frac{M!}{w!(M-w)!}$	$2 \frac{(M-1)!}{(w-1)!(M-w)!}$	$2 \frac{(M-2)!}{(w-1)!(M-w-1)!}$
Exigence en puissance moyenne normalisée	$\frac{P}{P_{OOK}} = \frac{3w}{\sqrt{Md \log_2 L_{MPPM}}}$		
Efficacité spectrale	$\eta = \frac{\log_2 L}{M}$		

**Tableau 4.02 :** Expressions des efficacités en bande passante et Exigences normalisées en puissance pour MPAPM, H-MPPM, AH-MPPM



**Figure 4.09 :** exigence en puissance normalisée en fonction de l'efficacité spectrale pour 3MPAPM, H-3MPPM et AH-3MPPM

La combinaison des modulations MPPM et PAM a été déjà proposée sous forme de MPAPM, et elle présente une amélioration remarquable en termes de débit et d'efficacité spectrale, mais le problème de synchronisation est toujours présent, nous sommes censés donc de trouver une solution. Dans un premier temps on a présenté H-MPPM « Harmonic Multi-Pulse Position Modulation » pour résoudre le problème de synchronisation des symboles, par l'implémentation d'une impulsion à caractéristiques spécifiques au début de chaque symbole. Mais cette méthode présente un faible débit et une efficacité spectrale médiocre. D'où l'idée de proposer une autre amélioration de H-MPPM : AH-MPPM (Anisochronous Harmonic Multi-Pulse Position Modulation) qui

présente un débit de transmission plus élevé et une meilleure efficacité spectrale en éliminant tous les slots non utilisés au sein de chaque symbole, avec moins d'efficacité en puissance. Cette efficacité en puissance peut être contrôlée par le paramètre de conception défini par la relation (4.05).

### **4.3 Conclusion**

Le choix du format de modulation est l'un des facteurs principaux dans la réalisation d'un système de communication FSO performant à un coût raisonnable et complexité acceptable. Il existe plusieurs méthodes de modulations compatibles avec les systèmes de communication optiques sans fil, mais elles souffrent de problème d'absence de synchronisation des symboles, essentiel pour avoir une transmission efficace, simple et moins complexe. Pour résoudre ce problème, on a introduit dans ce chapitre une nouvelle méthode de modulation basée sur la combinaison MPPM-PAM. Cette approche résout le problème de synchronisation des symboles et présente une amélioration remarquable en termes de débit et d'efficacité spectrale. Le seul inconvénient de cette méthode est une dégradation en termes d'efficacité en puissance. Chaque système de communication optique sans fil a ses propres caractéristiques et ses propres exigences. Dans ce chapitre on a proposé trois types de modulation, chacune se caractérise par un paramètre de conception important, soit la synchronisation, soit le haut débit, soit une meilleur efficacité spectrale où en encore la bonne efficacité en puissance. Ces méthodes de modulation sont donc des solutions intéressantes pour les différents systèmes de communication optiques sans fil.

## **CHAPITRE 5**

### **SIMULATION DE LA DISPONIBILITE ET DE LA QUALITE DE SERVICE D'UNE LIAISON FSO**

#### **5.1 Introduction**

La détermination des meilleures conditions de disponibilité et de qualité de service requises pour une liaison optique atmosphérique nécessite une étude précise, théorique et expérimentale étant donné que cette disponibilité dépend d'une variété de facteurs, y compris la fiabilité des équipements et la conception du réseau qui sont des facteurs bien connus et assez quantifiables. Le plus grand défi inconnu est l'effet des paramètres climatiques et atmosphériques qui changent à travers le temps et selon la situation géographique; tels que la pluie, la présence de cellules de turbulence ainsi que la lumière ambiante, et plus particulièrement en présence de brouillard qui est le plus grand défi pour leur déploiement. Ainsi, il apparaît très important de bien connaître les limites et les possibilités offertes par ce type de liaison afin d'obtenir une qualité de service en correspondance avec les attentes d'un opérateur de télécommunications. De plus, afin de pouvoir estimer la disponibilité de cette liaison, la marge brute est l'un des éléments clefs lors du déploiement d'une liaison optique sans fil. Cet élément permet de connaître la capacité à transmettre des données malgré les variations des conditions climatiques.

Le but du présent chapitre est de présenter d'abord les modèles théoriques qui servent à calculer les différentes atténuations atmosphériques, puis de simuler avec l'outil « FSO Prediction », développé par l'équipe de Recherche et Développement chez Orange, la disponibilité et la qualité de la liaison en fonction des caractéristiques du système utilisé et en fonction des caractéristiques de la liaison optique sans fil [50].

#### **5.2 La marge brute d'une liaison FSO**

Lors de la conception d'un système de transmission optique sans fil, une analyse de marge de liaison est nécessaire, c'est comme dans le cas de la conception des liaisons fibres optiques. En général, il faut connaître les niveaux de puissance minimum que l'émetteur FSO est capable de détecter, et assurer qu'une puissance suffisante soit transmise afin de répondre à cette exigence. Cependant, contrairement à un système à base de fibres optiques, les pertes présentes dans un système FSO varient selon les conditions météorologiques (par exemple si le brouillard est très dense, la transmission est pratiquement impossible). La marge brute de puissance d'une liaison optique atmosphérique est une grandeur qui permet de caractériser et de décrire le signal transmis

entre l'émetteur et le récepteur et de donner toutes les contributions pertinentes en termes de pertes du signal ainsi que sur la disponibilité de la liaison. Cette marge brute peut être définie comme étant la puissance optique disponible au-delà de la sensibilité du récepteur.

Les données constructeurs telles que la puissance d'émission  $P_e$ , la sensibilité du récepteur  $S_r$ , les pertes système  $P_{sys}$ , et quelques caractéristiques du site d'installation permettent de déduire la marge brute par la formule suivante :

$$M_B = P_e + |S_r| - Aff_{geo} - Aff_{mol} - \sum P_{sys} \quad (5.01)$$

Où :  $P_e$  est la puissance émise par l'émetteur (en dBm) ;

$S_r$  est la sensibilité du récepteur (en dBm) ;

$Aff_{geo}$  est l'atténuation géométrique de la liaison (en dB) ;

$Aff_{mol}$  est l'atténuation moléculaire correspondante à la longueur d'onde utilisée dans la liaison (en dB) ;

$P_{sys}$  sont les pertes relatives au système (en dB) incluant les pertes de couplage entre le laser et la lentille émetteur, les pertes de couplage entre la lentille et la photodiode réceptrice, l'atténuation et la réflexion de la lentille qui sont supposées nulles dans le cas idéal.

La marge brute de la liaison est un élément de base pour réaliser des calculs de probabilités de disponibilité de la liaison. Elle peut être considérée comme le seuil de performance du lien. En effet, pour qu'une liaison optique atmosphérique soit opérationnelle, la marge brute du système doit compenser toutes les pertes imprévisibles qui sont variables dans le temps, telles que : l'atténuation atmosphérique, l'atténuation due au phénomène de scintillation qui provoque une fluctuation du niveau de la puissance reçue causée par la présence de cellules de turbulence dans l'air, l'atténuation due au mouvement des grands immeubles entraînant ainsi un dépointage optique, l'atténuation par la lumière ambiante.

Le but du logiciel « FSO Prediction » est de chercher la probabilité pour laquelle les affaiblissements supplémentaires sont inférieurs ou égales à la marge brute de la liaison

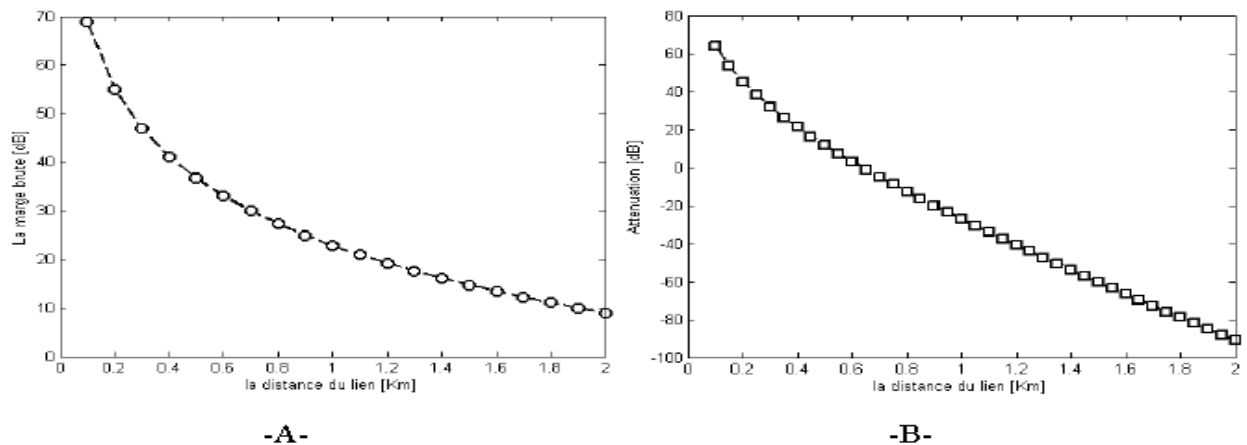
(probabilité de disponibilité de la liaison) ou supérieurs à cette marge brute (probabilité d'interruption de la liaison). Nous signalons que la marge brute de puissance d'une liaison optique atmosphérique reste un modèle qui nous permet une bonne approximation de la réalité. Dans notre modèle nous n'avons pas pris en compte quelques sources de bruits telles que les pertes dues aux erreurs de pointage et aux nuages.

Il est à noter que la marge brute linéique exprimée en dB/km est donnée par :

$$M_{BLin} = \frac{1000}{l} M_B \quad (5.02)$$

Où  $l$  est la distance du lien (en m).

C'est évident que dans une atmosphère claire, un lien FSO peut avoir des centaines, voire des milliers de fois plus de puissance que dans une journée qui se caractérise par des conditions atmosphériques sévères. L'objectif final du calcul de la marge brute est d'examiner la distance maximale à laquelle nous pouvons placer l'émetteur et le récepteur, tout en conservant suffisamment de marge pour permettre une disponibilité minimale de la liaison (par exemple 99,9%) en donnant une valeur quantitative du montant de pertes atmosphériques que le système sera en mesure de tolérer. Pour une distance donnée, nous pouvons savoir quelle est la valeur de la puissance disponible au niveau de la réception. A partir de cette valeur, nous pouvons juger la fiabilité de la liaison et les pertes atmosphériques que le système sera capable de tolérer.



**Figure 5.01 :** -A-Marge brute d'une liaison en fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur.-B-L'affaiblissement géométrique en fonction de la distance du lien

La figure 5.01.A présente la marge brute d'une liaison FSO (avec des paramètres donnés) en fonction de la distance entre les deux extrémités de la liaison, et la figure 5.01.B présente l'atténuation en fonction de la distance du lien. La première courbe fournit la marge brute qui permet de compenser les pertes atmosphériques. La deuxième courbe est dérivée de la première et montre la portée maximale pour laquelle le système FSO fonctionnera avec une atténuation atmosphérique donnée.

### 5.2.1 Affaiblissement moléculaire

Il y a plusieurs mécanismes qui réduisent la marge brute de la liaison et donc la performance ou la disponibilité d'un système FSO. Ces paramètres sont liés au climat (par exemple la pluie, le brouillard), d'autres sont liés aux constituants atmosphériques (par exemple les molécules gazeuses) qui sont présents naturellement dans l'atmosphère. L'affaiblissement moléculaire est principalement le résultat d'un effet additif d'absorption et de diffusion du signal émis par les molécules de gaz présents dans l'atmosphère. Cet affaiblissement est fonction de la longueur d'onde utilisée, il est relativement faible. C'est l'absorption qui prédomine dans l'infrarouge, tandis que c'est la diffusion qui prédomine dans la gamme des ondes visibles et ultraviolettes. Quelques valeurs typiques de coefficients d'absorption moléculaire sont données dans le tableau 5.01. [51].

Longueur d'onde (nm)	Affaiblissement linéique (dB/km)
550	0.13
690	0.01
780	0.41
850	0.41
1550	0.01

**Tableau 5.01 :** Valeurs de l'affaiblissement linéique dû à la composition de l'atmosphère pour quelques longueurs d'onde utilisées dans les systèmes FSO.

La formule suivante donne l'atténuation moléculaire pour un lien donnée :

$$Aff_{mol} = Aff_{Lin}(\lambda) * l \quad (5.03)$$

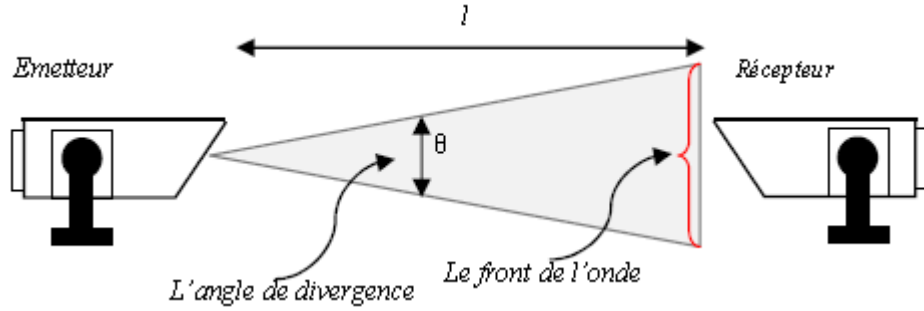
Où :  $Aff_{Lin}$  est l'affaiblissement moléculaire linéique (en dB/km),

$l$  est la distance entre l'émetteur et le récepteur (en km),

$Aff_{mol}$  est l'affaiblissement moléculaire total (en dB).

### 5.2.2 Affaiblissement géométrique

L'affaiblissement géométrique se réfère à des pertes qui se produisent en raison de la divergence des faisceaux optiques. Il est à noter que, pour un système FSO spécifique, l'atténuation géométrique est une valeur fixe puisqu'elle ne varie pas au cours du temps.



**Figure 5.02 :** Les paramètres pour calculer l'affaiblissement géométrique

En raison de la divergence présente dans la liaison, une grande partie de la lumière n'est pas recueillie par le récepteur. Cette perte est égale au rapport entre la surface de capture ( $S_{\text{Capture}}$ ) au niveau du récepteur et la surface du spot de l'onde ( $S_l$ ) à une distance  $l$  comme le montre la figure 5.02. L'affaiblissement géométrique dans un système FSO est donné par la relation suivante [52]:

$$Aff_{geo} = 10 \log \left( \frac{S_l}{S_{\text{Capture}}} \right) \quad (5.04)$$

Comme l'angle de divergence du faisceau est assez petit dans les systèmes optiques sans fil (en général de l'ordre de quelques degrés), on peut considérer alors que  $\tan \frac{\theta}{2} \approx \frac{\theta}{2}$ . Par conséquent, le rayon du spot à une distance  $l$  vaut  $l\theta/2$ , d'où la surface du spot s'écrit :

$$S_l = \frac{\pi}{4} (l\theta)^2 \quad (5.05)$$

Ainsi, l'affaiblissement géométrique dans un système FSO est donné par :

$$Aff_{geo} = 10 \log \left[ \frac{\pi / 4 \cdot (l\theta)^2}{S_{\text{Capture}}} \right] \quad (5.06)$$

Où :  $l$  est la distance entre l'émetteur et le récepteur (en km),

$\theta$  est la divergence du faisceau (en mrad),

$S_{\text{Capture}}$  est la surface de capture du récepteur (en  $\text{m}^2$ ).

D'après cette relation (5.06), l'affaiblissement géométrique est donc en fonction de la divergence du faisceau, de la distance de la liaison et de la surface de capture du récepteur, quelle que soit la longueur d'onde et la puissance d'émission.

### **5.2.3 Les Pertes du système**

La première source de pertes dans un système FSO est due aux lentilles imparfaites et à d'autres éléments optiques tels que les coupleurs. Par exemple, une lentille peut transmettre 96% de la lumière, mais 4% est réfléchi ou absorbée [53]. Bien que les lentilles focalisent les faisceaux lumineux, elles réfléchissent et absorbent une partie de la lumière transmise. La plupart du temps, cette valeur est déjà intégrée dans la puissance d'émission ou dans la sensibilité du récepteur. La distance entre l'émetteur et le récepteur peut-être assez grande, lors de l'installation du lien il est difficile de voir l'autre côté à l'œil nu. Dans ce cas, le système de suivi actif peut contenir des erreurs d'équilibrage. Si l'une de ces conditions existe, des pertes supplémentaires peuvent être ajoutées. En général, ces effets sont observés pour des distances de plus de 3 km [54].

## **5.3 Les effets atmosphériques**

La disponibilité et la fiabilité d'une liaison optique sans fil dépend du système utilisé, ainsi que des conditions climatiques et des paramètres atmosphériques tels que la pluie, les scintillations, et surtout le brouillard, qui est le plus grand défi dans le déploiement des réseaux optiques sans fil. L'intensité et la durée de ces effets aura une incidence critique sur la fiabilité et la disponibilité de la liaison. Il est évident que la durée des événements météorologiques est très différente. La réaction des services de réseau due aux interruptions peut être variée. Les courtes ruptures (de quelques millisecondes) peuvent ne pas être remarquées par les utilisateurs (par exemple une connexion à internet). Par contre, les événements de plus longue durée ont un grand impact sur la performance des réseaux optiques sans fil. Il est donc nécessaire d'évaluer la disponibilité d'une liaison en fonction de la durée de l'événement. Donc, pour un système FSO prêt au déploiement la marge brute dépend de la distance, la localisation géographique, les conditions atmosphériques et

la période d'observation. Les deux principaux mécanismes de détérioration d'une telle transmission sont :

- La réduction globale du niveau de puissance optique détectée, due à l'atténuation géométrique, atmosphérique (molécules, aérosols, brouillard, pluie, ...) et à la lumière ambiante (rayonnement solaire),
- Les fluctuations de puissance du signal au niveau du récepteur (scintillations) dues aux variations de l'indice de réfraction du milieu traversé.

### **5.3.1 Atténuation par le brouillard**

Le brouillard est le facteur d'atténuation le plus critique parmi tous les facteurs, notamment dans l'infrarouge (bande d'absorption de la vapeur d'eau), puisque la taille des particules du brouillard est comparable aux longueurs d'onde optiques utilisées dans les systèmes de transmission FSO (Tableau 5.02) [54]. La façon la plus précise pour calculer l'atténuation pour des gouttelettes de brouillard est basée sur la théorie de diffusion de Mie, où l'émission dans les fenêtres optiques élimine les pertes dues à l'effet d'absorption. Toutefois, la théorie de diffusion de Mie exige des informations détaillées sur les paramètres, comme la taille des particules de brouillard, l'indice de réfraction, la distribution granulométrique qui ne peuvent être facilement disponibles sur une place d'installation donnée. En outre, elle implique des calculs complexes.

Type	Rayon ( $\mu\text{m}$ )
Molécule d'air	0.0001
Brouillard	1 à 20
Pluie	100 à 1000
Neige	1000 à 5000
Grêle	5000 à 50000

**Tableau 5.02 :** *Rayons des différents constituants de l'atmosphère*

L'utilisation de la visibilité est une autre façon pour calculer l'atténuation causée par le brouillard. Les modèles Kruse, Kim et Al Nabulsi utilisent cette approche pour prédire cette atténuation.

*Définition 5.01:* La visibilité est un concept défini pour la météorologie, elle caractérise la transparence de l'atmosphère, estimée à l'origine par un observateur humain. Elle est donnée par la Portée Optique Météorologique et mesurée à l'aide d'un Diffusiomètre [55].

L'atténuation spécifique pour les modèles de Kim et de Kruse est donnée par:

$$\alpha_{brouillard} = \frac{3.912}{v} \left( \frac{\lambda_{\mu m}}{0.55 \mu m} \right)^{-q} \quad (5.07)$$

Où :  $v$  est la visibilité

$\lambda_{\mu m}$  est la longueur d'onde en  $\mu m$

$q$  est le paramètre lié à la distribution de la taille des gouttelettes.

Pour le modèle de Kruse, le coefficient  $q$  est donné par:

$$q = \begin{cases} 1.6 & \text{si } v > 50km \\ 1.3 & \text{si } 6km < v < 50km \\ 0.585v^{1/3} & \text{si } v < 6km \end{cases} \quad (5.08)$$

L'équation (5.08) indique que pour n'importe quelles conditions météorologiques, il y a moins d'atténuation pour les longueurs d'onde importantes; on peut dire donc que l'atténuation est inversement proportionnelle à la longueur d'onde. Kim a rejeté cette propriété dans le cas du brouillard dense. Le coefficient  $q$  pour le modèle de Kim [26] est donné par:

$$q = \begin{cases} 1.6 & \text{si } v > 50km \\ 1.3 & \text{si } 6km < v < 50km \\ 0.016v + 0.34 & \text{si } 1km < v < 6km \\ v - 0.5 & \text{si } 0.5km < v < 1km \\ 0 & \text{si } v < 0.5km \end{cases} \quad (5.09)$$

Al Nabulsi [6] a proposé une autre relation pour prédire l'atténuation due au brouillard en caractérisant deux types séparément :

- Le brouillard d'advection qui est formé par les mouvements des masses d'air humide et chaud au-dessus des surfaces terrestres froides et maritimes. Il apparaît plus particulièrement au printemps lorsqu'il y a des déplacements d'air chaud et humide du sud sur des régions couvertes de neige. Les conditions favorables à la formation de ce type de brouillard présentent une très grande différence entre la température de l'air et celle du sol (10°C environ) et une forte humidité sur une épaisseur de quelques dizaines de mètres. La taille des particules ainsi que la teneur en eau liquide de ce type de brouillard sont assez

variées. Cependant on peut dire que le diamètre des gouttelettes est voisin de 20  $\mu\text{m}$  et que la teneur en eau liquide peut atteindre 0, 20  $\text{g}/\text{m}^3$  [6].

Al Nabulsi [6] fournit le coefficient d'atténuation du brouillard d'advection comme suit:

$$\gamma_{adv}(\lambda) = \frac{0.11478\lambda + 3.3867}{v} \quad (5.10)$$

- Brouillard de rayonnement ou brouillard de convection : Ce type de brouillard se produit en fin de journée ou de nuit lorsque le ciel est clair et que le sol est refroidi par un rayonnement. Si le vent au sol est nul, ce refroidissement ne peut guère se propager qu'aux couches atmosphériques immédiatement au contact du sol et si la température baisse au-delà du point de rosée, il se produit alors une condensation de la vapeur d'eau sur le sol. Le diamètre des particules de ce type de brouillard présente une faible variation autour de 4  $\mu\text{m}$  et la teneur en eau liquide est comprise entre 0, 01 et 0, 1  $\text{g}/\text{m}^3$  [6].

Al Nabulsi [6] fournit le coefficient d'atténuation du brouillard de rayonnement par:

$$\gamma_{conv}(\lambda) = \frac{0.18126\lambda^2 + 0.13709\lambda + 3.7502}{v} \quad (5.11)$$

L'atténuation linéique pour les deux types de brouillard est donnée comme suit :

$$\alpha_{Lin} = \frac{10}{\ln 10} \gamma(\lambda) \quad (5.12)$$

Où  $\alpha_{Lin}$  est exprimée en dB/km.

Pour ces modèles, la diffusion multiple est supposée négligeable, et tous les diffuseurs agissent de manière indépendante et sont distribués uniformément le long de la voie de transmission atmosphérique.

### 5.3.2 Atténuation par la pluie

La pluie se forme à partir de la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère, elle est constituée de gouttes d'eau dont la forme et le nombre sont variables dans le temps et dans l'espace. L'atténuation par la pluie est due essentiellement au phénomène de diffusion comme dans le cas des aérosols. Il est à noter que pour les ondes infrarouges, la longueur d'onde est inférieure au diamètre des gouttelettes de pluie. L'impact de la pluie sur les liaisons FSO est nettement inférieur

à celui du brouillard parce que le rayon des gouttelettes de pluie (200 à 2000  $\mu\text{m}$ ) [56] est significativement plus grand que les longueurs d'onde typiques utilisées dans les systèmes FSO. Les technologies RF qui utilisent des fréquences supérieures à 10 GHz sont négativement influencées par la pluie. L'affaiblissement dû à la pluie est indépendant de la longueur d'onde utilisée, et est fonction de l'intensité de la pluie (taux de précipitation) notée  $R$  (mm/h) selon la relation de Carbonneau [57]:

$$Aff_{pluie} = 1.076 * R^{0.67} \quad (5.13)$$

L'intensité  $R$  est le paramètre principal utilisé pour décrire la pluie, sa mesure est effectuée directement à l'aide de pluviomètres ou de radars météorologiques. Connaissant la marge de la liaison, nous pouvons déduire la probabilité d'interruption de la liaison due à la pluie.

### 5.3.3 Les effets de scintillations

Dans les climats chauds et secs, la turbulence peut causer des problèmes de transmission. Le réchauffement de l'air provoque la formation de cellules aléatoires de taille variable (allant de 10 centimètres à 1 kilomètre) [58] et de différentes températures. Ces diverses cellules possèdent des indices de réfractions différents. L'amplitude et la fréquence de scintillation dépendent de la taille des cellules comparée au diamètre du faisceau. Quand les hétérogénéités sont grandes comparées à la section du faisceau, le faisceau est dévié, or lorsqu'elles sont petites, le faisceau est élargi.

Le paramètre de structure de l'indice de réfraction  $Cn^2$  représente un bon outil de mesure de la turbulence [59]. Il n'est pas facile de mesurer ce paramètre, il dépend de la température, de la vitesse du vent, de l'altitude, de l'humidité et de la pression atmosphérique [60] ce qui le rend difficilement mesurable. Le paramètre de structure de l'indice de réfraction ( $Cn^2$ ) dépend de la température de l'air, il prend une valeur minimale après le lever et le coucher du soleil, et prend une valeur maximale l'après-midi.

Le paramètre de structure de l'indice de réfraction est pris comme suit [61] :

$$Cn^2 = \begin{cases} 10^{-13} & \text{pour forte turbulence} \\ 10^{-14} & \text{pour turbulence modérée} \\ 10^{-16} & \text{pour faible turbulence} \end{cases} \quad (5.14)$$

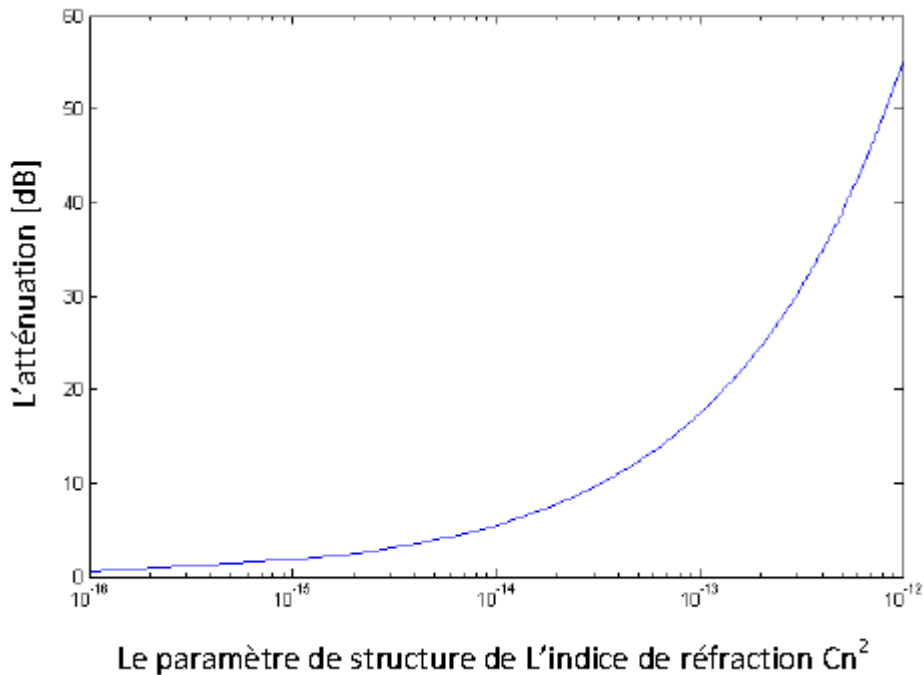
Où  $Cn^2$  est exprimé en  $m^{-2/3}$

Généralement  $Cn^2$  est plus important près du sol. Pour minimiser les effets de la scintillation sur la voie de transmission, les systèmes FSO ne doivent pas être installés à proximité des surfaces chaudes (toits de goudron ou de bitume). Il est recommandé que les unités FSO soient installées un peu plus haut que le niveau du toit (1,2 m), ou sur le bord du toit pour éviter l'air chaud induit par le toit lui-même. Au contraire des systèmes de communications optiques dans l'espace lointain, les liaisons optiques atmosphériques fonctionnent horizontalement dans l'atmosphère près de la surface, ce qui les rend plus sensibles aux effets de scintillations.

L'atténuation due à la scintillation est exprimée par :

$$\alpha_{scin} = 2\sqrt{23.17\left(\frac{2\pi}{\lambda}10^9\right)^{7/6} Cn^2 l^2} \quad (5.15)$$

Où  $\lambda$  représente la longueur d'onde de l'émetteur en nm,  $l$  représente la longueur de la liaison en m et  $Cn^2$  représente le paramètre de structure de l'indice de réfraction en  $m^{-2/3}$ . L'atténuation causée par les scintillations en fonction du paramètre  $Cn^2$  est représentée sur la figure 5.03.



**Figure 5.03 :** Atténuation causée par scintillations pour  $l=1000m$  et  $\lambda = 850nm$

L'évaluation des pertes de puissance dues à la turbulence est un problème majeur dans le calcul de la disponibilité. En raison de l'absence de données réelles, l'estimation de l'effet de la scintillation

sur la disponibilité des liaisons FSO est très difficile. La Scintillation optique peut être réduite en augmentant la zone de collecte du récepteur, ce qui provoque l'intégration des différentes intensités incidentes sur la lentille. Ce phénomène est connu sous le nom de « Aperture Averaging » [62]. D'autre part, il est important de noter que les systèmes FSO conçus pour une haute disponibilité dans un lieu continental typique avec pluie et brouillard, ne peuvent pas être affectés par ce genre de turbulence [63].

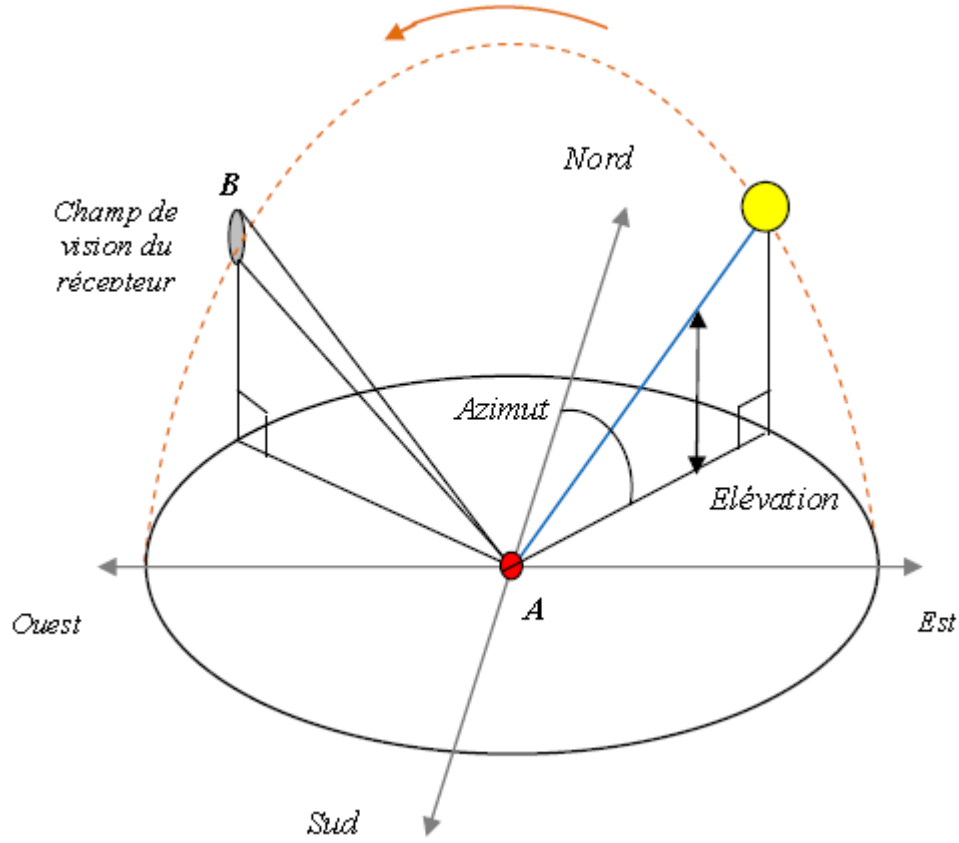
#### **5.3.4 Interférence solaire**

Pour un système FSO qui utilise un récepteur très sensible avec une lentille à grande ouverture, la lumière naturelle peut potentiellement interférer avec le signal utile reçu. Dans certaines circonstances, la lumière directe du soleil peut entraîner des pannes de la liaison pour des durées de plusieurs minutes quand le soleil est dans le champ de vision du récepteur (FOV ou Field of View). Dans le cas d'exposition directe de l'équipement aux rayons solaires, la réduction du champ de vision du récepteur et l'utilisation d'une bande étroite pour le filtrage de la lumière peuvent améliorer la performance du système [64]. La puissance du soleil peut potentiellement saturer la photodiode, interrompant complètement la communication (malgré l'utilisation de filtres optiques). Pour cette raison, une bonne compréhension de l'effet du rayonnement solaire est nécessaire pour la conception et l'évaluation des performances des liens FSO. Il est important de noter que l'ingérence de la lumière du soleil réfléchi par une surface de verre est également possible [65].

##### **5.3.4.1. Trajectoire du soleil**

La figure 5.04 représente schématiquement les aspects géométriques tels que les angles d'élévation ( $El$ ) et d'azimut ( $Az$ ) de la course du soleil dans le ciel relativement à une liaison optique atmosphérique (le point A étant le récepteur et le point B l'émetteur). Le récepteur est défini par sa position géographique (latitude, longitude), son azimut (de B vers A), son élévation et son ouverture en azimut ( $\Delta Az$ ) et en élévation ( $\Delta El$ ).

Les différents paramètres du soleil (élévation, azimut) sont déduits chaque jour de l'année, chaque heure, chaque minute et chaque seconde à partir de sa déclinaison et de son ascension droite.



**Figure 5.04 :** Représentation schématique de la course du soleil vis-à-vis d'une liaison FSO

#### 5.3.4.2. Énergie solaire au niveau du récepteur

Afin de calculer l'énergie solaire au niveau du récepteur, nous avons besoin dans un premier temps de la puissance rayonnée par le soleil. Cette puissance est donnée en  $\text{W/m}^2$ , elle est définie par la relation suivante [66] :

$$P_{\text{rayonnée}} = 1200 * \cos\left(\frac{\pi}{2} - El\right) \quad (5.16)$$

Où  $El$  désigne l'élévation du soleil, exprimée en radian. Ainsi, la puissance détectée par le récepteur est donnée par la relation suivante :

$$P_{\text{détectée}} = P_{\text{spectrale}} * P_{\text{rayonnée}} * S_{\text{capture}} * \frac{l_{\text{bande}}}{100} \quad (5.17)$$

Où :  $P_{\text{spectrale}}$  est la puissance spectrale du soleil,

$S_{capture}$  est la surface de capture du récepteur,

$l_{bande}$  est la largeur de bande du récepteur

La densité du flux solaire en fonction de la longueur d'onde (nm) est donnée par la relation suivante :

$$F_{solaire} = (c_5 10^{-13} \lambda^5) - (c_4 10^{-9} \lambda^4) + (c_3 10^{-6} \lambda^3) - (c_2 10^{-3} \lambda^2) + (c_1 \lambda) - (c_0 10^{-2}) \quad (5.18)$$

$$\text{Avec } \begin{cases} c_0 = 5.70237282654237 \\ c_1 = 4.05479801934347 \\ c_2 = 9.066632383289905 \\ c_3 = 9.37072684333339 \\ c_4 = 4.649127391289745 \\ c_5 = 8.97162055148876 \end{cases}$$

La longueur d'onde  $\lambda$  est en nanomètre, et la fonction  $F_{solaire}$  est donnée en  $W / m^2 / nm$ .

#### 5.4 Installation des unités FSO derrière les fenêtres

Un des avantages des systèmes FSO est que l'émetteur et le récepteur peuvent être placés à l'intérieur du bâtiment derrière une fenêtre au lieu d'être placés sur le toit. Cette configuration réduit les coûts qui peuvent être augmentés en raison des frais d'installation et de câblage. L'angle du faisceau laser avec le plan de la fenêtre est critique, il devrait être aussi perpendiculairement que possible, mais légèrement incliné (5 degrés par exemple) afin d'éviter le retour du rayon vers son propre récepteur. L'atténuation à travers le verre dépend aussi du type de verre et de la longueur d'onde utilisée. Même si les fenêtres permettent le passage des signaux optiques, elles ajoutent une certaine quantité d'atténuation aux rayons, impliquant une atténuation qui varie entre 0,4 à plus de 15 dB [67]. Le taux de transmission d'un vitrage en fonction de l'angle d'incidence du rayon lumineux est donné sur la figure 5.6 [68]. On remarque que le taux de transmission est pratiquement constant jusqu'à des angles d'incidence compris entre 40 et 50°. Ce taux chute alors brutalement pour devenir nul pour un angle d'incidence  $i = 90^\circ$ .

La propagation de la lumière à travers une vitre provoque une atténuation par transmission, par absorption et par réflexion de la lumière. L'intensité de sortie ( $I_s$ ) d'un rayon incident ( $I_0$ ) sur une vitre d'épaisseur ( $e$ ) est donnée par la loi de Beer- Lambert:

$$\frac{I_s}{I_0} = (1 - \Gamma)^2 e^{-\Phi e} \quad (5.19)$$

Où  $\Phi$  est le coefficient d'absorption de la vitre et  $\Gamma$  est le coefficient de réflexion de la vitre [68].

$$\Gamma = \frac{1}{2} \left[ \frac{\tan^2(\theta_r - \theta)}{\tan^2(\theta_r + \theta)} + \frac{\sin^2(\theta_r - \theta)}{\sin^2(\theta_r + \theta)} \right] \quad (5.20)$$

Où :  $\theta$  et  $\theta_r$  sont respectivement l'angle d'incidence et l'angle de réfraction sur la vitre.

Pour un déploiement derrière les fenêtres à haute disponibilité, il est recommandé que les installateurs mesurent l'atténuation réelle de la fenêtre de sorte que les performances de la liaison peuvent être calculées avec précision. L'outil Terabeam (Terabeam Window Attenuation Meter ou WAM) [69] permet de mesurer l'atténuation des rayons laser à travers les fenêtres sans accéder aux deux côtés d'une fenêtre.

### 5.5 La disponibilité de la liaison FSO

La disponibilité et la fiabilité d'une liaison optique atmosphérique dépend beaucoup de l'équipement utilisé, mais également des paramètres climatiques et atmosphériques. Dans ce travail, le calcul de la disponibilité est basé sur l'analyse du bilan de puissance, sur la marge de puissance de la liaison et sur l'analyse des statistiques de l'atténuation atmosphérique. On peut classer les paramètres qui influencent la disponibilité et la performance d'une liaison FSO en deux différentes catégories: les paramètres internes et les paramètres externes (Tableau 5.03). Les paramètres internes sont liés à la conception d'un système FSO spécifiques et peuvent être influencés par le concepteur du système, par exemples: la puissance optique transmise, l'angle de divergence de l'émetteur et le diamètre de la lentille du récepteur. Les paramètres de l'environnement extérieur dépendent du climat dans lequel le système fonctionne.

<b>Emetteur</b>	<b>Canal atmosphérique</b>	<b>Récepteur</b>
La puissance optique	Atténuation atmosphérique	Le diamètre des lentilles
La bande passante	Les pertes de scintillations	Efficacité de la diode
La longueur d'onde	La distance	Bruit d'amplification
Les pertes optiques	Les pertes de pointage	Les pertes optiques
L'angle de divergence	Visibilité	Champ de vision

**Tableau 5.03 :** Les paramètres qui influencent la disponibilité et la performance d'une liaison

FSO

La disponibilité d'une liaison FSO est généralement citée en pourcentage. Par exemple, une disponibilité de 99,9%, soit une indisponibilité moyenne de 43 minutes par mois (Tableau 5.04). Pour une disponibilité de 9.999 % le lien devrait être indisponible quatre minutes seulement par mois. [70]. Pour assurer une fiabilité d'une liaison, nous devons laisser une marge brute plus grande que le niveau minimum de puissance nécessaire, afin qu'une plus grande marge soit disponible. Cependant, la provision d'une telle puissance empêche d'utiliser cette puissance pour augmenter la distance à laquelle on pourrait séparer l'émetteur et le récepteur. Cette simple logique montre un compromis entre la distance et la fiabilité. Pour les applications de télécommunications de classe opérateur, la disponibilité de la liaison est généralement de 99,999%. Tandis que, pour les applications LAN de classe entreprise une disponibilité de la liaison de plus de 99% est généralement suffisante [71].

Disponibilité	Temps de rupture par année	Temps de rupture par mois	Temps de rupture par semaine
99.9%	8.76 h	43.2 mn	10.1 mn
99.99%	52.6 mn	4.32 mn	1.01 mn
99.999%	5.26 mn	25.9 s	6.05 s
99.9999%	31.5 s	2.59 s	0.605 s

**Tableau 5.04 :** Les temps de rupture possible pour un certain pourcentage de disponibilité.

La disponibilité est calculée comme étant le rapport de l'intervalle du temps  $T_{up}$  durant lequel la liaison est correctement assurée par le système sur la période totale de la mesure  $T_{up} + T_{down}$  [72]:

$$Dispo = \frac{T_{up}}{T_{up} + T_{down}} * 100 \quad (5.21)$$

Elle est exprimée en %.

## 5.6 Simulation et applications

Dans cette simulation, on va évaluer la qualité de service d'une liaison optique atmosphérique en termes de probabilité de connexion et de temps de coupure en utilisant le logiciel « FSO Prediction » fourni par la société Orange. Pour cela, on a considéré cinq sites (Tour Orange Ankorondrano, Immeuble Fitaratra Ankorondrano, Tour Zital Ankorondrano, Rova Manjakamiadana et Carlton Anosy) tous situés à Antananarivo, la Capitale de Madagascar, dont chacun correspond au lieu d'emplacement ou d'installation des équipements FSO.

### 5.6.1 Présentation générale de l'outil FSO Prediction

La disponibilité et la fiabilité d'une liaison optique atmosphérique dépendent davantage du matériel utilisé mais aussi des paramètres climatiques et atmosphériques tels que la pluie, la neige ou le brouillard. La société Orange, filiale du Groupe France Télécom, a développé le logiciel « FSO Prediction » qui intègre, à travers les algorithmes qu'il implémente, les différents phénomènes physiques responsables de la rupture du lien FSO. Il prend en compte l'affaiblissement aérosolaire, l'affaiblissement par scintillation, l'affaiblissement dû à la lumière ambiante ou à la pluie ou au brouillard. Cet outil, composé d'une IHM (Interface Homme-Machine) et d'un cœur de calcul, permet d'évaluer la qualité de service d'une liaison optique atmosphérique en termes de probabilité de connexion et de temps de coupure. Cette partie décrit d'abord le fonctionnement général de cet outil de simulation.

#### 5.6.1.1. Les entrées / sorties

##### a. Principe : Gestion par fichiers

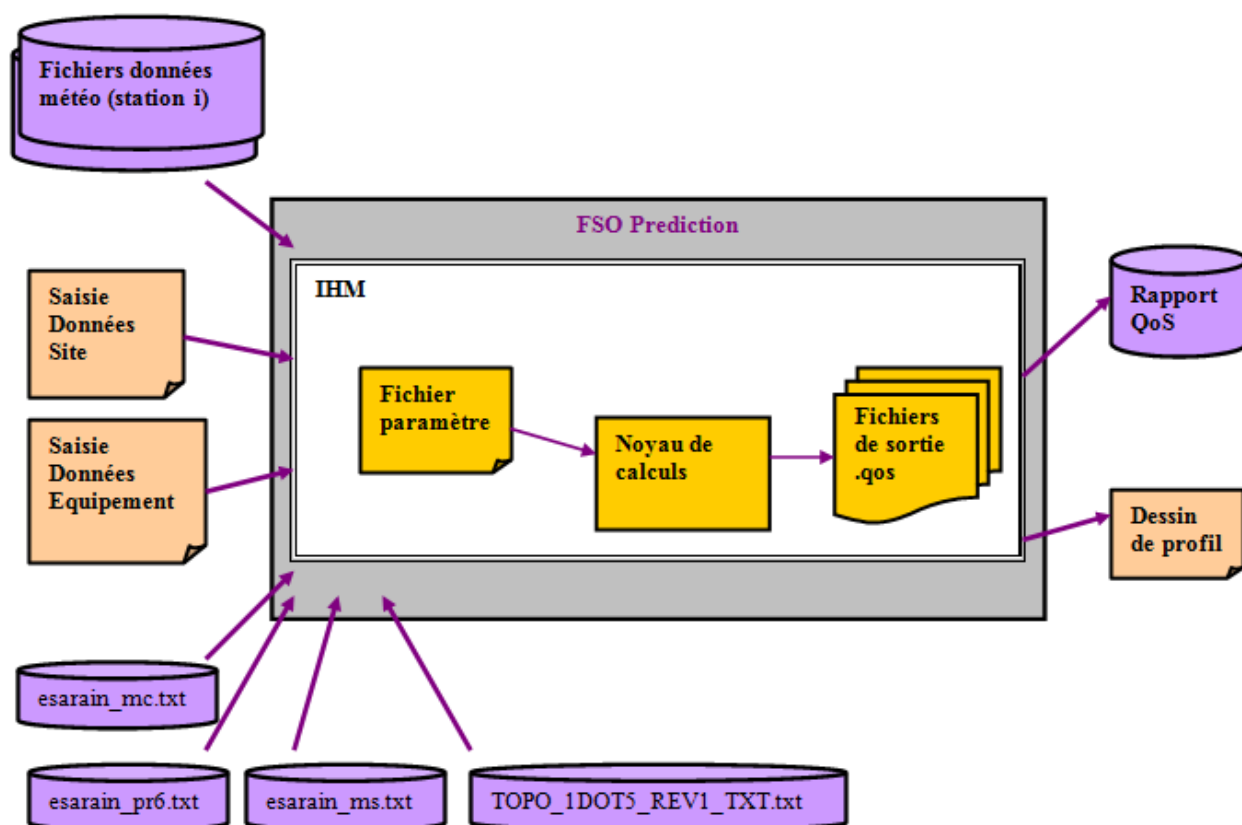


Figure 5.05 : Entrées / Sorties de FSO Prediction

La figure 5.05 ci-dessus représente les entrées/sorties du logiciel FSO Prediction.

Les données nécessaires aux calculs seront fournies à l'IHM sous forme de fichiers. Les fichiers nécessaires sont:

- Les fichiers de données météo filtrés (pour une station et la période considérée),
- Le fichier paramètre contenant les chemins des fichiers d'entrées/sorties ainsi que les données saisies par l'utilisateur au niveau de l'IHM.

*b. Fichiers données Météo : entrée FSO Prediction*

Ces fichiers spécifiques au logiciel FSO Prediction, livrés en fonction du pays d'étude, nous donnent des données météorologiques relevées par l'ensemble des stations météo du pays considéré pour toutes les heures de l'année.

Ces fichiers ont pour nom ID\_LATITUDE\_LONGITUDE, ce qui facilite leur traitement.

Chacun de ces fichiers peut contenir les champs suivants:

- STATION : champ comportant l'identité et le nom de la station,
- ANNEE : champ comportant l'année des mesures,
- DATES : suite d'entiers, exprimées au format année/mois/jour/heure/minute,
- V : réel, exprimé en mètre, donnant la distance de visibilité,
- TEMP : réel, exprimé en degré Celsius, donnant la température,
- PRESSIONS : réel, exprimé en mbar (hPa), donnant la valeur des pressions atmosphériques,
- VITESSE\_VENT: réel, exprimé m/s, donnant la vitesse du vent.

*c. Fichier paramètre .pqs (Entrée saisie)*

Ce fichier contient les données saisies par l'utilisateur à travers l'IHM ainsi que les chemins des fichiers d'entrée et de sortie. Il est à noter qu'un contrôle systématique sera associé aux données saisies par l'utilisateur. Les données saisies peuvent se subdiviser en deux catégories :

- Les données sites,
- Les données équipements.

*d. Description des données site*

Ce format respecte le formalisme utilisé par de nombreux outils d'ingénierie radio.

- NOMSITES : tableau de chaînes de caractères décrivant les noms des sites,

- LATITUDES : tableau de réels, au format dms, décrivant les latitudes des sites,
- LONGITUDES : tableau de réels, au format dms, décrivant les longitudes des sites,
- ALTITUDES : tableau de réels, exprimés en mètre, décrivant les altitudes des sites,
- HAUTEURS : tableau de réels, exprimés en mètre, décrivant les hauteurs par rapport au sol des sites,
- ORIENTATIONS : tableau de réels, exprimés en degré, décrivant les orientations des sites par rapport au Nord géographique,
- HUMIDITE : réel, exprimé en %, décrivant le taux d'humidité relative,
- ALBEDO: réel, exprimé en m, décrivant le taux d'absorption du sol,
- DISTANCE : réel, exprimé en m, décrivant la distance entre les deux sites,
- RUGOSITE : réel, exprimé en m, décrivant l'état de rugosité du sol,
- RAYONNSOLAIRE : réel, exprimé en  $Wm^{-2}$ , décrivant le rayonnement solaire,
- HAUTEURMOYLIEN : réel, exprimé en mètre, décrivant la hauteur moyenne des sites (valeur calculée),
- DISTANCELIEN : réel, exprimé en mètre, décrivant la distance en prenant en compte les hauteurs des deux sites (valeur calculée),
- ELEVATION : tableau de réel, exprimé en degré, donnant l'élévation des sites (valeurs calculées),
- AZIMUT: tableau de réel, exprimé en degré, donnant l'azimut des sites (valeurs déduites),
- ENVIRONNEMENT : trois valeurs possibles : Urbain ou Rural ou Maritime.

*e. Description des données équipements*

- LONGUEURDONDE : réel, exprimé en nm, donnant la longueur d'onde de la liaison,
- DEBIT : réel, exprimé en Mbps, exprimant le débit,
- PERTES : réel, exprimé en dB, donnant les pertes systèmes,
- NBTRANSMETTEURS : tableau de réel, sans unité, décrivant les nombres de transmetteurs des sites,
- DIAMETRES : tableau de réel, exprimé en m, décrivant les diamètres des récepteurs,
- DIVERGENCES : tableau de réel, exprimé en mrad, décrivant l'angle complet de l'émetteur,
- PUISSPARTRANSM : tableau de réel, exprimé en dBm, décrivant les puissances par transmetteurs des sites,

- PUISSANCESTOT : tableau de réel, exprimé en dBm, décrivant les puissances totales des sites en émission (Valeur calculée en émission et valeur saisie en réception),
- PERTESTOT : tableau de réel, exprimé en dB, décrivant les pertes totales,
- LONGDONDECENTRALE : tableau de réel, exprimé en nm, décrivant la longueur d'onde centrale de la diode de réception,
- LARGSPECT : tableau de réel, exprimé en nm, décrivant la largeur spectrale de la diode de réception.

*Remarque:* les puissances des transmetteurs sont identiques en émission et en réception.

#### *f. Fichiers d'entrées nécessaires au traitement de la pluie et du brouillard*

Les données nécessaires au calcul de l'atténuation due à la pluie ou au brouillard sont récupérées à partir des fichiers météo provenant de l'IUT (International Union of Telecommunication):

- esairain\_mc.txt
- esairain\_ms.txt
- esairain\_pr6.txt
- TOPO\_1DOT5\_REV1\_TXT.txt

Ces fichiers de données ont été établis d'après des données recueillies pendant 15 ans par le Centre européen des prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT).

On récupère, pour une latitude et longitude donnée, des valeurs de paramètres nécessaires au calcul des affaiblissements dus au brouillard et à la pluie.

Chaque fichier est constitué d'une matrice de données allant de +90 N à -90 S par pas de 1,5 degrés pour la latitude et de 0 ° à 360 ° par pas de 1,5 degrés pour la longitude.

On extrait les variables Pr6, Mc, Ms et Topo pour les quatre points les plus proches en latitude et en longitude des coordonnées géographiques de l'emplacement voulu.

D'après les valeurs des variables Pr6, Mc, Ms et Topo aux quatre points d'une maille, on calcule les valeurs des fonctions Pr6(Lat,Lon), Mc(Lat,Lon), Ms(Lat,Lon), Topo(Lat,Lon) à l'emplacement voulu, par interpolation bilinéaire.

Ces différentes variables nous permettent, pour une position géographique, de déterminer la quantité de pluie et de brouillard tombée pour un pourcentage d'année donné.

*g. Fichier résultat (sortie)*

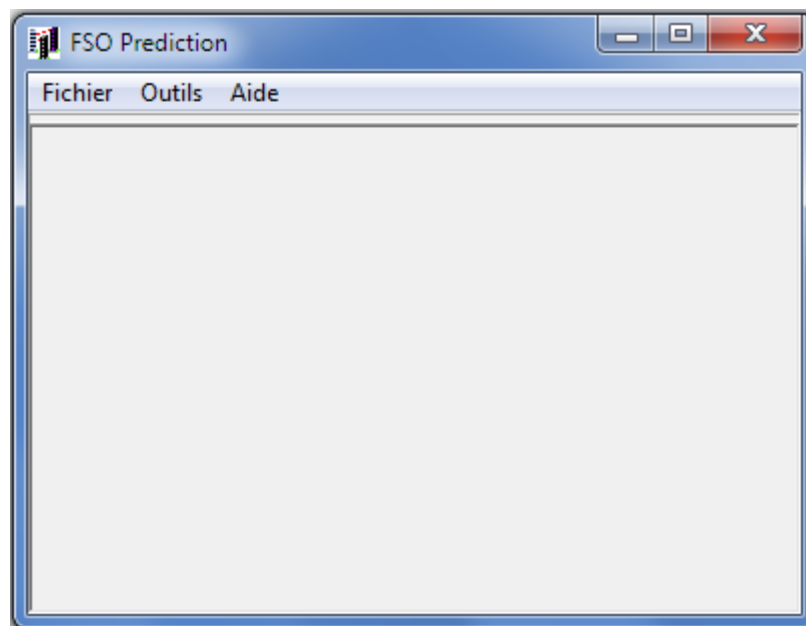
Ce fichier au format texte suffixé par qos ou txt sera produit par l'IHM. Ces données seront ensuite lues et affichées par l'IHM au niveau de la fenêtre Rapport FSO. Toutes les valeurs affichées au niveau de cette fenêtre seront non modifiables directement par l'utilisateur.

5.6.1.2. Présentation de l'IHM de FSO Prediction

L'application est construite sur la base une MDI (Multiple Display Interface). Elle se subdivise en cinq fenêtres, une fenêtre mère : la fenêtre principale "FSO Prediction" et quatre fenêtres filles : la fenêtre "Données Saisies", la fenêtre "Rapport FSO", la fenêtre "Profil" et enfin la fenêtre "Résultats graphiques".

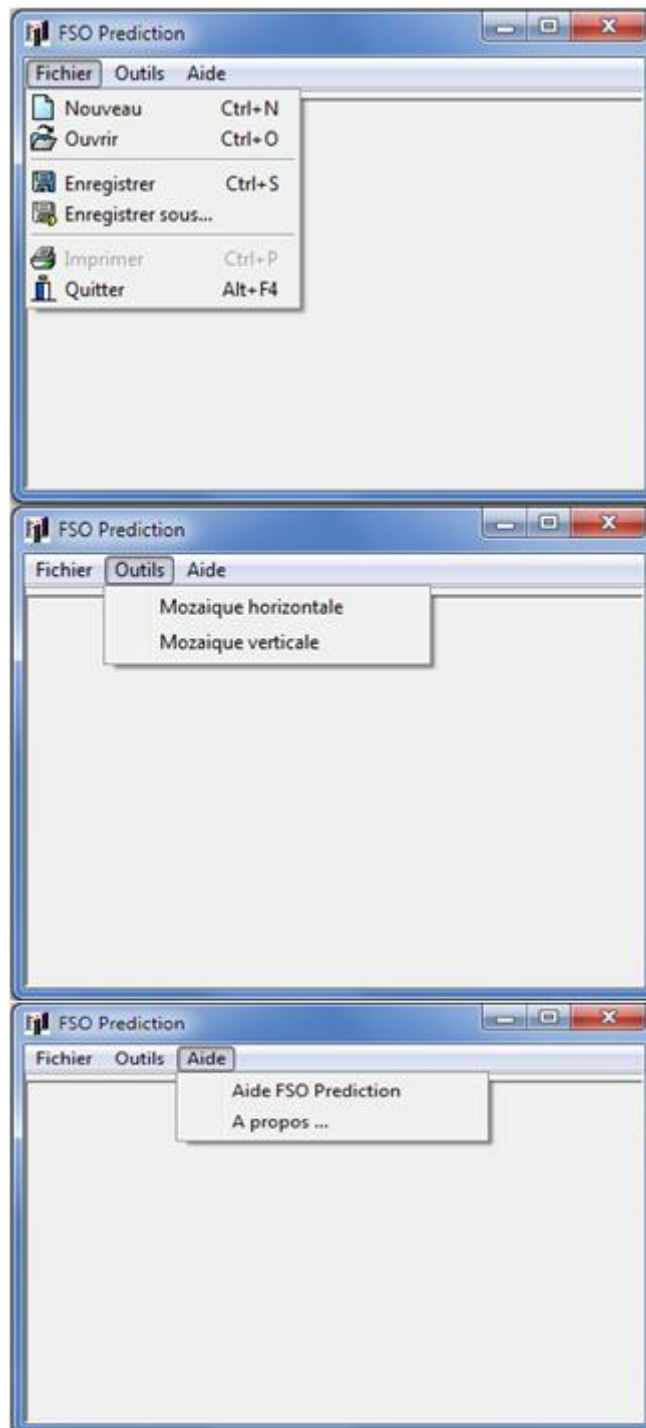
*a. Fenêtre principale*

La figure 5.06 suivante représente la fenêtre principale du logiciel FSO Prediction.



**Figure 5.06 : Fenêtre principale**

Dans cette fenêtre principale, nous avons les menus déroulants : Fichier, Outils et Aide représentés par la figure 5.07 ci-dessous.



**Figure 5.07 :** *Menus déroulants*

Description du champ "Fichier":

- Nouveau: permet de créer une nouvelle fenêtre de paramétrage "Données Saisies",
- Ouvrir: permet d'importer un ancien contexte d'étude,

- Enregistrer: permet d'enregistrer les données saisies dans un fichier .ctx,
- Enregistrer sous: permet d'enregistrer les données saisies dans un fichier .ctx en choisissant le chemin,
- Fermer: permet de fermer une fenêtre fille,
- Imprimer: permet d'imprimer les données du rapport,
- Quitter: permet de quitter et de fermer l'outil.

Description du champ "Outil":

- Mosaïque horizontale: permet d'afficher les différentes fenêtres sous forme de mosaïque horizontale,
- Mosaïque verticale: permet d'afficher les différentes fenêtres sous forme de mosaïque verticale.

Description du champ "Aide":

- A propos: à propos du logiciel FSO Prediction,
- Aide FSO Prediction: permet d'ouvrir le manuel utilisateur.

#### *b. Fenêtre "Données Saisies"*

Cette fenêtre se divise en six catégories de champs :

- L'encadré "Données de Sites"
- L'encadré "Données Equipements"
- L'encadré "Données Sites Communes"
- L'encadré "Données Equipements Communes"
- L'encadré "Environnement"
- L'encadré "Information"

Les différents champs de ces encadrés doivent être renseignés par l'utilisateur. Les données de l'encadré "Information" sont calculées par le logiciel. Après avoir complété ces différents champs illustrés dans la figure 5.08 ci-après, on peut lancer le calcul en cliquant sur le bouton "Lancer Calcul".

**FSO Prediction**

Fichier Outils Aide

**Données Saisies**

**Données de Sites**

**Site 1**

Nom Site

Latitude site (dms)

Longitude site (dms)

Altitude site (m)

Hauteur/sol site (m)

Orientation site (deg)

**Site 2**

**Données Sites Communes**

Humidité relative (%)

Albedo (0..1)

Distance (m)

Rugosité (m)

Rayonn. sol. (W/m2)

**Données Equipements**

**Emission Réception**

Nb transmetteur

Puissance/transm (dBm)

Diamètre (mm)

Divergence (mrad)

Puissance (dBm)

Perte (dB)

Long. onde centrale (nm)

Larg spectrale (nm)

**Données Equipements Communes**

Longueur d'onde (nm)

Débit (Mbps)

Pertes système (dB)

**Environnement**

☒ Urbain ☐ Rural ☐ Maritime

**Informations**

Distance Lien (m)

Hauteur moy du lien (m)

Elévation (deg)

Azimuth (deg)

**Site 1 Site 2**

**Figure 5.08 : Fenêtre Données Saisies**

### c. Fenêtre "Rapport FSO"

Cette fenêtre peut se subdiviser en quatre blocs :

- Valeurs affaiblissement,
- Disponibilité,
- Phénomènes climatiques,
- Données Sites.

Ces différents champs illustrés dans la figure 5.09 ci-dessous ne peuvent pas être modifiés directement par l'utilisateur.

*Remarque :* l'encadré "Disponibilité" concerne la visibilité uniquement.

A ce niveau nous pouvons :

- Imprimer les résultats de calcul en cliquant sur le menu "Fichier|Imprimer",
- Lancer le calcul de profil en cliquant sur "Voir profil".

**Rapport FSO**

**Valeurs affaiblissement**

Longueur d'onde (nm) : 1550

Largeur front d'onde réception (mm) : 3550

Puissance d'émission (dBm) : 10.000

Sensibilité (dBm) : -30

Aff. Géométrique (dB) : 32.94

Aff. Moléculaire (dB) : 0.01775

Marge brute liaison (dB) : 3.039

Marge brute linéique (dB/Km) : 1.712

**Disponibilité**  
Aérosols + Max (Pluie, Brouillard)

	Disponibilité (%)	Indisponibilité (Nb heures/an)
Année	97.5085	218h16m
Mois le + défavorable	97.2603	20h0m
Période 8 à 20 heures	97.485616	110h8m
Période 20 à 8 heures	97.531279	108h8m

**Phénomènes climatiques**

Probabilité d'interruption par...	Valeurs annuelles(%)	Valeurs max (dB)
Aff. aérosolaire	0.0228311	83.02
Aff. par scintillation	0.6177	0.000128
Aff. lumière ambiante	0.000000	20.659441
Aff. pluie	2.468716	41.785591
Aff. brouillard	0.445464	91.300156
Aff. aérosolaire et pluie	2.491547	124.810474
Aff. aérosolaire et brouillard	0.468295	174.325039

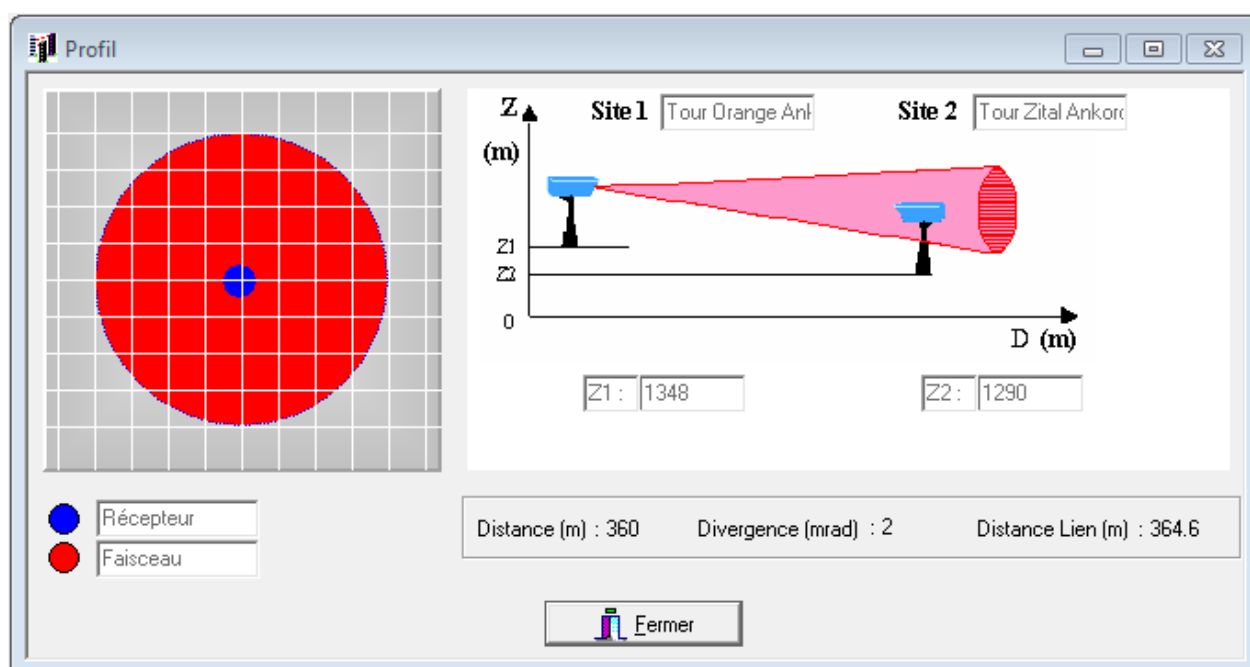
Voir Graph    Voir Profil    Fermer    Détails du site >>

**Figure 5.09 : Fenêtre Rapport FSO**

#### d. Fenêtre "Profil"

Les informations suivantes sont représentées dans cette fenêtre par la figure 5.10 ci-après :

- Noms des sites,
- Hauteurs des sites (altitude+hauteur/sol),
- Positionnement des sites, l'un par rapport à l'autre,
- Représentation du diamètre du front d'onde à la réception par rapport à la surface du récepteur,
- Distance entre les deux sites,
- Divergence du faisceau lumineux,
- Distance du lien.



**Figure 5.10 :** *Fenêtre Profil*

### e. Fenêtre "Résultats graphiques"

Cette fenêtre, illustrée par la figure 5.11 suivante, donne une représentation graphique des résultats trouvés dans la fenêtre "Rapport FSO".

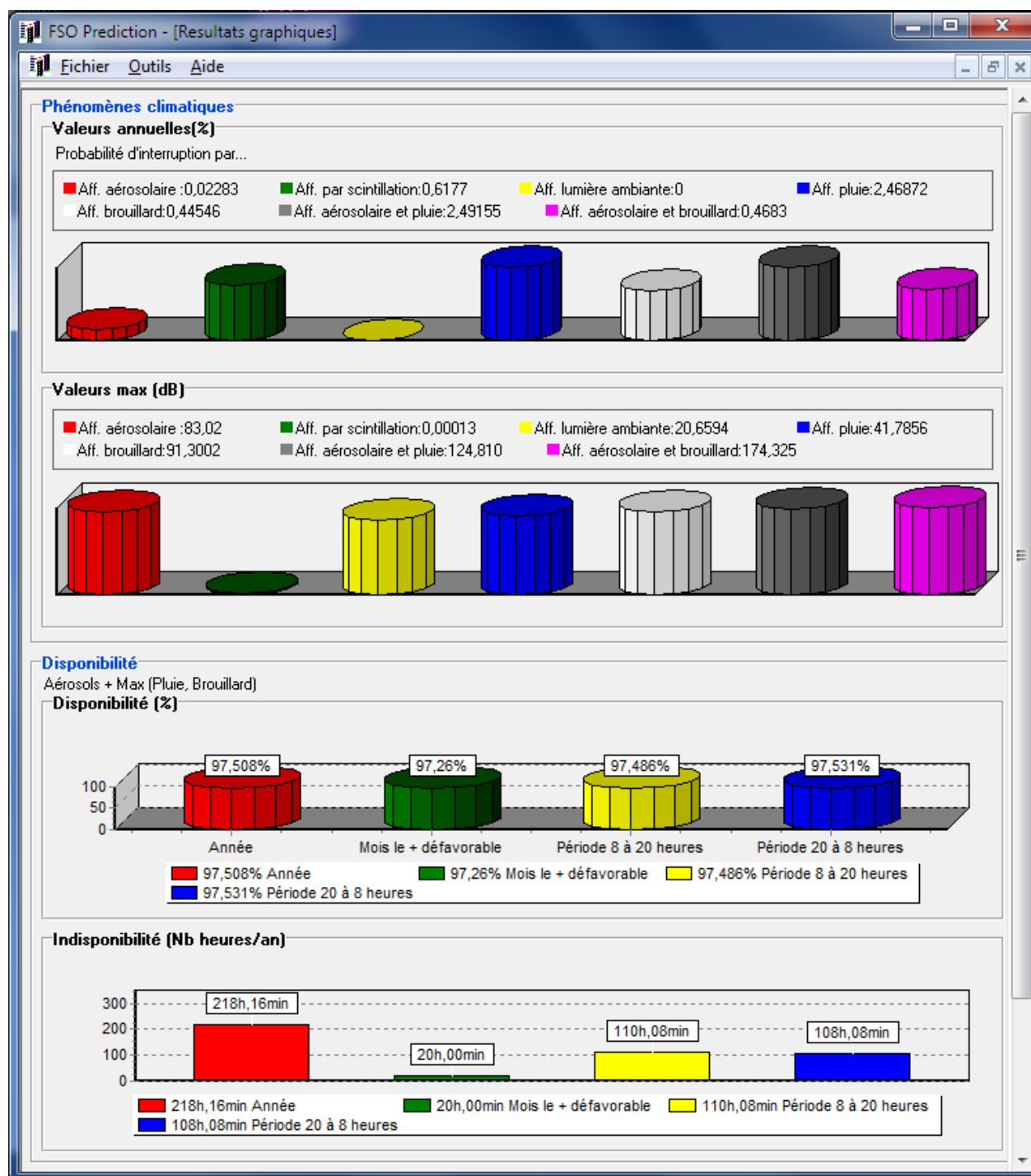


Figure 5.11 : Fenêtre Résultats graphiques

### 5.6.1.3. Applications

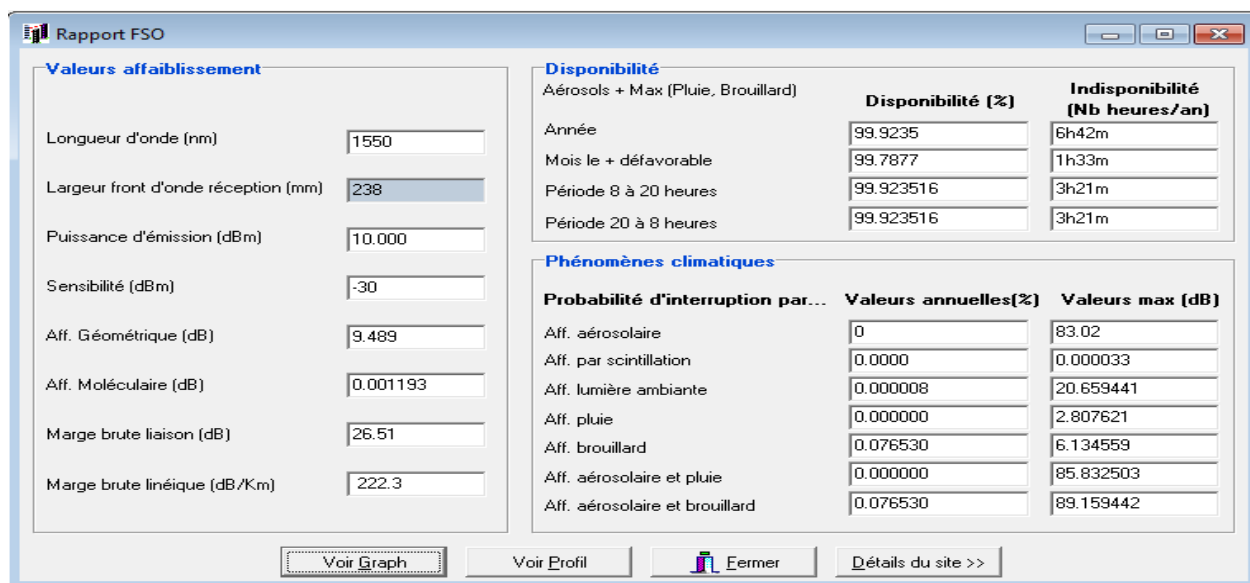
a. *Evaluation de la liaison entre la Tour Orange Ankorondrano et l'Immeuble Fitaratra Ankorondrano*

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

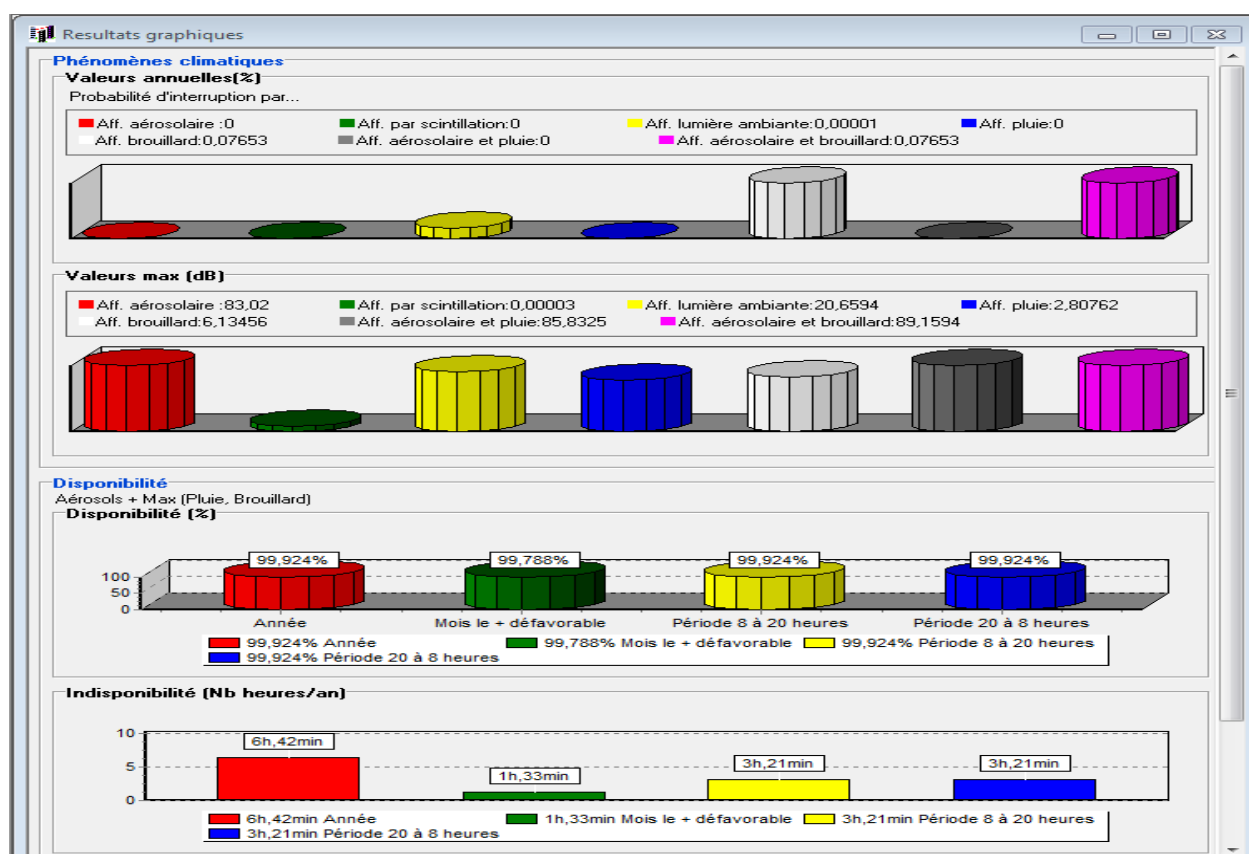
- Données de Sites:**
  - Site 1:** Nom Site (Tour Orange Ankorondrano), Latitude site (dms) (-185302), Longitude site (dms) (+0473123), Altitude site (m) (1252), Hauteur/sol site (m) (96), Orientation site (deg) (230).
  - Site 2:** Immeuble Fitaratra Ant, Latitude site (dms) (-185304), Longitude site (dms) (+0473120), Altitude site (m) (1250), Hauteur/sol site (m) (33), Orientation site (deg) (50).
- Données Equipements:**
  - Site 1:** Nb transmetteur (1), Puissance/transm (dBm) (10), Diamètre (mm) (50), Divergence (mrad) (2), Puissance (dBm) (10.000), Perte (dB) (1), Long. onde centrale (nm) (1550), Larg spectrale (nm) (100).
  - Site 2:** Nb transmetteur (1), Puissance/transm (dBm) (10), Diamètre (mm) (50), Divergence (mrad) (2), Puissance (dBm) (10.000), Perte (dB) (1), Long. onde centrale (nm) (1550), Larg spectrale (nm) (100).
- Données Sites Communes:** Humidité relative (%) (50), Albedo (0..1) (0.9 Bitume), Distance (m) (100), Rugosité (m) (1 Villes), Rayonn. sol. (w/m2) (1000).
- Données Equipements Communes:** Longueur d'onde (nm) (1550), Débit (Mbps) (10000), Pertes système (dB) (2).
- Environnement:** Radio buttons for Urbain (selected), Rural, and Maritime.
- Informations:** Distance Lien (m) (119.3), Hauteur moy du lien (m) (64.5), Elévation (deg) (Site 1: -33.02, Site 2: 33.02), Azimuth (deg) (Site 1: 230, Site 2: 50).

At the bottom, there are buttons for "Lancer Calcul" (with a green checkmark icon) and "Fermer" (with a red X icon).

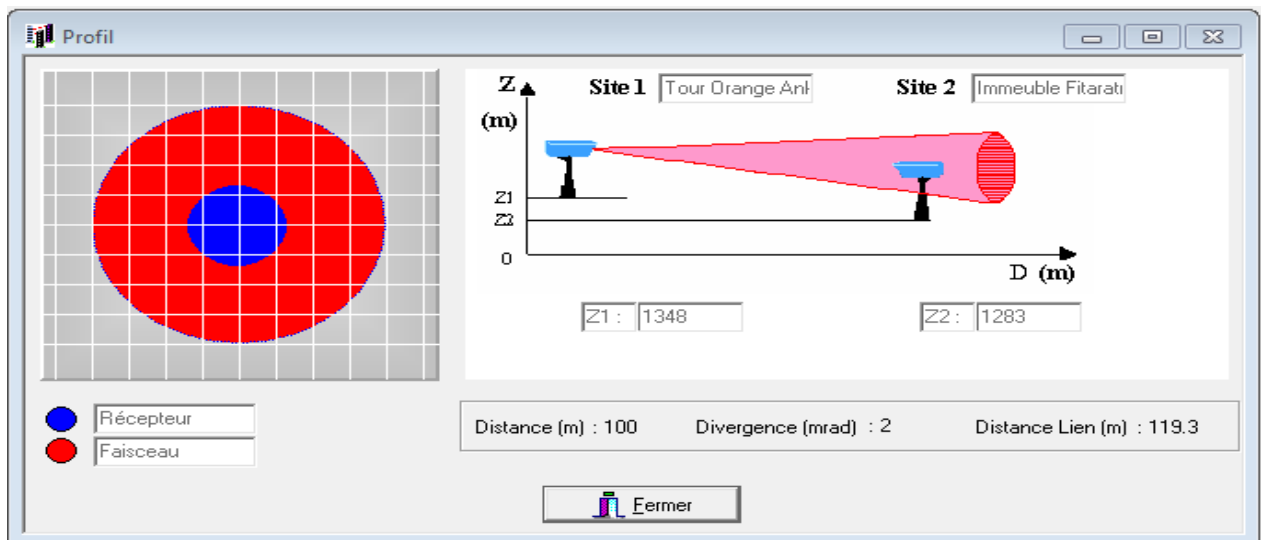
**Figure 5.12 :** *Fenêtre Données Saisies pour la Tour Orange Ankorondrano et l'Immeuble Fitaratra Ankorondrano*



**Figure 5.13 :** Fenêtre Rapport FSO pour la Tour Orange Ankorondrano et l'Immeuble Fitaratra Ankorondrano



**Figure 5.14 :** Fenêtre Résultats graphiques pour la Tour Orange Ankorondrano et l'Immeuble Fitaratra Ankorondrano



**Figure 5.15 :** Fenêtre Profil pour la Tour Orange Ankorondrano et l'Immeuble Fitaratra Ankorondrano

b. Evaluation de la liaison entre la Tour Orange Ankorondrano et la Tour Zital Ankorondrano

**Données Saisies**

**Données de Sites**

	Site 1	Site 2
Nom Site	Tour Orange Ankorondrano	Tour Zital Ankorondrano
Latitude site (dms)	-185302	-185307
Longitude site (dms)	+0473123	+0473134
Altitude site (m)	1252	1251
Hauteur/sol site (m)	96	39
Orientation site (deg)	115	295

**Données Equipements**

	Site 1		Site 2	
	Emission	Réception	Emission	Réception
Nb transmetteur	1	1	1	1
Puissance/transm (dBm)	10	-30	10	-30
Diamètre (mm)	50	80	50	80
Divergence (mrad)	2	3	2	3
Puissance (dBm)	10.000	-30	10.000	-30
Perte (dB)	1	1	1	1
Long. onde centrale (nm)		1550		1550
Larg spectrale (nm)		100		100

**Données Sites Communes**

Humidité relative (%) : 50  
 Albedo (0..1) : 0.9 Bitume  
 Distance (m) : 360  
 Rugosité (m) : 1 Villes  
 Rayonn. sol. (W/m2) : 1000

**Données Equipements Communes**

Longueur d'onde (nm) : 1550  
 Débit (Mbps) : 10000  
 Pertes système (dB) : 2

**Environnement**

☒ Urbain ☐ Rural ☐ Maritime

**Informations**

	Site 1	Site 2
Distance Lien (m)	364.6	
Hauteur moy du lien (m)	67.5	
Elévation (deg)	-9.152	9.152
Azimuth (deg)	115	295

Lancer Calcul | Fermer

**Figure 5.16 :** Fenêtre Données Saisies pour la Tour Orange Ankorondrano et la Tour Zital Ankorondrano

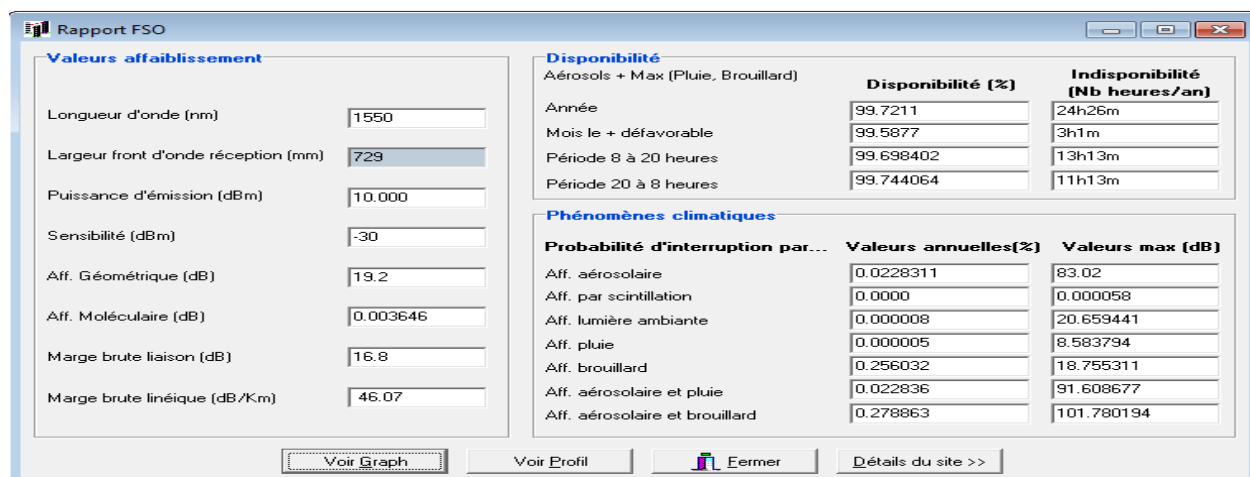


Figure 5.17 : Fenêtre Rapport FSO pour la Tour Orange Ankorondrano et la Tour Zital Ankorondrano

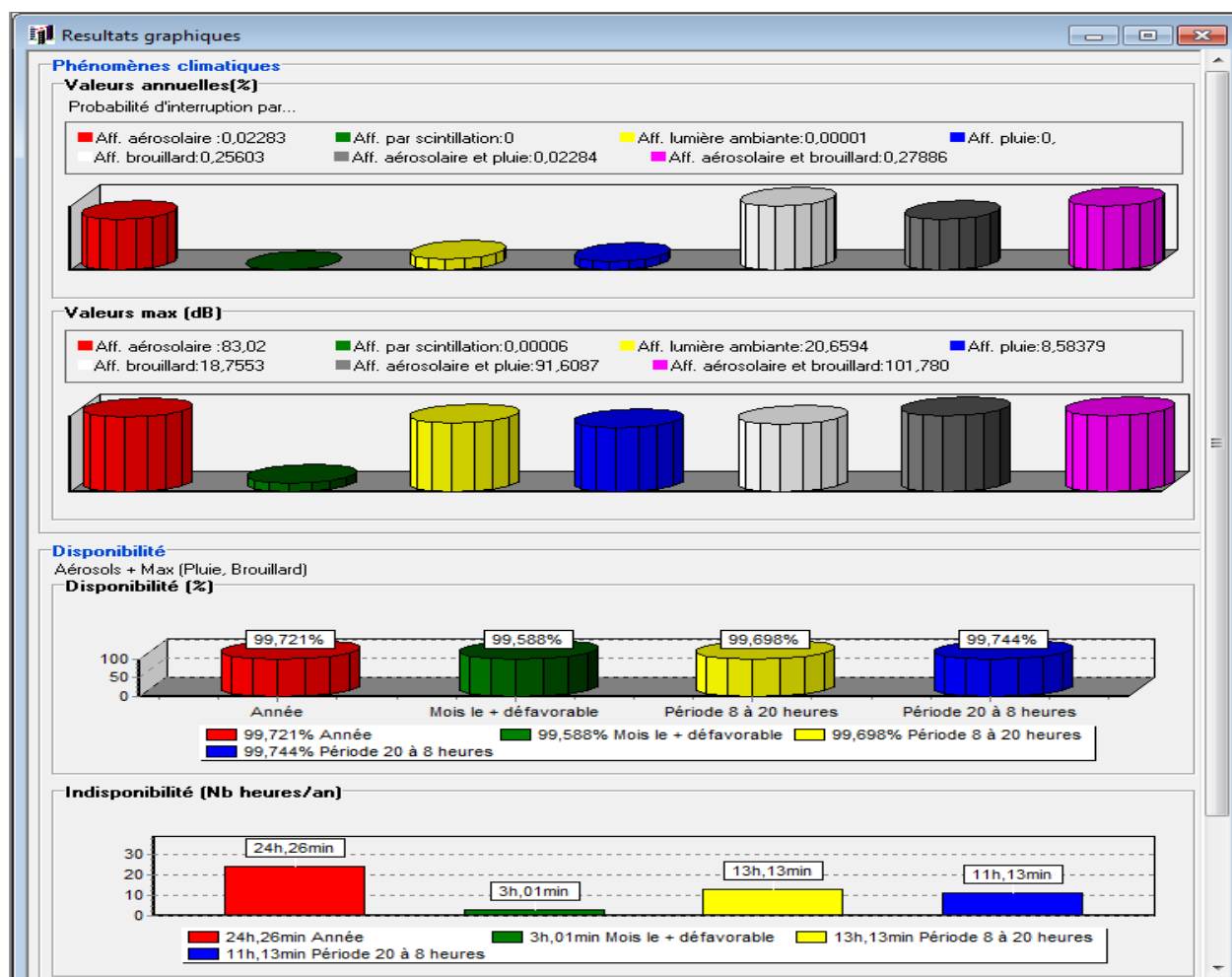
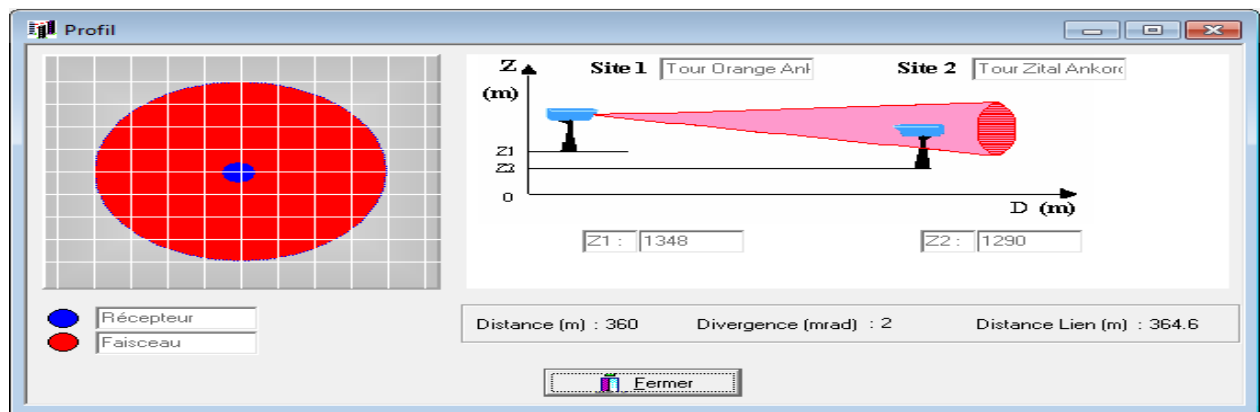


Figure 5.18 : Fenêtre Résultats graphiques pour la Tour Orange Ankorondrano et la Tour Zital Ankorondrano



**Figure 5.19 :** Fenêtre Profil pour la Tour Orange Ankorondrano et la Tour Zital Ankorondrano

c. Evaluation de la liaison entre la Tour Zital Ankorondrano et l'Immeuble Fitaratra Ankorondrano

Données de Sites		Site 1		Site 2		Données Sites Communes	
Nom Site		Tour Zital Ankorondrano		Immeuble Fitaratra Ankorondrano			
Latitude site (dms)		-185307		-185304			
Longitude site (dms)		+0473134		+0473120			
Altitude site (m)		1251		1250			
Hauteur/sol site (m)		39		33			
Orientation site (deg)		275		95			

Données Equipements	Site 1		Site 2		Données Equipements Communes
	Emission	Réception	Emission	Réception	
Nb transmetteur	1	1	1	1	Longueur d'onde (nm)
Puissance/transm (dBm)	10	-30	10	-30	Débit (Mbps)
Diamètre (mm)	50	80	50	80	Pertes système (dB)
Divergence (mrad)	2	3	2	3	
Puissance (dBm)	10.000	-30	10.000	-30	
Perte (dB)	1		1		
Long. onde centrale (nm)		1550		1550	
Larg spectrale (nm)		100		100	

Environnement		Informations	
<input checked="" type="radio"/> Urbain	<input type="radio"/> Rural	<input type="radio"/> Maritime	
Distance Lien (m)		410.1	
Hauteur moy du lien (m)		36	
Elévation (deg)	Site 1	Site 2	
	-0.9781	0.9781	
Azimuth (deg)	275	95	

**Figure 5.20 :** Fenêtre Données Saisies pour la Tour Zital Ankorondrano et l'Immeuble Fitaratra Ankorondrano

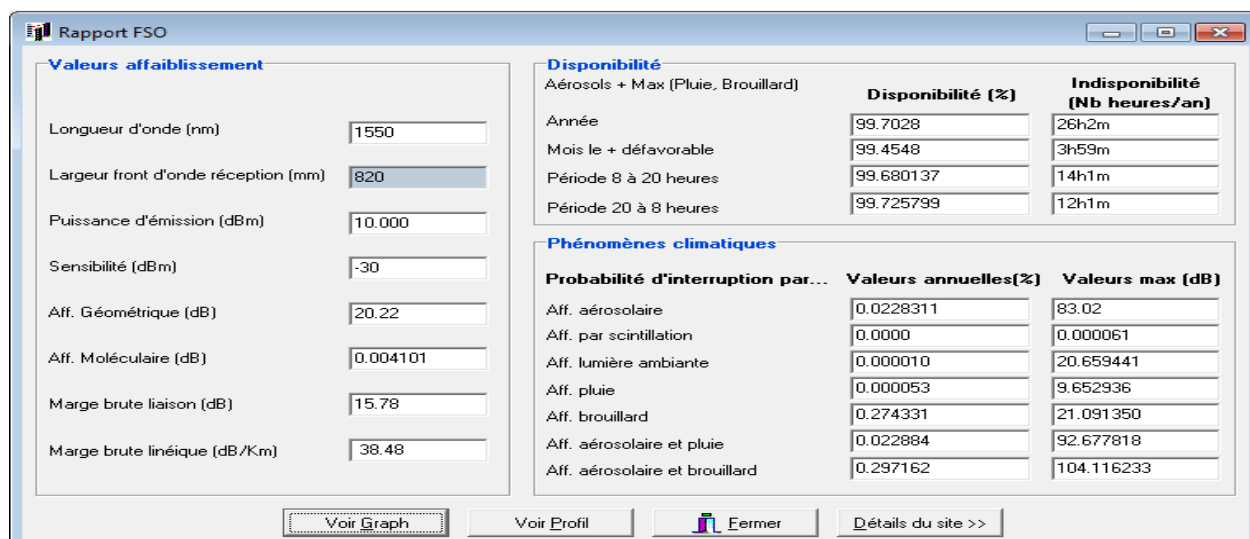


Figure 5.21 : Fenêtre Rapport FSO pour la Tour Zital Ankorondrano et l'Immeuble Fitaratra Ankorondrano

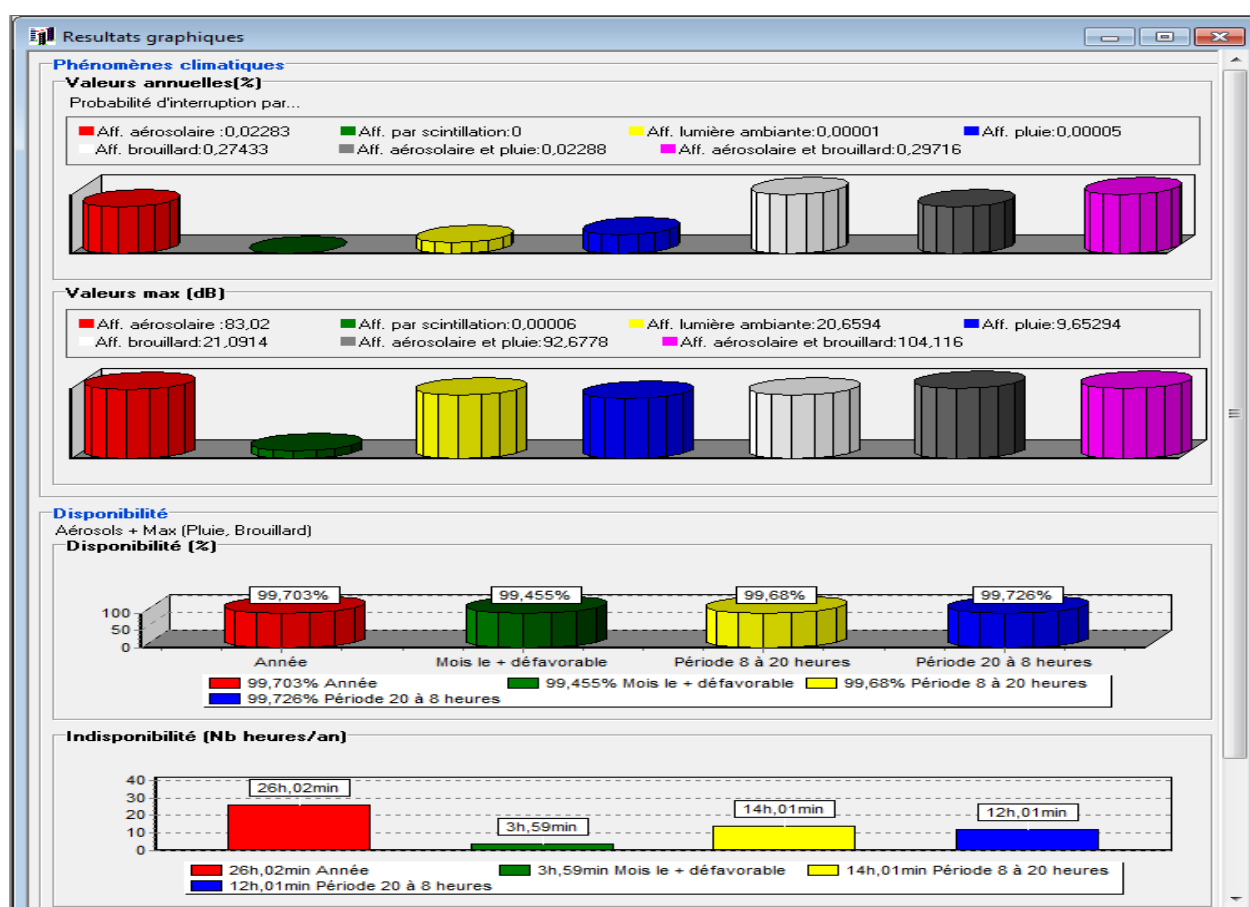
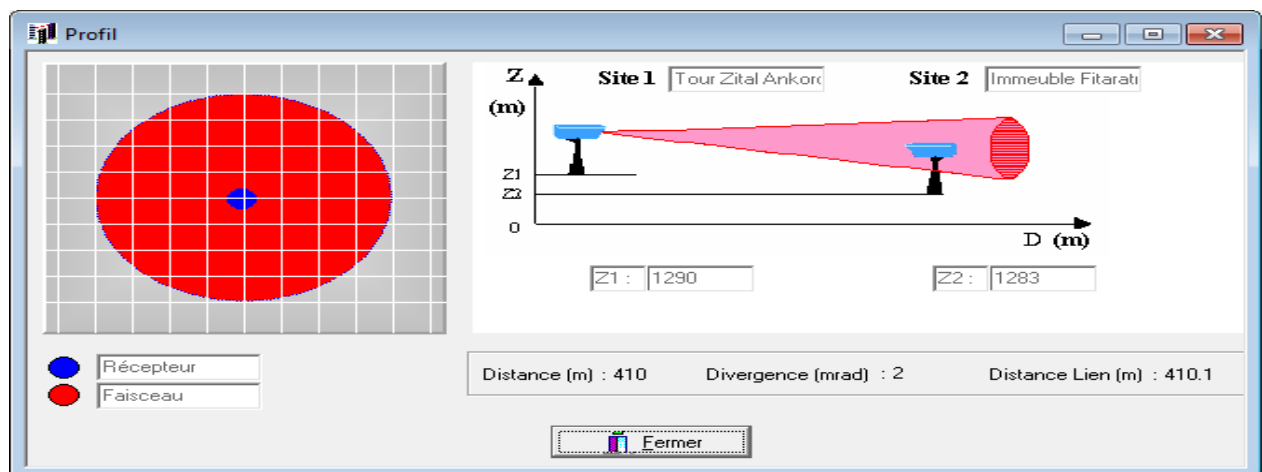


Figure 5.22 : Fenêtre Résultats graphiques pour la Tour Zital Ankorondrano et l'Immeuble Fitaratra Ankorondrano



**Figure 5.23 :** Fenêtre Profil pour la Tour Zital Ankondrano et l'Immeuble Fitaratra Ankondrano

d. Evaluation de la liaison entre le Rova Manjakamiadana et la Tour Orange Ankondrano

Données de Sites		Site 1		Site 2		Données Sites Communes	
Nom Site		Rova Manjakamiadana		Tour Orange Ankondrano		Humidité relative (%)	50
Latitude site (dms)		-185525		-185302		Albedo (0..1)	0.9 Bitume
Longitude site (dms)		+0473156		+0473123		Distance (m)	4500
Altitude site (m)		1422		1252		Rugosité (m)	1 Villes
Hauteur/sol site (m)		24		96		Rayonn. sol. (W/m2)	1000
Orientation site (deg)		348		168			

Données Equipements	Site 1		Site 2	
	Emission	Réception	Emission	Réception
Nb transmetteur	1	1	1	1
Puissance/transm (dBm)	10	-30	10	-30
Diamètre (mm)	50	80	50	80
Divergence (mrad)	2	3	2	3
Puissance (dBm)	10.000	-30	10.000	-30
Perte (dB)	1	1	1	1
Long. onde centrale (nm)		1550		1550
Larg spectrale (nm)		100		100

Données Equipements Communes	
Longueur d'onde (nm)	1550
Débit (Mbps)	10000
Pertes système (dB)	2

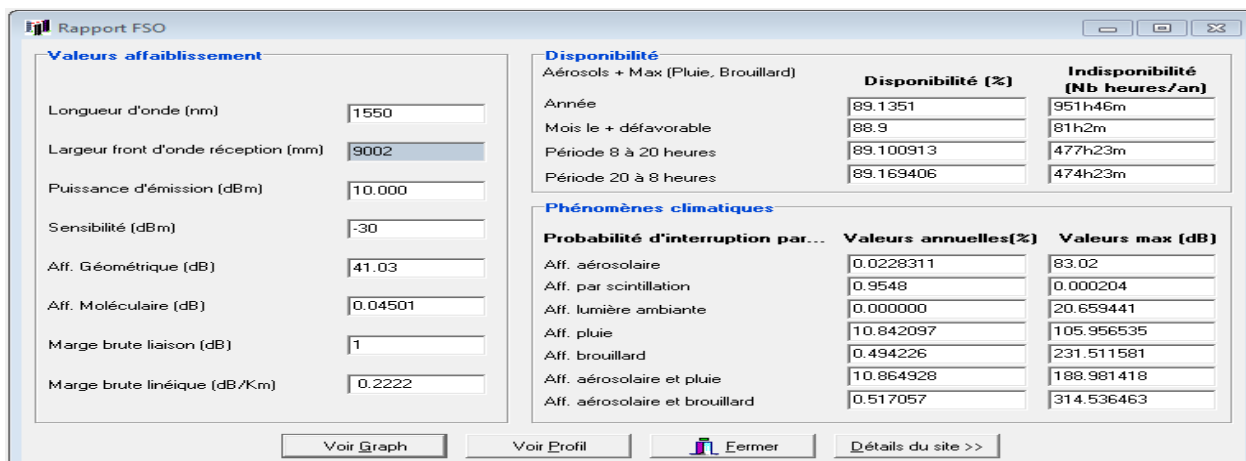
  

Environnement	
<input checked="" type="radio"/> Urbain	<input type="radio"/> Rural <input type="radio"/> Maritime

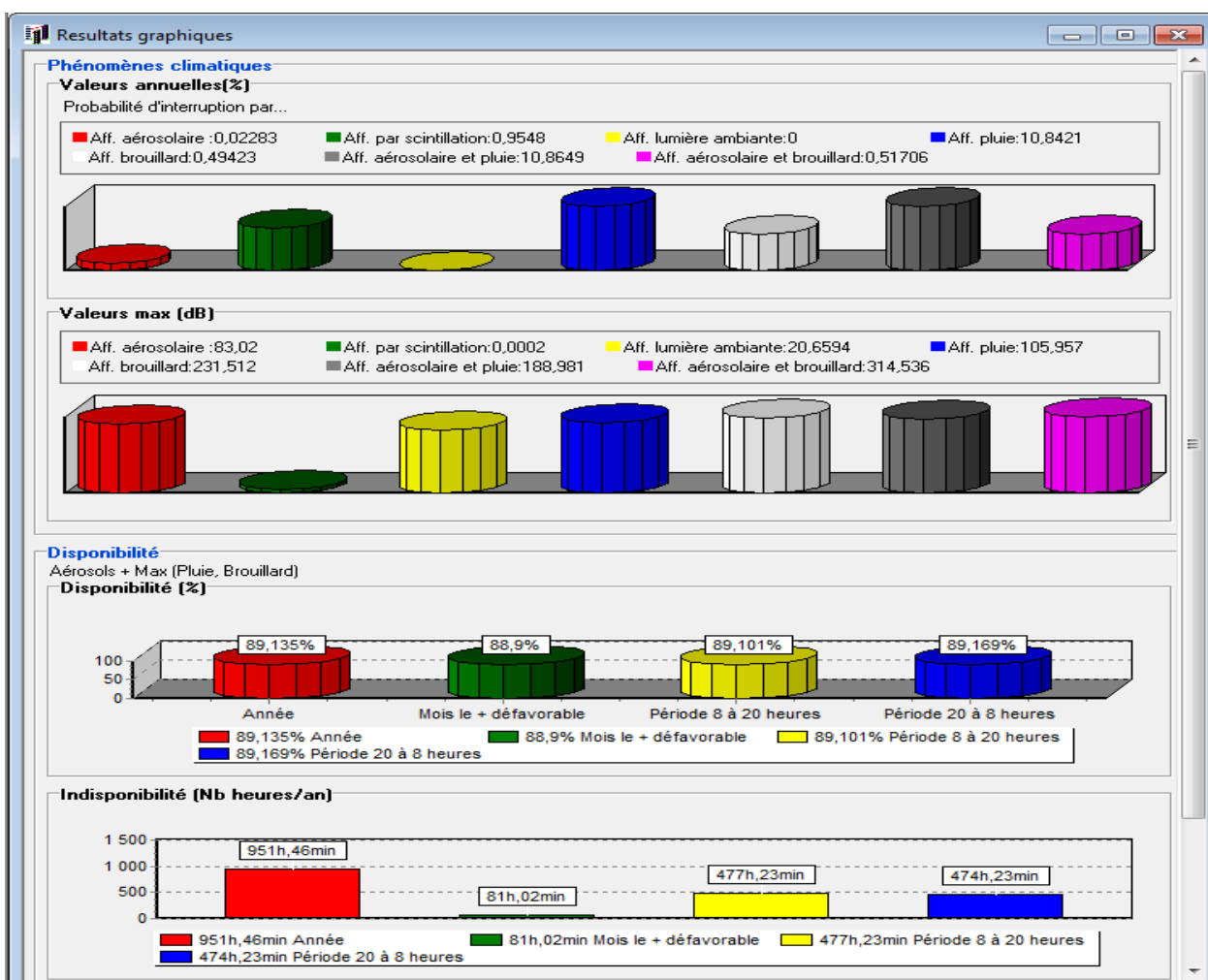
  

Informations		
Distance Lien (m)	4501	
Hauteur moy du lien (m)	60	
Elévation (deg)	Site 1	Site 2
	-1.248	1.248
Azimuth (deg)	348	168

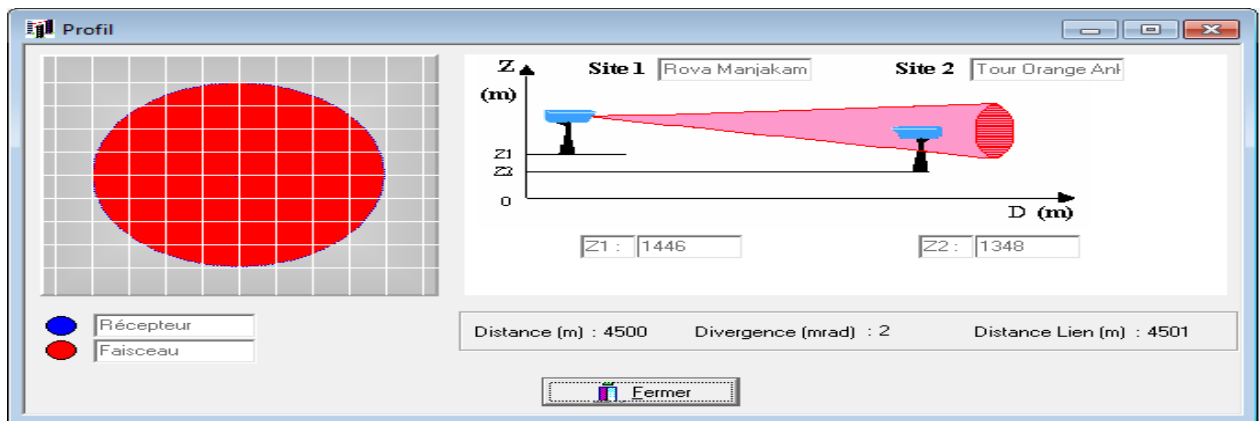
**Figure 5.24 :** Fenêtre Données saisies pour le Rova Manjakamiadana et la Tour Orange Ankondrano



**Figure 5.25 :** Fenêtre Rapport FSO pour le Rova Manjakamiadana et la Tour Orange Ankorondrano



**Figure 5.26 :** Fenêtre Résultats graphiques pour le Rova Manjakamiadana et la Tour Orange Ankorondrano



**Figure 5.27 :** Fenêtre Profil pour le Rova Manjakamiadana et la Tour Orange Ankorondrano

e. Evaluation de la liaison entre le Rova Manjakamiadana et l'Hotel Carlton Anosy

Figure 5.28 displays the 'Données Saisies' window of a software application. It contains input fields for site data, equipment data, and common data for Site 1 (Rova Manjakamiadana) and Site 2 (Carlton Anosy).

Données de Sites		Site 1		Site 2		Données Sites Communes	
Nom Site		Rova Manjakamiadana		Carlton Anosy		Humidité relative (%)	50
Latitude site (dms)		-185525		-185455		Albedo (0..1)	0.9 Bitume
Longitude site (dms)		+0473156		+0473105		Distance (m)	1770
Altitude site (m)		1422		1258		Rugosité (m)	1 Villes
Hauteur/sol site (m)		24		54		Rayonn. sol. (W/m2)	1000
Orientation site (deg)		305		125			

Données Equipements	Site 1		Site 2		Données Equipements Communes	
	Emission	Réception	Emission	Réception		
Nb transmetteur	1	1	1	1	Longueur d'onde (nm)	1550
Puissance/transm (dBm)	10	-30	10	-30	Débit (Mbps)	10000
Diamètre (mm)	50	80	50	80	Pertes système (dB)	2
Divergence (mrad)	2	3	2	3		
Puissance (dBm)	10.000	-30	10.000	-30		
Perte (dB)	1	1	1	1		
Long. onde centrale (nm)		1550		1550		
Larg spectrale (nm)		100		100		

Environnement		Informations	
<input checked="" type="radio"/> Urbain	<input type="radio"/> Rural	<input type="radio"/> Maritime	
Distance Lien (m)		1775	
Hauteur moy du lien (m)		39	
Elévation (deg)		Site 1	Site 2
		-4.329	4.329
Azimuth (deg)		305	125

Buttons: Lancer Calcul, Fermer

**Figure 5.28 :** Fenêtre Données saisies pour le Rova Manjakamiadana et l'Hotel Carlton Anosy

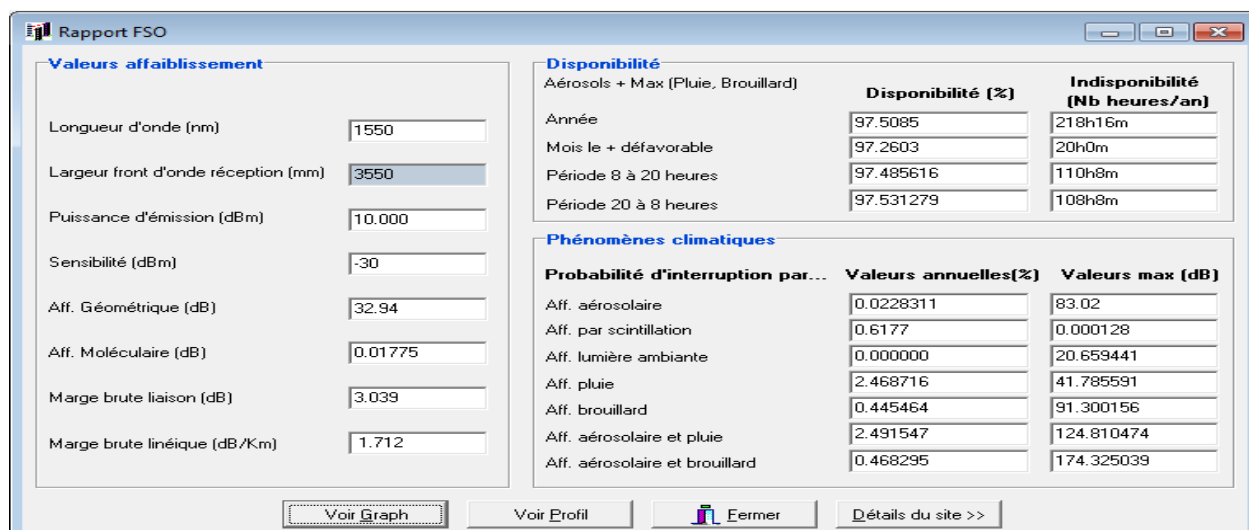


Figure 5.29 : Fenêtre Rapport FSO pour le Rova Manjakamiadana et l'Hotel Carlton Anosy

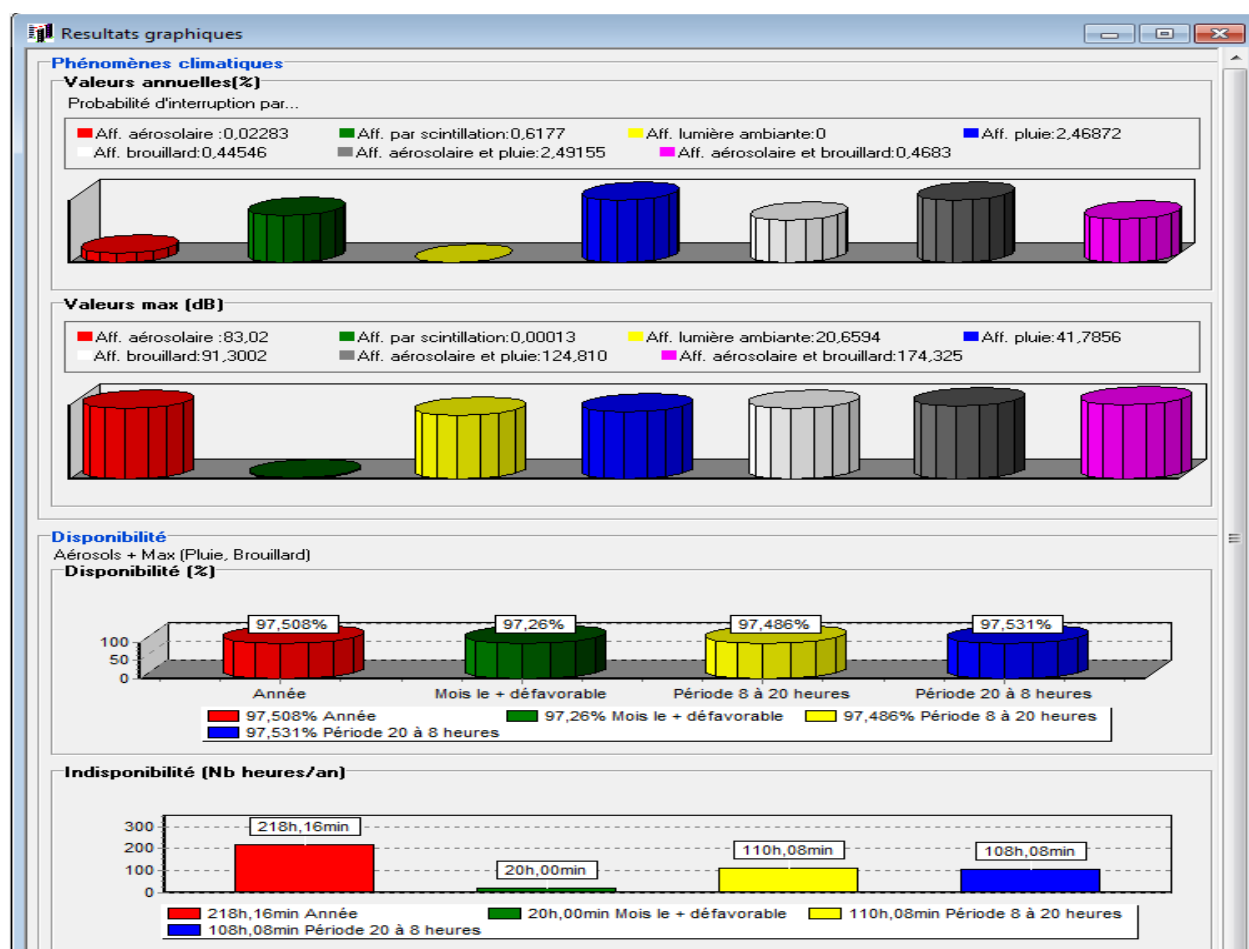
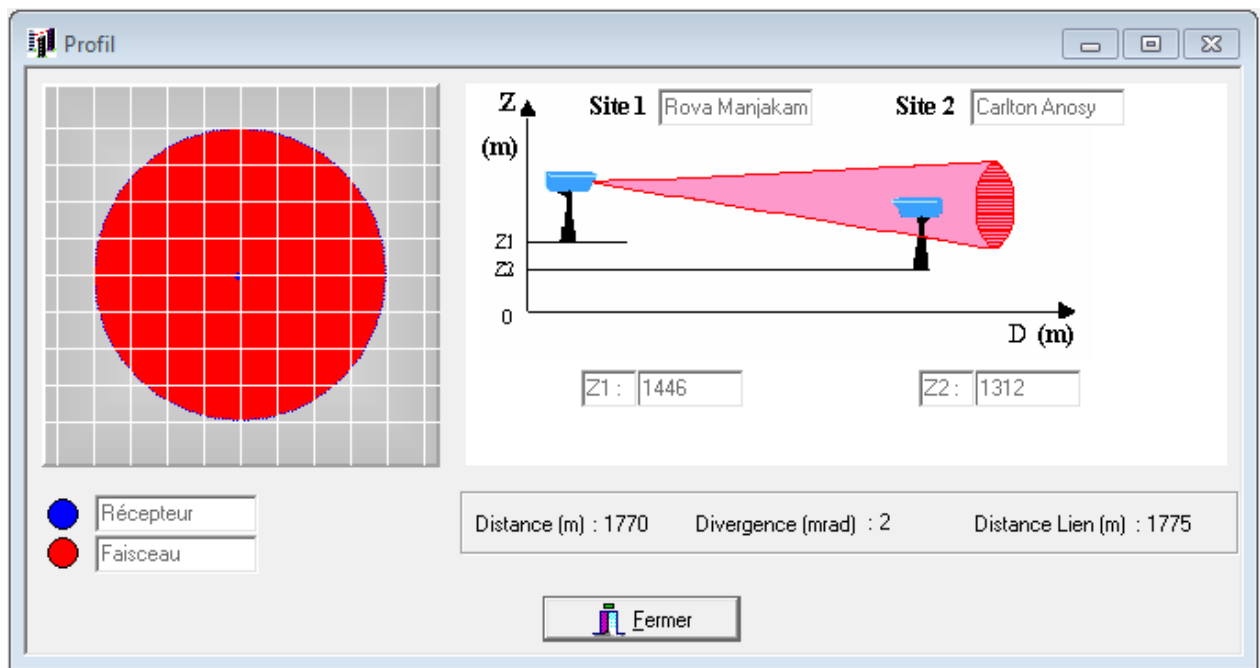


Figure 5.30 : Fenêtre Résultats graphiques pour le Rova Manjakamiadana et l'Hotel Carlton Anosy



**Figure 5.31 :** Fenêtre Données saisies pour le Rova Manjakamiadana et l'Hotel Carlton Anosy

## 5.7 Conclusion

La disponibilité d'une liaison optique atmosphérique dépend des conditions météorologiques et des paramètres de la liaison FSO, tels que la puissance optique transmise, la divergence du faisceau, la sensibilité du récepteur et la distance de la liaison. Un certain nombre de phénomènes atmosphériques, telles que l'absorption, la diffusion et la turbulence, peuvent affecter le faisceau laser, mais dans le cas de longueur d'onde typique seule la diffusion et la turbulence sont à prendre en considération. Un point clé dans le déploiement des systèmes FSO est la fiabilité et la prédiction de la disponibilité de la liaison. Pour cela, plusieurs facteurs entrent en jeu, y compris la fiabilité des équipements, la conception du réseau et les conditions climatiques, telles que la pluie, le brouillard et la scintillation qui sont fonction des paramètres géographiques et topographiques du site d'installation. Dans ce chapitre, grâce à l'outil « FSO Prediction » d'Orange, nous avons pu évaluer la disponibilité et la qualité de service de quelques sites situés à Antananarivo liés deux par deux par une liaison optique atmosphérique. Les probabilités d'interruption pour chaque type d'atténuation (aérosols, scintillation, lumière ambiante, pluie, etc.) et la marge de la liaison sont aussi obtenues à partir des données des équipements, de la localisation géographique et des paramètres climatiques et atmosphériques (brouillard, pluie, etc.).

## CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Les transmissions radio haute fréquence et les transmissions optiques en espace libre gagnent de plus en plus de parts de marché des télécommunications sans fil à haut débit. En effet, à l'inverse des transmissions radio, les transmissions optiques ne nécessitent aucune autorisation et permettent d'accéder à un débit beaucoup plus important que celui des transmissions radio. La technique de modulation la plus pratique dans les systèmes de communications optiques sans fil est la modulation d'intensité à détection directe (IM/DD). Il y a une variété de types de modulation compatibles avec les systèmes FSO qui se basent sur la modulation d'intensité, telles que OOK, PPM et MPPM.

Les résultats des expériences réalisées au sein du laboratoire du groupe de recherche de la communication optique « NCL » l'université de Northumbria (Newcastle, Angleterre) pour étudier la performances des modulations OOK, PPM et MPPM sous un brouillard contrôlé montrent que les modulations OOK et PPM présentent une très bonne performance sous les différentes intensités de brouillard, tandis que la modulation MPPM présente une bonne performance dans le cas de brouillard clair et modéré mais elle présente un taux d'erreur important dans le cas du brouillard dense. Ces résultats montrent que les modulations OOK et PPM sont des très bonnes méthodes en présence du brouillard sous différentes intensités. La plupart des modulations d'intensité souffrent du problème de la synchronisation des symboles.

Pour résoudre ce problème, on a introduit une méthode de modulation hybride basée sur la combinaison de PAM-MPPM. Cette approche résout le problème de synchronisation et elle présente une amélioration remarquable en termes de débit et d'efficacité spectrale. Le seul inconvénient de cette méthode de modulation est la dégradation dans l'efficacité en puissance.

Chaque système de communication optique sans fil a ses propres caractéristiques et ses propres exigences. Chaque méthode de modulation parmi les méthodes proposées se caractérise par un paramètre de conception important, soit la synchronisation, le haut débit, la meilleur efficacité spectrale où en encore la bonne efficacité en puissance, ce qui fait de ces méthodes de modulation des solutions intéressantes pour les différents systèmes de communication optique sans fil et concurrents à d'autres techniques de modulation disponibles.

La détermination des meilleures conditions de disponibilité et de qualité de service requises pour une liaison de communication de type FSO nécessite une étude théorique et expérimentale pour

pouvoir établir, d'une manière précise, la disponibilité d'une telle liaison. Dans ce mémoire, on a essayé de mettre en évidence l'influence de l'atmosphère et de ses différents constituants sur la propagation d'un faisceau laser. En se basant par des modèles mathématiques, on a utilisé le logiciel « FSO Prediction » fourni par Orange afin d'évaluer la qualité de service et de fournir une estimation approximative de la disponibilité d'une liaison optique atmosphérique à un endroit donné en termes de probabilité de connexion en fonction des caractéristiques du système utilisé (Puissance, longueur d'onde, divergence du faisceau, diamètre de la cellule réceptrice, sensibilité du récepteur ...etc.) et en fonction des caractéristiques de site d'installation (longueur, hauteur au dessus du sol, etc.). Ce logiciel est un outil essentiel pour l'étude et le choix technique des infrastructures FSO et de la longueur d'onde appropriée pour les liens point à point courtes distances. Il peut être un outil viable dans le domaine de la simulation et de la modélisation pour tous les spécialistes dans le domaine qui mettent en œuvre des liens de communication FSO à très haut débit.

Plusieurs perspectives s'ouvrent à nous dans le domaine des télécommunications optiques sans fil, comme les modulations codées (Turbocodes, Treillis ou une combinaison de deux ou plusieurs codes), qui est un point clé pour améliorer la performance d'une modulation. D'autre part, l'étude des liaisons de communication avec lumière visible (VLC Visible light communication, connue aussi par le nom LIFI) qui est un domaine de recherche en pleine expansion. Il y a aussi l'aspect logiciel, avec l'introduction d'autres effets que ceux utilisés et l'aspect matériel en utilisant différents capteurs pour avoir encore plus de précision sur les valeurs des paramètres utiles à la simulation de la liaison optique sans fil.

## ANNEXE 1

### CODES SOURCES MATLAB

#### A1.1 L'effet de la réduction de la bande passante par MPPM

```
w=1:1:35;  
  
alpha=((factorial(w)).^(1./w))./w;  
  
plot(w,alpha,'bh-'), grid on  
  
xlabel('Nombre d\'impulsion par Symbole w');  
  
ylabel('Le rapport Alpha');
```

#### A1.2 L'amélioration en débit de MPPM par rapport à PPM pour $w = \{2,4\}$ et pour différentes valeurs de M

```
M=4:1:35;  
  
w=1;  
  
R=(log2((factorial(M))./(factorial(w).*(factorial(M-w)))))./(log2(M));  
  
w=2;  
  
R(2,:)=(log2((factorial(M))./(factorial(w).*(factorial(M-w)))))./(log2(M));  
  
w=4;  
  
R(3,:)=(log2((factorial(M))./(factorial(w).*(factorial(M-w)))))./(log2(M));  
  
plot(M,R), grid on  
  
legend('PPM','2MPPM','4MPPM');  
  
xlabel('Longueur de Symbole M');  
  
ylabel('Débit normalisé à PPM');
```

### **A1.3 L'exigence en puissance normalisée en fonction de l'efficacité spectrale pour PPM, 2MPPM et 4MPPM**

M=4:1:16;

netaPPM=(log2(M))./(M);

expuisPPM=sqrt(2./(M.\*log2(M)));

w=2;

d=2;

neta2MPPM=(log2(factorial(M)./(factorial(w).\*factorial(M-w))))./M;

expuis2MPPM=(2.\*w)./sqrt(M.\*d.\*log2((factorial(M))./(factorial(w).\*(factorial(M-w)))));

M=8:1:16;

w=4;

neta4MPPM=(log2(factorial(M)./(factorial(w).\*factorial(M-w))))./M;

expuis4MPPM=(2.\*w)./sqrt(M.\*d.\*log2((factorial(M))./(factorial(w).\*(factorial(M-w)))));

plot(netaPPM,expuisPPM,neta2MPPM,expuis2MPPM,neta4MPPM,expuis4MPPM)

plot(netaPPM,expuisPPM,neta2MPPM,expuis2MPPM,neta4MPPM,expuis4MPPM), grid on

legend('PPM','2MPPM','4MPPM');

xlabel('Efficacité spectrale');

ylabel('Exigence en puissance [dB]');

### **A1.4 L'efficacité spectrale de MPPM pour différentes valeur de w, où M=48**

M=48;

w=1:1:40;

netaMPPM=(log2(factorial(M)./(factorial(w).\*factorial(M-w))))./M;

plot(w,netaMPPM)

```

plot(w,netaMPPM,'bh-'), grid on

xlabel('Nombre d"impulsion par Symbole w');

ylabel('Efficacité spectrale [bit/s/Hz]');

```

### **A1.5 Puissance normalisée en fonction de l'exigence spectrale de PAM et 3MPPM**

```

M=4:1:32;

netaPAM=log2(M);

expuisPAM=(M-1)./sqrt(log2(M));

w=3;

d=2;

neta3MPPM=(log2((factorial(M))./(factorial(w).*(factorial(M-w)))))./M;

expuis3MPPM=(2.*w)./sqrt(M.*d.*log2((factorial(M))./(factorial(w).*(factorial(M-w)))));

plot(netaPAM,expuisPAM,neta3MPPM,expuis3MPPM)

plot(netaPAM,expuisPAM,neta3MPPM,expuis3MPPM),grid on

legend('MPPM','PAM');

xlabel('Efficacité spectrale');

ylabel('Exigence en puissance [dB]');

```

### **A1.6 Débit normalisé de 3MPPM et 3MPAPM**

```

M=4:1:35;

w=3;

debitMPPM=(log2(factorial(M))./(factorial(w).*factorial(M-w)))./log2(M);

debitMPAPM=2.^(w).*(log2(factorial(M))./(factorial(w).*factorial(M-w)))./log2(M);

plot(M,debitMPPM,M,debitMPAPM),grid on

```

```
legend('3MPPM','3MPAPM');
```

```
xlabel('Longueur de Symbole M');
```

```
ylabel('Débit normalisé à PPM');
```

### **A1.7 Exigence en puissance en fonction de l'efficacité spectrale pour 3MPPM et 3MPAPM**

```
M=4:1:32;
```

```
w=3;
```

```
d=2;
```

```
netaMPAPM=log2(4./3.*M.*(M-1).*(M-2))./M;
```

```
expuisMPAPM=(3.*w)./sqrt(M.*d.*log2((factorial(M))./(factorial(w).*(factorial(M-w)))));
```

```
neta3MPPM=(log2((factorial(M))./(factorial(w).*(factorial(M-w)))))./M;
```

```
expuis3MPPM=(2.*w)./sqrt(M.*d.*log2((factorial(M))./(factorial(w).*(factorial(M-w)))));
```

```
plot(netaMPAPM,expuisMPAPM,neta3MPPM,expuis3MPPM)
```

```
plot(netaMPAPM,expuisMPAPM,neta3MPPM,expuis3MPPM),grid on
```

```
legend('MPAPM','MPPM');
```

```
xlabel('Efficacité spectrale');
```

```
ylabel('Exigence en puissance [dB]');
```

### **A1.8 Débit normalisé de 3MPPM, 3MPAPM et H-3MPPM**

```
M=4:1:35;
```

```
w=3;
```

```
debitMPPM=(log2(factorial(M))./(factorial(w).*factorial(M-w)))./log2(M);
```

```
debitMPAPM=(2.^w).*(log2(factorial(M))./(factorial(w).*factorial(M-w)))./log2(M);
```

```
debitHMPPM =(log2((M-1).*(M-2)))./log2(M);
```

```
plot(M,debitMPPM,M,debitMPAPM,M,debitHMPPM), grid on;
```

```
legend('3MPPM','3MPAPM','H3MPPM');
```

```
xlabel('Longueur de Symbole M');
```

```
ylabel('Débit normalisé à PPM');
```

### **A1.9 exigence en puissance normalisée en fonction de l'efficacité spectrale pour 3MPPM, 3MPAPM, H-3MPPM**

```
M=4:1:32;
```

```
w=3;
```

```
d=2;
```

```
neta3MPPM=(log2((factorial(M))./(factorial(w).*(factorial(M-w)))))./M;
```

```
netaMPAPM=log2(4./3.*M.*(M-1).*(M-2))./M;
```

```
netaH3MPPM=(log2((M-1).*(M-2)))./M;
```

```
expuis3MPPM=(2.*w)./sqrt(M.*d.*log2((factorial(M))./(factorial(w).*(factorial(M-w)))));
```

```
expuisMPAPM=(3.*w)./sqrt(M.*d.*log2((factorial(M))./(factorial(w).*(factorial(M-w)))));
```

```
expuisH3MPPM=(3.*w)./sqrt(M.*d.*log2((factorial(M))./(factorial(w).*(factorial(M-w)))));
```

```
plot(neta3MPPM,expuis3MPPM,netaMPAPM,expuisMPAPM,netaH3MPPM,expuisH3MPPM)
```

```
plot(neta3MPPM,expuis3MPPM,netaMPAPM,expuisMPAPM,netaH3MPPM,expuisH3MPPM),g  
rid on
```

```
legend('3MPPM','3MPAPM','H3MPPM');
```

```
xlabel('Efficacité spectrale');
```

```
ylabel('Exigence en puissance [dB]');
```

### **A1.10 Débit normalisé de 3MPAPM, H-3MPPM et AH-3MPPM**

```
M=3:1:35;
```

```

w=3;

debitMPAPM=(2.^w).*(log2(factorial(M)./(factorial(w).*factorial(M-w))))./log2(M);

debitHMPPM =(log2((M-1).*(M-2)))./log2(M);

debitAHMPPM =2.*M.*log2((M-2).*(M-3))./((M+w+1).*log2(M));

plot(M,debitMPAPM,M,debitHMPPM,M,debitAHMPPM), grid on

legend('3MPPM','3HMPPM','AH3MPPM');

xlabel('Longueur de Symbole M');

ylabel('Débit normalisé à PPM');

```

#### **A1.11 exigence en puissance normalisée en fonction de l'efficacité spectrale pour MPAPM, H3MPPM, AH3MPPM**

```

M=4:1:32;

w=3;

d=2;

netaMPAPM=log2(4./3.*M.*(M-1).*(M-2))./M;

netaAHMPPM=2.*log2((M-2).*(M-3))./(M+w+1);

netaHMPPM=log2((M-1).*(M-2))./M;

expuisMPAPM=(3.*w)./sqrt(M.*d.*log2((factorial(M))./(factorial(w).*(factorial(M-w)))));

expuisHMPPM=(3.*w)./sqrt(M.*d.*log2((factorial(M))./(factorial(w).*(factorial(M-w)))));

expuisAHMPPM=(3.*w)./sqrt(M.*d.*log2((factorial(M))./(factorial(w).*(factorial(M-w)))));

plot(netaMPAPM,expuisMPAPM,netaHMPPM,expuisHMPPM,netaAHMPPM,expuisAHMPPM)
,grid on

legend('3MPAPM','H_3MPPM','AH_3MPPM');

xlabel('Efficacité spectrale');

ylabel('Exigence en puissance [dB]');

```

## ANNEXE 2

### QUELQUES DONNEES METEOROLOGIQUES DE LA PROVINCE D'ANTANANARIVO

La région d'Analamanga fait partie du régime climatique tropical d'altitude supérieure à 900 mètres. Elle est caractérisée par une température moyenne annuelle inférieure ou égale à 20°C. Ce domaine climatique englobe l'axe central de la haute terre et couvre une grande partie de la Province d'Antananarivo.

L'année comporte deux saisons bien individualisées : une saison pluvieuse et moyennement chaude, de Novembre à Mars et une autre fraîche et relativement sèche, durant le reste de l'année. Il existe de nombreux sous-climats. Il est même possible que chaque sous-préfecture ou chaque commune ait sa spécificité climatique.

Le climat est caractérisé par les températures et les pluviométries présentées ci-dessous, et dont les données ont été tirées de la Direction de la Météorologie et de l'Hydrologie d'Antananarivo - Ampandrianomby.

#### A2.1 Le réseau de stations météorologiques

La Région est dotée de 56 stations météorologiques, listées dans le tableau A2.01, dont :

- 48 dans la région de l'Imerina Central,
- 8 dans la région de l'Itasy.

Seulement, la plupart des stations ne sont plus fonctionnelles et une douzaine est à réhabiliter; c'est ainsi que les données disponibles correspondent à des périodes de mesures différentes selon les stations par sous-préfecture.

STATION	Latitude	Longitude	Altitude	Mesure effectuées		OBSERVATIONS
	Sud	Est	(m)	T°	P	
<b>ANTANANARIVO Renivohitra</b>						
1- ANTANANARIVO	18°54	47°32	1310	x	x	non fonctionnelle
2- TSIMBAZAZA	18°56	47°32	1261	x	x	non fonctionnelle
3- AMBATOBE	18°52	47°33	1350	x	x	non fonctionnelle
4- NANISANA	18°53	47°33	1250	x	x	non fonctionnelle

5- MANDROSEZA	18°56	47°33	1272		x	non fonctionnelle
<b>ANTANANARIVO Avaradrano</b>						
6- AMBOHIMANGA	18°46	47°34	1450		x	non fonctionnelle
7- AMBOHIMANGAKELY	18°54	47°36	1310		x	non fonctionnelle
8- AMBOHITRABIBY	18°46	47°37	1457		x	non fonctionnelle
9- ANJEVA	18°56	47°40	1270		x	non fonctionnelle
10- BELANITRA	18°45	47°40	1800		x	non fonctionnelle
<b>ANTANANARIVO Atsimondrano</b>						
11- AMBOHIJANAKA	19°00	47°34	1261		x	non fonctionnelle
12- AMBOHIMANDROSO (Itaosy)	18°56	47°28	1260		x	non fonctionnelle
13- AMBATOFOTSY	19°03	47°33	1470		x	à réhabiliter
14- ANKADINANDRIANA	19°14	47°40	1400		x	non fonctionnelle
<b>AMBATOLAMPY</b>						
15- AMBATOLAMPY	19°22	47°26	1555	x	x	non fonctionnelle
16- MANJAKA TOMPO	19°22	47°18	1600	x	x	à réhabiliter
17- SABOTSY NAMATOANA	19°19	47°23	1610		x	
18- BEHENJY	19°12	47°30	1377			
19- ANTSAMPANDRANO	19°03	47°36	1450	x	x	non fonctionnelle
20- TSINJOARIVO	19°37	47°42	1640	x	x	
<b>ANDRAMASINA</b>						
21- ANDRAMASINA	18°12	47°36	1350		x	
22- AMBOHIMIADANA	19°13	47°47	1525		x	non fonctionnelle
23- ANOSIBE	19°10	47°46	1350		x	
24- MANGABE	19°11	47°43	1475		x	non fonctionnelle
25- TSIAZOMPANIRY	19°16	47°51	1480	x	x	non fonctionnelle
<b>ANJOZOROBE</b>						
26- ANJOZOROBE	18°23	47°53	1150	x	x	
27- ANTANETIBE	18°22	47°35	980		x	non fonctionnelle
28- SADABE	18°37	47°42	-		x	non fonctionnelle
29- AMBOHIARY (Ambatokely)	18°13	47°37	1000		x	non fonctionnelle
<b>MANJAKANDRIANA</b>						
30- ANGAVOKELY	18°55	47°44	1383	x	x	à réhabiliter
31- MANJAKANDRIANA	18°55	47°53	1378		x	
32- AMBATOMANGA	18°59	47°35	1400	x	x	non fonctionnelle
33- MANTASOA	19°01	47°50	1400	x	x	à réhabiliter
34- AMBOHITRANDRIAMANITRA	19°07	47°47	1400		x	non fonctionnelle
35- AMBATOLOANA	18°55	47°53	1383		x	à réhabiliter
36- NANDIHIZANA	18°55	47°32	1344		x	
<b>AMBOHIDRATRIMO</b>						

37- AMBOHIDRATRIMO	18°48	47°27	1300		x	non fonctionnelle
38- AMBOHIDRAIVO	18°49	47°25	-	x	x	
39- SOAMANJAKA	18°54	47°25	1300		x	non fonctionnelle
40- IVATO aéroport	18°48	47°29	1276	x	x	
41- MAHITSY	18°44	47°21	1278		x	non fonctionnelle
42- MERIMANDROSO	18°45	47°31	1353		x	
43- FARAHANTSANA	18°47	47°16	1220		x	non fonctionnelle
<b><u>ANKAZOBE</u></b>						
44- ANKAZOBE	18°17	47°07	1190	x	x	à réhabiliter
45- FIHAONANA	18°36	47°12	1200		x	à réhabiliter
46- MANANKAZO	18°12	47°13	1475	x	x	à réhabiliter
47- KIANGARA	18°58	47°02	900		x	non fonctionnelle
48- MIANTSO	18°43	47°08	1275		x	non fonctionnelle
<b><u>ARIVONIMAMO</u></b>						
1- ARIVONIMAMO	19°02	47°10	1450	x	x	non fonctionnelle
2- AMBOHIPANDRANO	19°03	47°22	1325		x	non fonctionnelle
3- MIANTSOARIVO	19°12	47°25	1403		x	non fonctionnelle
4- IMERINTSIATOSIKA	19°58	47°18	1340		x	non fonctionnelle
<b><u>MIARINARIVO</u></b>						
5- MIARINARIVO	19°58	47°53	1330	x	x	
6- IJELY	19°59	47°55	-	x		non fonctionnelle
<b><u>SOAVINANDRIANA</u></b>						
7- SOAVINANDRIANA	18°10	47°44	1575	x	x	non fonctionnelle
8- AMPEFY	19°03	47°44	-		x	non fonctionnelle

**Tableau A2.01 : Liste des stations météorologiques**

## A2.2 Température (T°)

L'évolution de la température de 2000 à 2002 à Antananarivo est donnée par le tableau A2.02 ci-après. La température moyenne à Antananarivo se situe entre 19°.3C et 19°.8C de 2000 à 2002. La température moyenne maxima est de 24°.6C tandis que le minima est de 14°.6C. Dans l'Itasy, la saison fraîche est également sensible, car la moyenne des minima n'atteint pas 7°C, allant de 4°6C dans la sous-préfecture de Soavinandriana à 6°3C dans celui de Miarinarivo.

ANTANA-NARIVO	Température	Janv	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
Année 2000	T°max	26,6	25,3	24,8	26,5	24,9	20,7	19,8	21,4	23,9	26,6	25,5	26,3
	T°min	17,1	16,6	16,1	15,7	13,9	11,8	11,2	10,7	11,0	13,6	15,4	17,1
	T°Moy	21,9	21,0	20,5	21,1	19,4	16,3	15,5	16,1	17,5	20,1	20,5	21,7
Année 2001	T°max	26,3	27	26,5	26,5	24,5	21,3	20,9	21,9	25,2	24,9	27,2	28,4
	T°min	17,9	17,3	17,1	15,7	13,9	11,1	10,8	12,5	12,5	14	15,1	17,4
	T°Moy	22,1	22,2	21,8	21,1	19,2	16,2	15,9	17,2	18,9	19,5	21,2	22,9
Année 2002	T°max	27,9	26	26,1	23,5	22,6	20,4	22	20,2	24,3	25,4	27,8	26,9
	T°min	16,9	17,7	17,6	15,8	14,4	11,8	10,7	10,7	12,2	13,8	16,3	17,1
	T°Moy	22,4	21,9	21,9	19,7	18,5	16,1	16,4	15,5	18,3	19,6	22,1	22,0

**Tableau A2.02 :** Evolution de la température mensuelle à Antananarivo (2000 à 2002)

### A2.3 Pluviométrie (P)

Dans l'ensemble de la Région, le total annuel des précipitations pour chaque Sous-préfecture dépasse 1000 mm. Dans la région de l'Imerina Central, la moyenne des pluies annuelles est de 1364 mm en 118 jours avec un maximum de 1456,3 mm en 129 jours relevé dans le Sous-préfecture de Manjakandriana, où il n'existe aucun mois sec et un minimum de 1237,5 mm en 90 jours enregistré dans le Sous-préfecture d'Antananarivo Atsimondrano.

	Janv	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Hauteur	Moyenne mensuelle
2000	113,5	256,5	142,4	1,4	4,5	4,0	15,7	0,6	0,5	28,7	189,6	202,4	959,8	80,0
2001	576,5	152,3	45,7	11,3	1,2	1,6	2,1	35,7	0,0	47,3	31,4	253,3	1158,4	96,5
2002	149,1	286,4	74,5	88,7	108,3	10,6	0,2	1,7	45,2	53,6	161,8	274,6	1254,7	104,6
Moyenne	279,7	231,7	87,5	33,8	38,0	5,4	6,0	12,7	15,2	43,2	127,6	243,4	1124,3	93,7

**Tableau A2.03 :** Evolution de la pluviométrie mensuelle à Antananarivo (2000 à 2002)

Dans l'Itasy, le total des précipitations reste également important, avec un maximum de 1703,3mm en 126 jours à Soavinandriana et un minimum de 1353,3mm en 107 jours à Miarinarivo.

La pluviométrie, au point de vue quantité de précipitation annuelle, ne présente pas de grande différence sur les statistiques de 20 ou 30 ans, c'est la répartition dans l'année qui comporte parfois des mois secs trop longs au début de la saison.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] O.Z. Mohammed, “*Wireless Optical Communications Systems in Enterprise Networks*”, The Telecommunications Review, 2003.
- [2] D. Killinger, “*Free space optics for laser communication through the air*”, Optics & Photonics News, vol. 13, pp. 36-42, Oct. 2002.
- [3] R. W. Burns, “*Communications: An International History of the Formative Years (History of Technology Series)*”, Publié par: Institution of Electrical Engineers, London, 1998.
- [4] I. Kim, “*10 G FSO systems position technology for the future*”, Lightwave online, pp. 19-21, Jul. 2009.
- [5] C. Ratsihoarana, “*Télécommunications optiques*”, Cours 4<sup>ème</sup> année, Dép.TCO.-ESPA, A.U. : 2008-2009
- [6] M. A. Naboulsi, “*Contribution à l'étude des liaisons optiques atmosphériques, propagation, disponibilité et fiabilité*”, Thèse de doctorat, Université de Bourgogne, 2005.
- [7] D. Killinger, “*Free space optics for laser communication through the air*”, Optics & Photonics News, vol. 13, pp. 36-42, Oct. 2002.
- [8] Site officiel de l'autorité de régulation des technologies de communication de Madagascar ([www.artec.mg](http://www.artec.mg)).
- [9] H. Willebrand et B. S. Ghuman, “*Free Space Optics: Enabling Optical Connectivity in today's network Indianapolis*”, SAMS publishing, 2002.
- [10] A. K. Majumdar et J. C. Ricklin, “*Free-Space Laser Communications: Principles and Advances*”, New York, Springer, 2008.
- [11] A. Acampora, “*Last mile by laser*”, Scientific American, Jun. 2003.
- [12] H. Wu, B. Hamzeh et M. Kavehrad, “*Achieving carrier class availability of FSO link via a complementary RF link*” in Conference Record of the Thirty- Eighth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, vol. 2, pp. 1483 – 1487, Nov. 2004.
- [13] I. I. Kim et E. Korevaar, “*Availability of free space optics FSO and hybrid FSO/RF*

systems”, Proc. SPIE 4530, 84–95, 2001.

[14] M. Imane “*Liaison Optique Inter-satellitaire*” thèse de magistère, université de Tlemcen, 2010.

[15] <http://www.lightpointe.com/>, “*Understanding the performance of free-space optics*”, white papers

[16] H. Willebrand et B. S. Ghuman, “*Free-Space Optics: Enabling Optical Connectivity in Today’s Networks*”, Sams Publishing, 2002.

[17] Little, P. Dib, K. Shah, N. Barraford et B. Gallagher, “*Using LED Lighting for Ubiquitous Indoor Wireless Networking*”, MCL Technical Report No. TR-05-20-2008.

[18] M. V. Raghavendra, “*Optical Wireless Communication Link Design*”, IJCST (International Journal of Computer Science and Technology) Vol. 1, Issue 2, Dec. 2010.

[19] K. Tsukamoto, T. Higashino, S. Komaki, K. Kazaura, K. Wakamori, T. Suzuki, et M. Matsumoto, “*A new loss model and system design method for radio on free space optical link*”, in International Topical Meeting on Microwave Photonics, MWP ’09, pp. 1–4, Oct. 2009.

[20] R. R. Iniguez, S. M. Idrus et Z. Sun, “*Optical Wireless Communications, IR for Wireless Connectivity*”, publié par Taylor & Francis Group, 2008.

[21] O. Bouchet, H. Sizun, C. Boisrobert, F. de Fornel et P.-N. Favenec “*Optique sans fil. Propagation et communication*”, par. Hermès/Lavoisier, 2004.

[22] C. Andrews, “*Field Guide to Atmospheric Optics Larry*”, University of Central Florida. SPIE Field Guides. Volume FG02. SPIE press Bellingham, Washington USA, 2004.

[23] Y. Kim, “*Modélisation de la qualité de l’air: Évaluation des paramétrisations chimiques et météorologiques*”, Thèse de doctorat de l’Université Paris-Est, 2011.

[24] M. Bass, “*Atmospheric Optics, Modulators, Fiber Optics, X-Ray and Neutron Optic*” Handbook of Optics, Volume V, Third Edition, 2010.

[25] A. Geiger, C. Ting, E. J. Burlbaw, J. Ding et S.-D. Sheu, “*3.5 micron free-space laser communications*”, SPIE, <http://dx.doi.org/10.1117/12.682557>

- [26] “*Propagation data required for the design of terrestrial free-space optical links*”, P Series Radiowave propagation, L’union international de telecommunications, Recommendation ITU-R P.1817-1, Feb. 2012.
- [27] A. K. Majumdar et J. C. Ricklin, “*Free-Space Laser Communications Principles and Advances*”, Springer. 2008.
- [28] S. K. Friedlander, “*Smoke, Dust, and Haze: Fundamentals of Aerosol Dynamics*”, Second Oxford University Press, Inc. Edition, 2000.
- [29] P. B. Harboe et J. R. Souza, “*Free Space Optical Communication Systems: Feasibility Study for Deployment in Brazil*”, Journal of Microwaves and Optoelectronics, Vol. 3, N.o4, Apr. 2004.
- [30] M. A. Naboulsi, H. Sizun et F. de Fornel, “*Fog attenuation prediction for optical and infrared waves*”, Opt. Eng. 43(2) 319–329, Feb. 2004.
- [31] V. Sharma et G. Kaur, “*Degradation Measures in Free Space Optical Communication (FSO) and it’s Mitigation Techniques*”, A Review, International Journal of Computer Applications (0975 – 8887) Volume 55– No.1, Oct. 2012.
- [32] X. Zhu et J. Kahn, “*Free-space optical communication through atmospheric turbulence channels,*” IEEE Trans. on Communications, no. 2, pp. 1293–1300, 2003.
- [33] S. Sabi et N. Vijayakumar, “*Simulation of a Modem using Digital Pulse Interval Modulation for Wireless Optical Links*”, 10th National Conference on Technological Trends (NCTT09) 6-7 Nov. 2009.
- [34] R. Tripathi, J. John, “*Performance Comparison of Modulation Techniques used in Indoor Optical Wireless Systems*”, Proceedings of the Ninth National Conference on Communications (NCC-2003), , IIT Madras, pp.586-590. Jan 31-Feb. 2003.
- [35] M. Ijaz, O. Adebajo, S. Ansari, Z. Ghassemloooy, S. Rajbhandari, H. Le Minh, A. Gholami et E. Leitgeb, “*Experimental Investigation of the Performance of OOK-NRZ and RZ Modulation Techniques under Controlled Turbulence Channel in FSO Systems*”, PGNet, 2010.

- [36] H. Park et J.R. Barry, "*Modulation Analysis for Wireless Infrared Communications*," presented at IEEE. International Conference on Communications, ICC 95, Seattle, pp. 1182-1186, 1995.
- [37] H. Sugiyama et K. Nosu, "*MPPM: A Method for Improving the Band-Utilization Efficiency in Optical PPM*", Journal of Lightwave Technology, vol. 7. no. 3, pp. 465-472, March. 1989.
- [38] J. M. Budinger, M. Vanderaar, P. Wagner et S. Bibyk, "*Combinatorial pulse position modulation for power-efficient free-space laser communications*", SPIE Proc. vol. 1866, Jan.1993.
- [39] N. Farukh et E. Leitgeb, "*Simulation Methods for Reliability and Availability of Complex Systems*", Chapter 13 Availability Estimation via Simulation for Optical Wireless Communication. Springer 2010.
- [40] S. S. Muhammad, B. Flecker, E. Leitgeb et M. Gebhart, "*Characterization of fog attenuation in terrestrial free space optical links*", Journal of Optical Engineering, vol.46, 2007.
- [41] <http://soe.northumbria.ac.uk/ocr/>
- [42] Z. Ghassemlooy, W. Popoola et S. Rajbhandari, "*Optical Wireless Communications: System and Channel Modelling*", Taylor & Francis.2012.
- [43] M. Ijaz, Z. Ghassemlooy, H. Le Minh, S. Rajbhandari, J. Perez, et A. Gholami, "*Bit Error Rate Measurement of Free Space Optical Communication Links under Laboratory-Controlled Fog Conditions*", 16th European Conference on Networks and Optical Communications (NOC), 2011.
- [44] J. Pesek, M. Ijaz, Z. Ghassemlooy, O. Fiser et S. Rajbhandari, "*Measuring the fog attenuation in an indoor free space optical laboratory chamber*", International Conference on Applied Electronics (AE), 5-7 Sept. 2012.
- [45] J. Perez, Z. Ghassemlooy, S. Rajbhandari, M. Ijaz, et H. Le Minh, "*Ethernet FSO Communications Link Performance Study Under a Controlled Fog Environment*", IEEE COMMUNICATIONS LETTERS, VOL. 16, NO. 3, March. 2012.
- [46] M. Summerfield, "*Minding Your BER's et Q's Bit-Error-Rate and Q Factor Measurement: Theory and Practice*", disponible sur le Net, <http://www.ece.ucsb.edu>

- [47] Y. Zeng, R. Green et M. Leeson, “*Multiple Pulse Amplitude and Position Modulation for the Optical Wireless Channel*”, IEEE Transl. 2008.
- [48] M. Rouissat, A.R Borsali et M. C.-Bled, “*AH-MPPM a new modulation scheme for Free Space Optical communication systems*”. IEEE conference on High Capacity Optical Networks and Enabling Technologies (HONET).pp. 106 – 110. 2011.
- [49] B. Wilson et Z. Ghassemlooy, “*Pulse time modulation techniques for Optical communications*”, IEE proceedings-J, vol. 140, no. 6, pp. 346–357. 1993.
- [50]<http://www.orange.com/en/innovation/An-open-innovation/Licences/software-licenses/softwarecards/FSO-prediction-P01258>.
- [51] M. Chabane, M. Alnaboulsi, H. Sizun, O. Bouchet, “*A new quality of service FSO software, SPIE, STRASBOURG*”, France, 2004.
- [52] I. Kim , J. Koontz , H. Hakakha , P. Adhikari , R. Stieger , C. Moursund , M. Barclay , A.Stanford , R. Ruigrok , J. J. Schuster et E. Korevaar, “*Measurement of scintillation and link margin for the TerraLink laser communication system*”, Proc. SPIE, vol. 3232, pp.100 - 118, 1998.
- [53] H. Willebrand, G. Baksheesh, “*Free-Space Optics: Enabling Optical Connectivity in Today’s Networks*”, Sams Publishing Indianapolis, Indiana, 2002.
- [54] V. Kvicera, M. Grabner, O. Fiser, “*Analysis of fog attenuation events at 850 nm measured on an 853 m path*”, Proc. SPIE 7464, Free-Space Laser Communications IX, 74640A, August 21, 2009.
- [55] H. Willebrand, G. Baksheesh, “*Free-Space Optics: Enabling Optical Connectivity in Today’s Networks*”, Sams Publishing Indianapolis, Indiana, 2002.
- [56] K. Varelas, “*An Investigation of Wireless Solutions for the Last Mile*”, Thèse de Doctorat, Naval Postgraduate School Monterey, California, March 2004.
- [57] T. Carbonneau et D. Wisely, “*Opportunities and challenges for optical wireless; the competitive advantage of free space telecommunications links in today's crowded market place*”, SPIE Conference on optical wireless communications, pp 119-128, Dallas, TX. 1998.

- [58] O. Bouchet, H. Sizun, C. Boisrobert, *“Free-Space Optics: Propagation and Communication”*. John Wiley & Sons, 2006.
- [59] S. Bloom, *“The Physics of Free-Space Optics”*, PhD Chief Technical Officer AirFiber, Inc. May. 2002.
- [60] A. PROKEŠ, *“Modeling of Atmospheric Turbulence Effect on Terrestrial FSO Link”*, radioengineering, VOL. 18, NO. 1, April. 2009.
- [61] P.S.Ray, *“Broadband complex Refractive Indices of Ice and Water”*, Applied Optics, vol. 11, 1972.
- [62] M. Abtahi, et L.A. Ruschn, *“ Mitigating of Scintillation Noise in FSO Communication Links Using Saturated Optical Amplifiers”*, IEEE Military Communications Conference, 2006.
- [63] A. Prokes, *“Atmospheric effects on availability of free space optics systems”*, Optical Engineering, vol. 48, no. 6, 066001, 2009.
- [64] S. Mohd, A. B. Mohammad, *“Advances in free space optical technology”*, First Edition 2007, Published in Malaysia by l’Université de Technologie, Malaysia. 2007.
- [65] R. R.-Iniguez, S. M. Idrus et Z. Sun, *“Optical Wireless communications”*, Auerbach Publications. 2008.
- [66] *“Fixed service applications using Free-Space Optical Links”* Report ITU-R F.2106-1, International telecommunication union, ITU.2010.
- [67] E. C. Eisenberg, J. C. Adams et C. S. Cornish, *“Measurement by Reflection Analysis of Optical Attenuation Through Windows”*, Optical Wireless Communications IV. Proceedings of SPIE Vol. 4530, 2001.
- [68] N. Benradouane et B. Benyoucef, *“La fenêtre et son rôle dans la conception des maisons bioclimatiques”*, Revue des Energies Renouvelables CICME’08 Sousse, pp. 41- 46. 2008.
- [69] <http://www.idsa.org/content/content1/terabeam-window-attenuation-meter-wam/>
- [70] <http://www.skyfiber.com/>
- [71] <http://www.lightpointe.com/>

[72] <http://www.planetmath.org/>

## **PAGE DE RENSEIGNEMENTS**

**Nom :** RAKOTOARITINA

**Prénom :** Tojoarisoa

**Adresse :** Lot 0512-C-195 Tsarasaotra

ANTSIRABE 110

Madagascar

Tél. : +261 33 32 230 54 / +261 34 01 259 55

E-mail : rakotoaritina@gmail.com



**Titre du mémoire :** « MODELISATION DES SYSTEMES DE TELECOMMUNICATION  
OPTIQUES SANS FIL »

**Nombre de pages :** 139

**Nombre de figures :** 71

**Nombre de tableaux :** 11

**Mots clés :** modélisation, modulation hybride, AH-MPPM, FSO, MPPM, OOK, PPM.

**Directeur de mémoire :** M. RANDRIAMITANTSOA Paul Auguste

**Téléphone :** +261 33 01 152 76 / +261 34 10 342 58

**E-mail :** rpa@freenet.mg

## **RESUME**

Il est souvent pensé que le réseau fibre optique offre une bande passante presque illimitée. Cependant, dans la réalité, selon les choix architecturaux disponibles, la compatibilité des appareils et des composants, les contraintes de la performance des équipements réseaux et le déploiement du système complet offrent une capacité limitée aux utilisateurs finals. Ainsi, afin de faire face aux besoins croissants en matière de télécommunication à haut débit, les liaisons optiques sans fil atmosphériques constituent une technologie complémentaire aux faisceaux hertziens et aux fibres optiques. Ce mémoire présente la modélisation des systèmes de télécommunication optiques sans fil en étudiant la performance des techniques de modulation utilisées par les systèmes FSO (OOK, PPM et MPPM) sous différentes intensités de brouillard. On a aussi présenté de nouveaux concepts de modulation hybrides comme le AH-MPPM pour les futurs systèmes FSO. De plus, on a effectué une simulation de la disponibilité et de la qualité de service des liaisons FSO sous différentes conditions atmosphériques à partir de l'outil « FSO Prediction ».

## **ABSTRACT**

It is often thought that the optical fiber network nearly offers an unlimited throughput. However, in reality, according to the available architectural choices, the compatibility of the devices and components, the constraints of the performance of the facilities networks and the spreading of the complete system offer a capacity limited to the end users. So, in order to meet the growing needs in telecommunication at high data rates, Optical Wireless Communication or Free Space Optic (FSO) is a complementary technology to microwave and optical fiber. This dissertation presents the modelling of the optical wireless systems of telecommunication while studying the performance of the modulation techniques used by the FSO systems (OOK, PPM and MPPM) under different intensities of fog. We have also presented hybrid new concepts of modulation like AH-MPPM for the future FSO systems. On the other hand, we have done a simulation of the availability and the quality of service of the FSO link under different atmospheric conditions by using the software “FSO Prediction”.