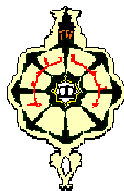


RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITÉ ABOU BEKR BELKAÏD - TLEMCEM -  
DÉPARTEMENT D'ÉLECTRONIQUE



## Thèse

Pour obtenir le grade de  
Docteur de l'université de Tlemcen  
Option : Systèmes et Réseaux de Télécommunications

THÈME

# *Etude et Modélisation d'une Liaison Optique Sans Fil*

Présentée par :

Mr : ROUISSAT Mehdi

Devant le jury composé de :

<b>M. CHIKH Mohammed Amine</b>	Prof. Université Abou Bekr- Belkaid - Tlemcen	Président
<b>M. BASSOU Ghaouti</b>	Prof. Université Djillali Liabes - Sidi Bel Abbas	Examineur
<b>M. NAOUM Rafah</b>	Prof. Université Djillali Liabes - Sidi Bel Abbas	Examineur
<b>M. DJEBBARI Ali</b>	Prof. Université Djillali Liabes - Sidi Bel Abbas	Examineur
<b>M. CHIKH-BLED Mohammed El Kebir</b>	Prof. Université Abou Bekr- Belkaid – Tlemcen	Encadreur
<b>M. BORSALI Ahmed Riad</b>	MCA Université Abou Bekr- Belkaid - Tlemcen	Invité
<b>M. BOUACHA Abdelhafid</b>	MCB Université Abou Bekr- Belkaid - Tlemcen	Invité

Année universitaire 2012 - 2013

# *Dédicaces*

*A mes chers parents,*

*A mes frères,*

*A mes sœurs,*

*A toute ma famille,*

*Et à tous mes amis*

*Je dédie ce modeste travail.*

# Remerciement

*Louange à notre Seigneur "ALLAH" qui nous a doté  
de la faculté de raisonnement.*

*Allah qui nous a donné la force et le courage afin de  
parvenir à élaborer ce modeste travail.*

*Puis à mes parents, je tiens à exprimer mes expressions de remerciements les plus sincères et les plus profonds en reconnaissance de leurs sacrifices, aides, soutien et encouragement afin d'assurer que ma formation soit dans les meilleures conditions.*

*Je remercie le professeur M. CHIKH-BLED pour sa direction de cette thèse, le soutien et pour ses orientations académiques et ses conseils judicieux. Je tiens aussi à exprimer ma profonde gratitude au docteur Riad BORSALI, et je le remercie pour ses orientations et ses orientations et ses conseils judicieux.*

*Je ne manquerai pas d'exprimer ma grande reconnaissance au professeur F.T Bendimerad (directeur du Labo LTT) et tous les enseignants et administrateurs de la faculté de technologie. Je tiens aussi à exprimer mes plus vifs remerciements aux professeurs qui ont acceptés de faire partie du jury, à savoir : M.A. Chikh, G. Bassou , R. Naoum, A. Djebbari et Dr. B.Abdelhafid.*

---

# Table des Matières

---

Table des matières	i
<b>Liste des figures</b>	v
<b>Liste des acronymes</b>	viii
Introduction Générale	1
<b>1. Présentation et principe de fonctionnement des liaisons optiques sans fil</b>	
1. Introduction	4
2. Présentation de la technologie FSO	5
3. Caractéristiques des liaisons optiques atmosphériques	7
4. Domaines d'application des liaisons FSO	9
5. Position de la technologie FSO dans le monde des télécommunications	11
5.1. La boucle locale optique	11
5.2. Les challenges des systèmes FSO	12
5.3. Technologie FSO Vs Fibre optique	14
5.4. Technologie FSO Vs Technologie radio	16
6. L'émission et la réception optique dans les systèmes FSO	18
6.1. L'émetteur FSO	19
6.1.1. Les diodes électroluminescentes (DEL)	20
6.1.2. Les diodes Laser	20
6.1.3 Les critères de sélection des diodes laser dans les systèmes FSO	21

6.2. Le récepteur FSO .....	21
6.2.1. Les Photodétecteurs.....	22
6.2.1. Les critères de sélection des photodétecteurs dans les systèmes FSO .....	23
6.2.3. Techniques de photodétection .....	23
6.3. Caractéristiques des équipements FSO .....	25
7. Conclusion.....	26

## ***2. Propagation du rayonnement laser dans l'atmosphère***

1. Introduction.....	28
2. Structure générale et composition de l'atmosphère terrestre .....	29
2.1. Composition gazeuse.....	30
2.2. Les particules en suspension (aérosols atmosphériques).....	30
2.2.1. Les effets des aérosols sur la propagation dans l'atmosphère .....	31
2.2.2. Sources et mécanismes de formation des aérosols .....	32
3. Transmission en espace libre.....	33
3.1. Absorption atmosphérique .....	34
3.1.1. Absorption moléculaire .....	35
3.1.2. Absorption aérosolaire .....	37
3.2. Diffusion atmosphérique .....	37
3.2.1. Diffusion moléculaire ou diffusion Rayleigh.....	39
3.2.2. Diffusion de Mie .....	39
3.3. Extinction atmosphérique .....	41
3.4. La turbulence.....	42
4. Conclusion.....	42

## ***3. Présentation et étude de performance des modulations OOK PPM et MPPM sous un brouillard contrôlé***

1. Introduction.....	44
2. La Modulation OOK « On-Off Keying ».....	45
3. La modulation PPM “Pulse Position Modulation”.....	46
4. La modulation MPPM “Multi-pulse Pulse Position Modulation” .....	48
5. Résultats et discussion.....	53
5.1. Le débit de PPM et de MPPM.....	53
5.2. L'exigence en puissance et l'efficacité spectrale de PPM et de MPPM .....	54
6. Les modulations OOK, PPM et MPPM sous un brouillard contrôlé .....	56

6.1. Mise en place de l'expérience .....	57
6.2. Effet du brouillard sur la liaison FSO.....	60
6.3. Résultats et discussion.....	62
7. Conclusion.....	67

#### **4. Modulation hybrides pour les futurs système FSO**

1. Introduction.....	69
2. La modulation hybride PAM-MPPM .....	70
2.1. La modulation PAM .....	70
2.2. La modulation PAM-MPPM conventionnelle .....	72
2.3. Harmonic MPPM (H-MPPM) .....	76
2.4. Anisochronous H-MPPM (AH-MPPM) .....	81
3. La modulation Hybride MPPM-PWM .....	85
3.1. La modulation PWM .....	85
3.2. MPDWM (Multi-Pulse Dual Width Modulation) .....	86
3.3. Anisochronous MPDWM .....	89
4. AH-MPPM vs AH-MPDWM .....	92
5. Multi-Pulse Dual Amplitude-Width Modulation (MPDAWM).....	94
6. La combinaison de PPM, DPPM et DPIM avec PAM-PWM .....	99
7. Conclusion.....	103

#### **5. Conception et réalisation d'un logiciel pour la détermination de la (QoS)**

1. Introduction.....	104
2. La marge brute d'une liaison FSO .....	105
2.1. Atténuation moléculaire .....	108
2.2. Affaiblissement géométrique .....	109
2.3. Les pertes du système.....	111
3. Les effets atmosphériques .....	111
3.1. Atténuation par le brouillard .....	112
3.2. Atténuation par la pluie .....	114
3.3. Atténuation par la neige .....	115
3.4. Les effets de scintillations .....	115
3.5. Interférence solaire.....	117
3.5.1. Trajectoire du soleil.....	118
3.5.2. Énergie solaire au récepteur .....	119

4. Installation derrière les fenêtres .....	120
5. La disponibilité de la liaison FSO .....	122
6. Description du logiciel développé.....	123
6.1. L'écran de saisie.....	124
6.2. Calcul et présentation des résultats .....	126
6.3. Les fichiers Input/Output .....	132
7. Conclusion.....	133
Conclusion générale et perspectives	134
<b>Bibliographie</b>	<b>137</b>

# Liste des figures

<b>Fig.1.1</b>	<i>Le principe de fonctionnement de photophone proposé par Graham Bell</i>	4
<b>Fig.1.2</b>	<i>Exemple d'architecture d'un réseau FSO, des liaisons optiques FSO relient des bâtiments centraux entre eux</i>	6
<b>Fig. 1.3</b>	<i>Comparaison entre les différentes technologies d'accès au dernier kilomètre en termes de débit de transmission et de recouvrement géographique</i>	7
<b>Fig. 1.4</b>	<i>Illustration des liaisons de raccordement sans fil "Backhaul" de la téléphonie mobile</i>	10
<b>Fig. 1.5</b>	<i>Comparaison de prix du service d'accès fourni par les systèmes FSO (Lightpoint) et celui du service assuré par des fibres optiques dans une région urbaine</i>	15
<b>Fig. 1.6</b>	<i>Comparaison de prix du service d'accès fourni par les systèmes FSO (Lightpoint) et celui du service assuré par des fibres optiques sur un campus</i>	16
<b>Fig. 1.7</b>	<i>Schéma d'une liaison optique sans fil terrestre FSO</i>	18
<b>Fig. 1.8</b>	<i>Illustration d'une unité FSO émettrice réceptrice</i>	18
<b>Fig. 1.9</b>	<i>Modulation directe par intensité</i>	19
<b>Fig. 1.10</b>	<i>Schéma de principe d'un récepteur de détection optique directe</i>	24
<b>Fig. 1.11</b>	<i>Schéma de principe d'un récepteur de détection optique non directe (Cohérente)</i>	25
<b>Fig. 2.1</b>	<i>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</i>	34
<b>Fig. 2.2</b>	<i>Absorption de la lumière par un milieu absorbant d'épaisseur <math>dx</math></i>	35
<b>Fig. 2.3</b>	<i>Transmission à travers l'atmosphère terrestre en fonction de la longueur d'onde pour un trajet horizontal de 1800 m</i>	36
<b>Fig. 2.4</b>	<i>cellules d'air avec différents indice de réfraction dans le trajet d'une liaison FSO</i>	42
<b>Fig. 3.1</b>	<i>La modulation OOK du message 10011010</i>	45
<b>Fig. 3.2.</b>	<i>Exemple d'encodage avec RZ OOK et NRZ OOK</i>	45
<b>Fig. 3.3</b>	<i>La modulation 8-PPM du message 101</i>	47
<b>Fig. 3.4</b>	<i>Le principe de réduction de la bande passante</i>	50
<b>Fig. 3.5</b>	<i>L'effet de réduction de la bande passante par MPPM</i>	52
<b>Fig. 3.6</b>	<i>L'amélioration en débit de MPPM par rapport à PPM pour <math>w = \{2,4\}</math> et pour différents valeurs de <math>M</math></i>	54
<b>Fig. 3.7</b>	<i>L'efficacité spectrale de PPM et MPPM en fonction de nombre de slots par symbole</i>	55
<b>Fig. 3.8</b>	<i>L'efficacité spectrale de MPPM pour différentes valeur de <math>w</math>, où <math>M=48</math></i>	56
<b>Fig. 3.9</b>	<i>Le dispositif FSO expérimental</i>	57
<b>Fig. 3.10</b>	<i>Bloc diagramme du montage expérimental</i>	58



<b>Fig. 3.11</b> <i>Le générateur de signaux utilisé</i> .....	58
<b>Fig. 3.12</b> <i>La Transmittance en fonction de la visibilité, jusqu'à <math>V=1</math> km</i> .....	61
<b>Fig. 3.13</b> <i>L'atténuation en fonction de la visibilité</i> .....	62
<b>Fig. 3.14</b> <i>Diagramme de l'œil</i> .....	63
<b>Fig. 3.15</b> <i>Le facteur de qualité 'Q' en fonction de la Transmittance</i> .....	63
<b>Fig. 3.16</b> <i>Les signaux de OOK, PPM et MPPM au niveau de réception sous différentes intensités de brouillard</i> .....	64
<b>Fig. 3.17</b> <i>Les diagrammes de l'œil de OOK, PPM et MPPM au niveau de réception sous différentes intensités de brouillard</i> .....	65
<b>Fig. 3.18</b> <i>L'atténuation en fonction de la visibilité avec le model de Kim, pour différentes longueurs d'onde</i> .....	67
<b>Fig. 4.1</b> <i>Exemple d'encodage PAM</i> .....	70
<b>Fig. 4.2</b> <i>Puissance normalisé en fonction de l'exigence spectrale de PAM et 3MPPM</i> .....	71
<b>Fig. 4.3</b> <i>Débit normalisé de 3MPPM et 3MPAPM</i> .....	73
<b>Fig. 4.4</b> <i>Exigence en puissance en fonction de l'efficacité spectrale pour 3MPPM et 3MPAPM</i> ....	76
<b>Fig. 4.5.</b> <i>Exemple d'Encodage d'une série de bit de données vers H-3MPPM</i> .....	77
<b>Fig. 4.6.</b> <i>Débit normalisé de 3MPPM, 3MPAPM et H-3MPPM</i> .....	78
<b>Fig. 4.7</b> <i>Exigence en puissance en fonction de l'efficacité spectrale pour 3MPPM et 3MPAPM et H-3MPPM</i> .....	80
<b>Fig. 4.8</b> <i>Débit normalisé de 3MPAPM, H-3MPPM et AH-3MPPM</i> .....	82
<b>Fig. 4.9</b> <i>Exigence en puissance en fonction de l'efficacité spectrale pour 3MPAPM, H-3MPPM et AH-3MPPM</i> .....	84
<b>Fig. 4.10</b> <i>Les techniques de modulation de PPM et PWM</i> .....	85
<b>Fig. 4.11</b> <i>Puissance normalisée en fonction de l'exigence spectrale de PWM et 3MPPM</i> .....	86
<b>Fig. 4.12</b> <i>Débit normalisé de 3MPPM et 3MPDWM</i> .....	87
<b>Fig. 4.13</b> <i>Exigence en puissance en fonction de l'efficacité spectrale pour les modulations 3MPPM et 3MPDWM</i> .....	89
<b>Fig. 4.14.</b> <i>Exemple d'Encodage d'une série de bit de données vers H-3MPPM</i> .....	90
<b>Fig. 4.15</b> <i>Débit normalisé de 3MPDWM et de AH-3MPDWM</i> .....	91
<b>Fig. 4.16</b> <i>Exigence en puissance en fonction de l'efficacité spectrale pour 3MPDWM et AH-3MPDWM</i> .....	92
<b>Fig. 4.17</b> <i>Débit normalisé d'AH-3MPPM et AH-3MPDWM</i> .....	93
<b>Fig. 4.18</b> <i>Exigence en puissance en fonction de l'efficacité spectrale pour AH-MPPM et AH-3MPDWM</i> .....	94
<b>Fig. 4.19</b> <i>Exemple d'encodage de série de bits vers MPDAWM</i> .....	95
<b>Fig. 4.20</b> <i>Débit normalisé de 3MPPM, 3MPAPM et MPDAWM</i> .....	96
<b>Fig. 4.21</b> <i>Exigence en puissance en fonction de l'efficacité spectrale pour 3MPPM, 3MPAPM et MPDAWM</i> .....	98

<b>Fig. 4.22</b> un exemple d'encodage d'une série bit de données vers DAWPIM .....	99
<b>Fig. 4.23</b> Débit normalisé de DPIM et DAWPIM .....	101
<b>Fig. 4.24</b> Exigence en puissance en fonction de l'efficacité spectrale pour DPIM et DAWPIM ....	102
<b>Fig. 5.1</b> A- Marge brute d'une liaison quelconque en fonction de la distance. -B- l'atténuation atmosphérique en fonction de la distance .....	108
<b>Fig. 5.2</b> Les paramètres pour calculer l'atténuation géométriques.....	109
<b>Fig. 5.3</b> Cellules d'air avec différents indice de réfraction dans le trajet d'une liaison FSO .....	116
<b>Fig. 5.4</b> Atténuation causé par scintillations pour $l=1000m$ et $\lambda =850nm$ .....	117
<b>Fig. 5.5</b> Représentation schématique de la course du soleil vis-à-vis d'une liaison optique atmosphérique .....	118
<b>Fig. 5.6</b> Le taux de transmission d'un vitrage en fonction de l'angle d'incidence .....	121
<b>Fig. 5.7</b> L'écran de saisie des données.....	125
<b>Fig. 5.8</b> La marge brute de puissance et l'affaiblissement géométrique en fonction de la distance .....	127
<b>Fig. 5.9</b> Ecran de récupération des données pour prédiction instantanée.....	129
<b>Fig. 5.10</b> l'indisponibilité en fonction des mois et en fonction des conditions atmosphériques .....	130
<b>Fig. 5.11</b> Ecran de récupération des données pour une prédiction instantanée.....	131
<b>Fig. 5.12</b> La puissance supplémentaire en fonction de la distance .....	132

# *Liste des acronymes*

A.P.D	<b>A</b> valanche <b>P</b> hoto <b>D</b> iode
A.R.P.T	l’ <b>A</b> utorité de <b>R</b> égulation de <b>P</b> oste et de <b>T</b> élécommunications
AH-MPDWM	<b>A</b> nisochronous <b>H</b> armonic <b>M</b> ulti- <b>P</b> ulse <b>D</b> ual <b>W</b> idth <b>M</b> odulation
AH-MPPM	<b>A</b> nisochronous <b>H</b> armonic <b>M</b> ulti-pulse <b>P</b> ulse <b>P</b> osition <b>M</b> odulation
AWG	<b>A</b> rbitrary <b>W</b> aveform <b>G</b> enerator
B.L	<b>B</b> oucle <b>L</b> ocale
C.P.L	<b>C</b> ourant <b>P</b> orteur <b>E</b> n <b>L</b> igne
D.E.L	<b>D</b> iode <b>É</b> lectro <b>L</b> uminescente
DAWPIM	<b>D</b> ual <b>A</b> mplitude- <b>W</b> idth <b>P</b> ulse <b>I</b> nterval <b>M</b> odulation)
DPIM	<b>D</b> igital <b>P</b> ulse <b>I</b> nterval <b>M</b> odulation
F.S.O	<b>F</b> ree <b>S</b> pace <b>O</b> ptic
F.S.O.L	<b>F</b> ree <b>S</b> pace <b>O</b> ptic <b>L</b> ink
F.T.T.x	<b>F</b> ibre <b>T</b> o <b>T</b> he <b>x</b>
GSM	<b>G</b> lobal <b>S</b> ystem for <b>M</b> obile <b>C</b> ommunications
H-MPPM	<b>H</b> armonic <b>M</b> ulti-pulse <b>P</b> ulse <b>P</b> osition <b>M</b> odulation
I.M/D.D	<b>I</b> ntensity <b>M</b> odulation/ <b>D</b> irect <b>D</b> etection
I.W.O.C	<b>I</b> ndoor <b>W</b> ireless <b>O</b> ptical <b>C</b> ommunications
ISG	<b>I</b> nter <b>S</b> ymbol <b>G</b> ap
L.A.S.E.R	<b>L</b> ight <b>A</b> mplification by <b>S</b> timulated <b>E</b> mission of <b>R</b> adiation
L.O.S	<b>L</b> ine <b>O</b> f <b>S</b> ight
MPAPM	<b>M</b> ultiple <b>P</b> ulse <b>A</b> mplitude and <b>P</b> osition <b>M</b> odulation
MPDWM	<b>M</b> ulti <b>P</b> ulse <b>D</b> ual <b>W</b> idth <b>M</b> odulation
MPPM	<b>M</b> ulti-pulse <b>P</b> ulse <b>P</b> osition <b>M</b> odulation
O.L	<b>O</b> scillateur <b>L</b> ocal
OOK	<b>O</b> n <b>O</b> ff <b>K</b> eying
P.I.N	<b>P</b> ositive <b>I</b> ntrinsic <b>N</b> egative
PAM	<b>P</b> ulse <b>A</b> mplitude <b>M</b> odulation
PPM	<b>P</b> ulse <b>P</b> osition <b>M</b> odulation
PRBS	<b>P</b> seudo <b>R</b> andom <b>B</b> it <b>S</b> equence
PWM	<b>P</b> ulse <b>W</b> idth <b>M</b> odulation

R.F	<b>R</b> adio <b>F</b> requency
V.C.S.E.L	<b>V</b> ertical <b>C</b> avity <b>S</b> urface <b>E</b> mitting <b>L</b> aser
W.O.C	<b>W</b> ireless <b>O</b> ptical <b>C</b> ommunications
WI-FI	<b>W</b> ireless <b>F</b> idelity (IEEE 802.11b wireless networking)

# Introduction générale

Les liaisons optiques sans fil atmosphériques, dénomination française de « *Free Space Optic (F.S.O)* », appelées aussi « *W.O.C. Wireless Optical Communications* », constituent une technologie complémentaire aux faisceaux hertziens et aux fibres optiques afin de faire face aux besoins croissants en matière de télécommunication à débits élevés. 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 entre les stations de base et le backbone (épine dorsale du réseau). En d'autres termes, les réseaux qui existent déjà (conçus pour un trafic lent) sont incapables d'assurer la qualité de service demandée aujourd'hui par le marché. Peu onéreux, simples à installer et à exploiter, 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 optique sans fil est multidisciplinaire, impliquant un large éventail de domaines, notamment: la conception optique, l'optoélectronique, la conception électronique, la modélisation du canal, la théorie de l'information et de la communication, la modulation et le codage, l'architecture des réseaux sans fil...

Le choix du format de modulation est l'un des facteurs principaux dans la réalisation d'un système de communication de haute performance à un coût raisonnable et à une complexité acceptable. OOK (On Off Keying) est la modulation la plus simple et la plus utilisée dans les

systèmes de communication FSO commerciales, 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 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 PPM) est une généralisation de la PPM, elle permet d'atteindre un débit d'informations important, et une meilleure efficacité spectrale.

La première contribution de cette thèse est l'étude et l'analyse de performance des modulations OOK, PPM et MPPM sous un brouillard contrôlé. Les résultats des expériences réalisées 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) vont être présentées.

En outre, il existe plusieurs inconvénients à MPPM sur lesquels des améliorations significatives doivent être apportées, comme la synchronisation à titre d'exemple, qui est une préoccupation majeure dans la conception d'une modulation afin de simplifier l'opération de récupération de flux de données.

Les autres travaux relatifs à cette thèse ont été réalisés au Laboratoire de Télécommunications de Tlemcen (LTT), groupe de Télécommunications Optiques.

Note deuxième contribution se base sur les inconvénients que présentent les méthodes PPM et MPPM, où nous allons présenter trois méthodes de modulation compatible avec les systèmes de communications optique sans fil. Pour résoudre le problème de synchronisation des symboles et simplifier l'opération de récupération de flux de données au niveau de réception, on va présenter AH-MPPM (*Anisochronous Harmonic Multi-Pulse Pulse Position Modulation*) et AMPDWM (*Anisochronous Multi-Pulse Dual Width Modulation*). On va aussi présenter MPDAWM (*Multi-Pulse Dual Amplitude-Width Modulation*) essentiellement pour améliorer à la fois le débit, l'efficacité spectrale et l'efficacité en puissance.

La disponibilité et la fiabilité d'une liaison optique atmosphérique 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 quantifiable, le plus grand défi est l'effet des paramètres climatiques et atmosphériques qui changent à travers le temps et selon la situation géographique.

Dans notre troisième contribution, on va essayer de mettre en évidence l'influence de l'atmosphère et de ses constituants sur la propagation d'un faisceau laser, en présentant un nouveau logiciel (WOCL-Predi). Permettant ainsi aux spécialistes dans le domaine FSO d'évaluer en fonction des caractéristiques du système (puissance, longueur d'onde, divergence

du faisceau, diamètre de la cellule réceptrice, sensibilité du récepteur ...etc.) et en fonction des caractéristiques du site d'installation (longueur, hauteur au dessus du sol, etc.) de déterminer la disponibilité et la qualité de service d'une liaison optique sans fil. Le logiciel développé «WOCL.Predi » fourni la prévision instantanée ainsi que la prévision à long terme, et il prend en compte le cas où les unités FSO sont installées derrière des fenêtres.

La thèse est organisée en cinq chapitres avec une conclusion générale.

Dans le premier chapitre, on va présenter la technologie FSO, les domaines d'application, les avantages, les limites, 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 l'influence de l'atmosphère terrestre comme milieu de propagation sur la transmission des signaux optique laser en mettant l'accent sur les phénomènes physiques qui sont l'absorption, la diffusion et la turbulence optique.

Dans le troisième chapitre on va présenter une analyse comparative de performance entre les modulations OOK, PPM et MPPM, en montrant les raisons qui les rendent désirables pour les systèmes de communication optique sans fil. En outre, on va également attirer l'attention sur les limites des modulations PPM et MPPM qui seront la base des modulations hybrides qui vont être présentées dans le quatrième chapitre. On va aussi analyser expérimentalement les performances de ces modulations sous un brouillard contrôlé.

Le quatrième chapitre est consacré à quelques modulations hybrides compatibles avec les systèmes de communications optiques sans fil basé sur les inconvénients de PPM et de MPPM. On va essayer de résoudre le problème de synchronisation de symboles et simplifier l'opération de récupération de flux de données au niveau de réception pour améliorer le débit, l'efficacité spectrale et l'efficacité en puissance.

Dans le cinquième et dernier chapitre on va présenter les modèles mathématiques qui servent à calculer les différentes atténuations atmosphériques, et on va présenter le logiciel développé (WOCL-Predi) qui permet d'évaluer la disponibilité et la qualité de service d'une liaison optique sans fil.

*Chapitre*

1

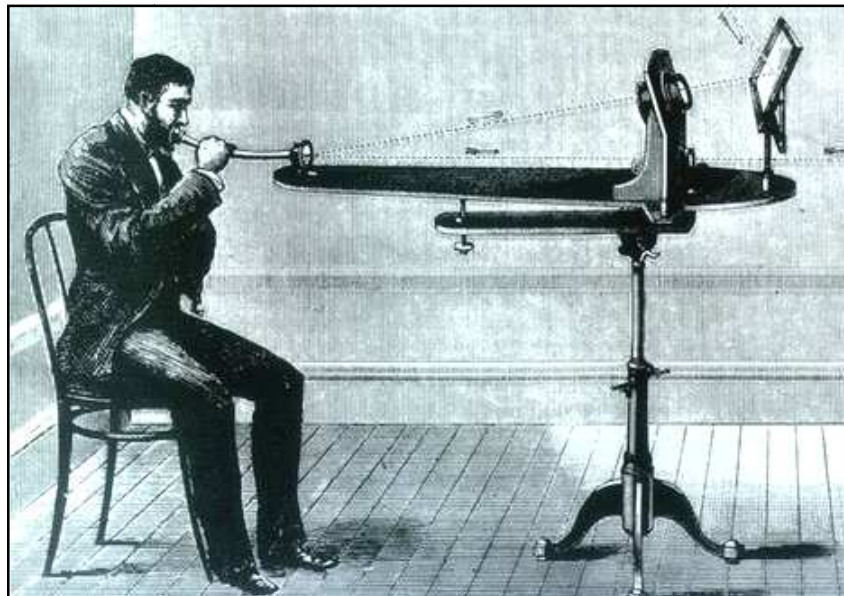
*Présentation et Principe de  
Fonctionnement des Liaisons  
Optiques Sans fil*



## 1. Introduction

Les liaisons optiques atmosphériques, dénomination française de « *Free Space Optic (F.S.O)* », appelées aussi « *W.O.C. Wireless Optical Communications* » [1], constituent une alternative aux faisceaux hertziens et aux câbles optiques afin de faire face aux besoins croissants en matière de télécommunication à débits élevés. 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 en ayant la souplesse et les avantages du sans fil, plus la mobilité dans certaines applications.

Le concept des liaisons optiques atmosphériques (FSO) à savoir l'utilisation de la lumière en espace libre dans les télécommunications, n'est pas récent, la première communication optique à travers l'espace libre été l'expérience de **Photophone** (figure 1.1) [2] par *Alexander Graham Bell* en 1880 [3], brevet déposé le 3 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, *Bell* a toujours considéré le photophone comme sa plus grande invention : "*The greatest invention I have ever made ; greater than the telephone*" [4].



**Fig.1.1** Le principe de fonctionnement du photophone proposé par Graham Bell

L'expérience de Photophone n'a pas fonctionné très bien à cause de la crudité des appareils utilisés et de la nature intermittente des radiations solaires. Cependant, le concept est tout simplement resté une curiosité intéressante jusqu'à l'invention du laser en 1960, qui a annoncé la véritable naissance de la technologie des systèmes de télécommunications

basés sur les liaisons optiques sans fil. Cette technologie a été dans un premier temps développée essentiellement pour des applications dans le domaine de la défense et de l'ingénierie aérospatiale.

A la fin des années 80s, les liaisons optiques sans fil sont apparues comme une option commerciale qui s'est heurtée à plusieurs restrictions technologiques ; 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 vidéo à des débits élevés, que plusieurs compagnies de télécommunications ont développés une "Nouvelle Génération" de systèmes 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 [5].

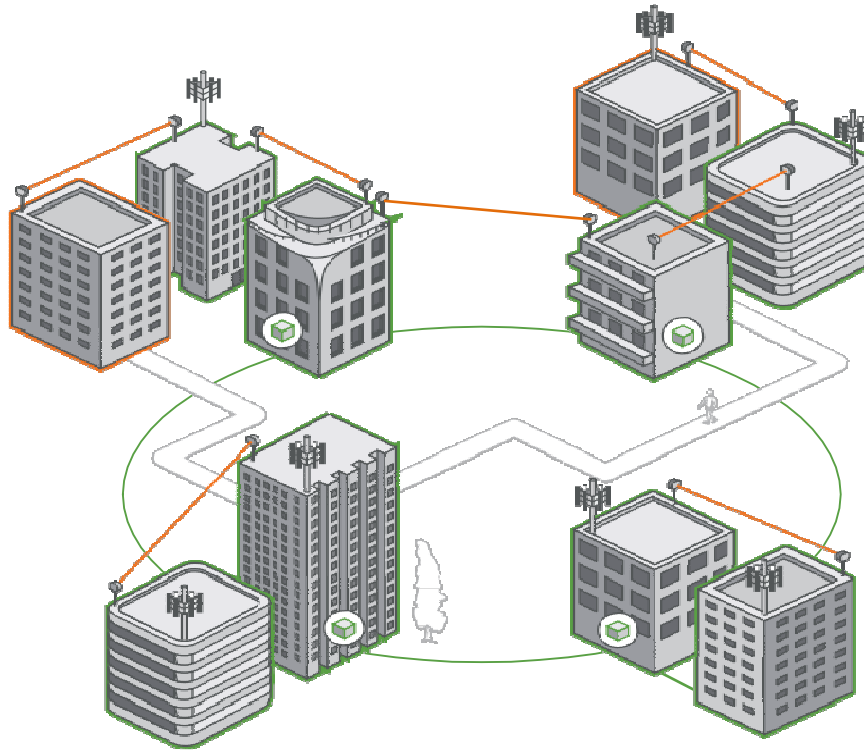
Dans ce chapitre, après avoir défini les liaisons optiques en espace libre, on va décrire le principe de base de cette technologie, et expliquer les divers intérêts et limitations de ce type de liaisons ainsi que leurs applications et leurs implications dans le monde des télécommunications d'aujourd'hui.

## 2. Présentation de la technologie FSO

En terme simple, une liaison optique sans fil implique 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 l'eau de mer. L'accent mis dans ce travail est cependant sur FSO terrestres, en tant que tel, le canal d'intérêt est l'atmosphère.

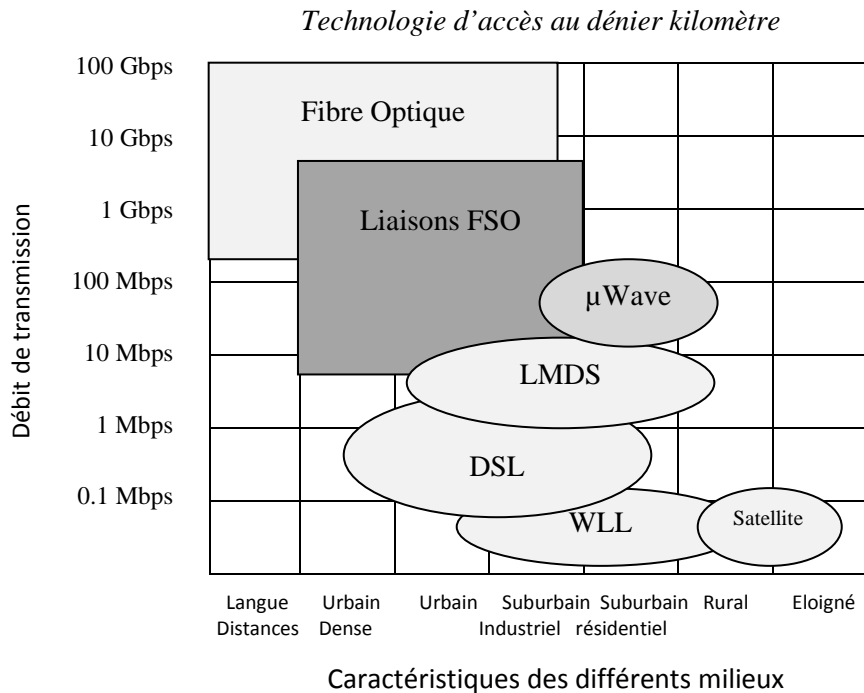
Une liaison optique sans fil se fonde essentiellement sur une visibilité directe LOS (*Line of Sight*) entre les extrémités des points de communication, par conséquent pour assurer un échange fructueux d'informations cela exige que l'émetteur et le récepteur soit en visibilité direct l'un avec l'autre sans aucune obstruction. Ce qui fait que la communication optique sans fil est théoriquement possible tant que : il y a une visibilité direct entre la source et la destination, et la puissance de rayon est suffisante pour atteindre

l'autre extrémité. La figure 1.2 présente un exemple d'architecture réseau basée sur les liaisons optiques sans fil.



**Fig.1.2** Exemple d'architecture d'un réseau FSO, des liaisons optiques FSO reliant des bâtiments centraux entre eux.

Le marché des communications sans fil à haut débit, est partagé entre les transmissions radio haute fréquence et les transmissions optiques en espace libre qui gagnent de plus en plus de parts du marché des télécommunications sans fil. 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. Pour assurer des nouveaux services dans le monde des télécommunications tels que la téléphonie mobile 3G et le WI-FI, 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 entre les stations de base et le *backbone* (épine dorsale du réseau). En d'autres termes, les réseaux qui existent déjà (conçus pour un trafic lent) sont incapables d'assurer la qualité de service demandée aujourd'hui par le marché. La figure 1.3 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.



**Fig. 1.3** Comparaison entre les différentes technologies d'accès au dernier kilomètre en termes de débit de transmission et de recouvrement géographique.

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) par l'intermédiaire d'un couple Emetteur/Récepteur à chaque extrémité. En général, c'est une liaison point à point, cependant, il existe des équipements FSO considérés comme des liaisons point à multipoint. Les caractéristiques de base, les domaines d'application et la description de chaque bloc fondamental d'un système FSO sont discutées dans les sections suivantes.

### 3. Caractéristiques des liaisons optiques atmosphériques

Les principaux intérêts des systèmes de communications optiques sans fil sont : le faible coût, la flexibilité, la rapidité d'installation et de déploiement et de redéploiement par rapport à la fibre optique pour assurer un débit comparable tout ayant la souplesse du sans fil. 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 Mbits/s, 622 Mbits/s, voire à plusieurs Gbits/s. Depuis quelques années un débit de 160 Gbits/s a été démontré en laboratoire [6].

Les caractéristiques de base de la technologie FSO sont:

- **Énorme bande passante de modulation** : Dans tout système de communication, la quantité de données transportées est directement liée à la bande passante de la porteuse modulée. L'utilisation d'un support optique (fibre ou sans fil) dont la fréquence varie de  $10^{12}$  Hz à  $10^{16}$  Hz pourrait permettre la transmission de jusqu'à 2000 THz de données. Les communications optiques garantissent donc une grande capacité d'information par rapport à des systèmes basés sur les communications radio fréquence, où la largeur de bande de fréquences utilisable dans la gamme RF est comparativement plus faible d'un facteur de  $10^5$ . Le tableau 1.1 montre l'évolution de débit au cours des années pour un des leaders constructeurs des équipements FSO : MRV [7].

<i>L'année</i>	<i>Le débit atteint</i>
1995	10 Mbps
2000	100 Mbps
2005	1 Gbps
2008	10 Gbps

**Tab.1.1** Evolution de débit durant les années chez « MRV »  
un des leaders dans l'industrie FSO

- **Faisceau de taille étroite**: Le rayonnement optique est connu par son faisceau très étroit, un faisceau laser typique possède un angle de divergence entre 0,01 et 0,1 mrad [8]. Cela implique que 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. Le confinement spatiale des rayons optiques permet aussi aux faisceaux laser de fonctionner presque indépendamment, offrant des degrés pratiquement illimités de réutilisation des fréquences dans de nombreux environnements dense et rend l'interception des données transmis à travers ces rayons vraiment difficiles par d'autres utilisateurs.
- **Un spectre ne nécessitant pas de licence** : En raison de la congestion du spectre des radiofréquences, les interférences de transporteurs adjacents est un problème majeur. Pour minimiser ces interférences, les autorités réglementaires, telles que l'Autorité de Régulation de Poste et de Télécommunications (ARPT) [9] en Algérie; mettent en place une réglementation très stricte. Pour se voir attribuer une tranche du spectre radio donc exige une taxe énorme plus les procédures qui peuvent être fatigantes. À l'heure

actuelle, les fréquences optiques sont libres de tout cela. L'absence d'un droit de licence implique que le rendement des investissements dans la technologie FSO coulent beaucoup plus rapide tan que la mise en place initiale des coûts est plus faible et le temps de déploiement est plus court.

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

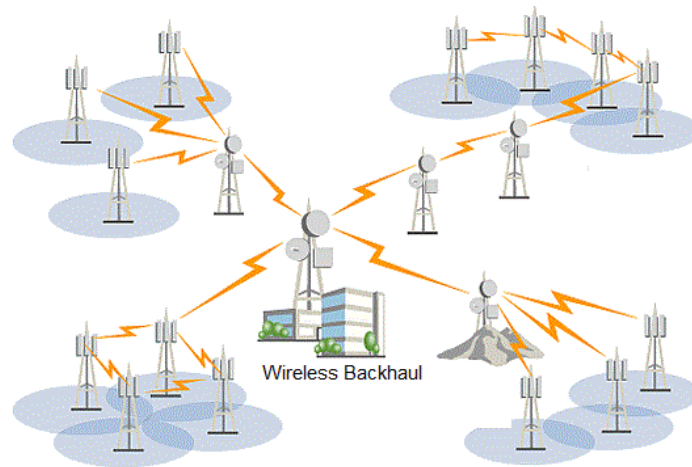
L'absence de licences et de réglementation se traduit dans la facilité, la rapidité et le faible coût de déploiement. Et puisque les émetteurs-récepteurs FSO peuvent transmettre et recevoir à travers les fenêtres, il est possible de monter les équipements FSO à l'intérieur des bâtiments, ce qui réduit la nécessité d'allouer des espaces sur les toits, simplifie le câblage, et permettant aux équipements FSO de fonctionner dans un environnement très favorable.

#### 4. Domaines d'application des liaisons FSO

Les caractéristiques de la technologie FSO discutées ci-dessus sont très attrayantes 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 Fibre To The-x (FTTx).

- **Soutien pour les liaisons à 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 à fibre optique principale [10].
- **Les 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 (figure 1.4). Ceci permet une

amélioration des réseaux mobiles sans fil et une extension du haut débit pour le *Backhaul* entre les stations de base.



**Fig. 1.4** Illustration des liaisons de raccordement sans fil "Backhaul" de la téléphonie mobile

Un système de communication optique sans fil est une solution séduisante, car elle permet de s'affranchir des faisceaux hertziens très largement employés pour le déploiement du GSM 900 ou 1800 et qui pose déjà des problèmes de saturation de fréquences. 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 [11]. Elle est utilisée aussi pour le remplacement des fibres optiques momentanément, les différentes applications où les fibres optiques ne peuvent pas être utilisées pour une raison ou une autre, et le déploiement dans le cas d'installation temporaire pour un chantier ou toute autre cause catastrophique.
- **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, 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 milli radians, donc la seule façon d'intercepter le signal est d'être dans la voie de transmission.

Peu onéreux, simple 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.

## 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.

### 5.1 La boucle locale optique

Aujourd'hui, les liaisons de communication vivent un énorme bouleversement et passent de l'accès par câble à l'accès sans fil. Les réseaux de télécommunications utilisent pour les grandes distances 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 existant 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 technologies en compétition sur le marché de la boucle locale sont indiquées dans le tableau .1.2

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 la fibre optique, le câble coaxial ou enfin 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).

<i>Filaire</i>	<i>Sans fil</i>
Câble cuivre	Radio
Câble coaxial	Hertzien
Câble fibre optique	<b>O p t i q u e</b>

**Tab. 1.2** *Les technologies en compétition sur le marché de la Boucle Locale*

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 (épine dorsale du réseau), tant que les réseaux qui existent déjà (conçus pour un trafic lent) 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 peut prendre de 6 à 12 mois, et peut coûter de 100 000 \$ à 500,000 \$ par mile, avec jusqu'à 85% des coûts en raison des tranchées et des installations [12]. 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) du coût d'une installation de la fibre.

## **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 optique 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 communications 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 de totalement empêcher 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 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

**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 (graticiels).

**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 de du brouillard qui peut provoquer une extinction significative du faisceau lumineux et mettre le système hors service vu la taille des particules qui est comparable aux longueurs d'onde de transmission des systèmes FSO.

Il existe différentes solutions à ces problèmes. Par exemple, les effets des aérosols, ceux des brouillards et ceux de la turbulence, leurs réductions passent, entre autres, par le choix approprié de la longueur d'onde de transmission.

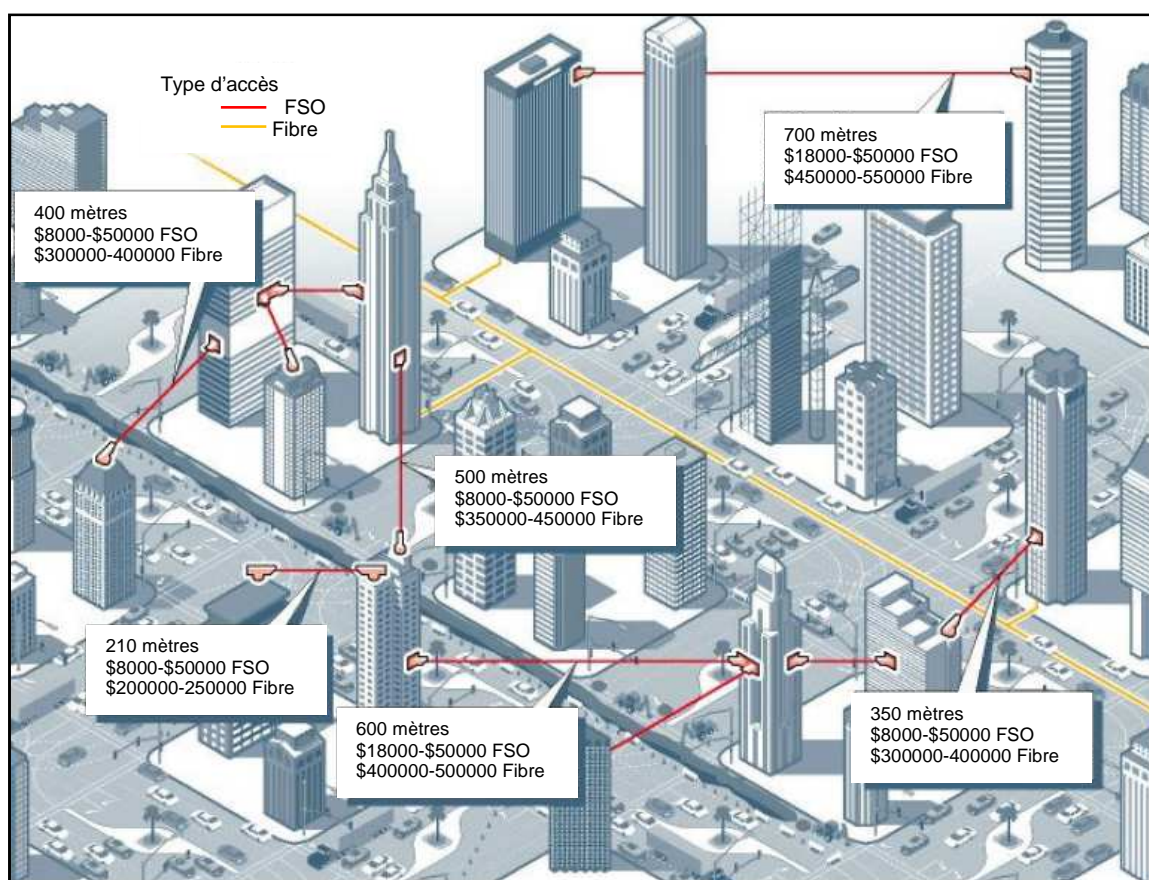
### **5.3 Technologie FSO Vs Fibre optique**

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 les plus importants 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.

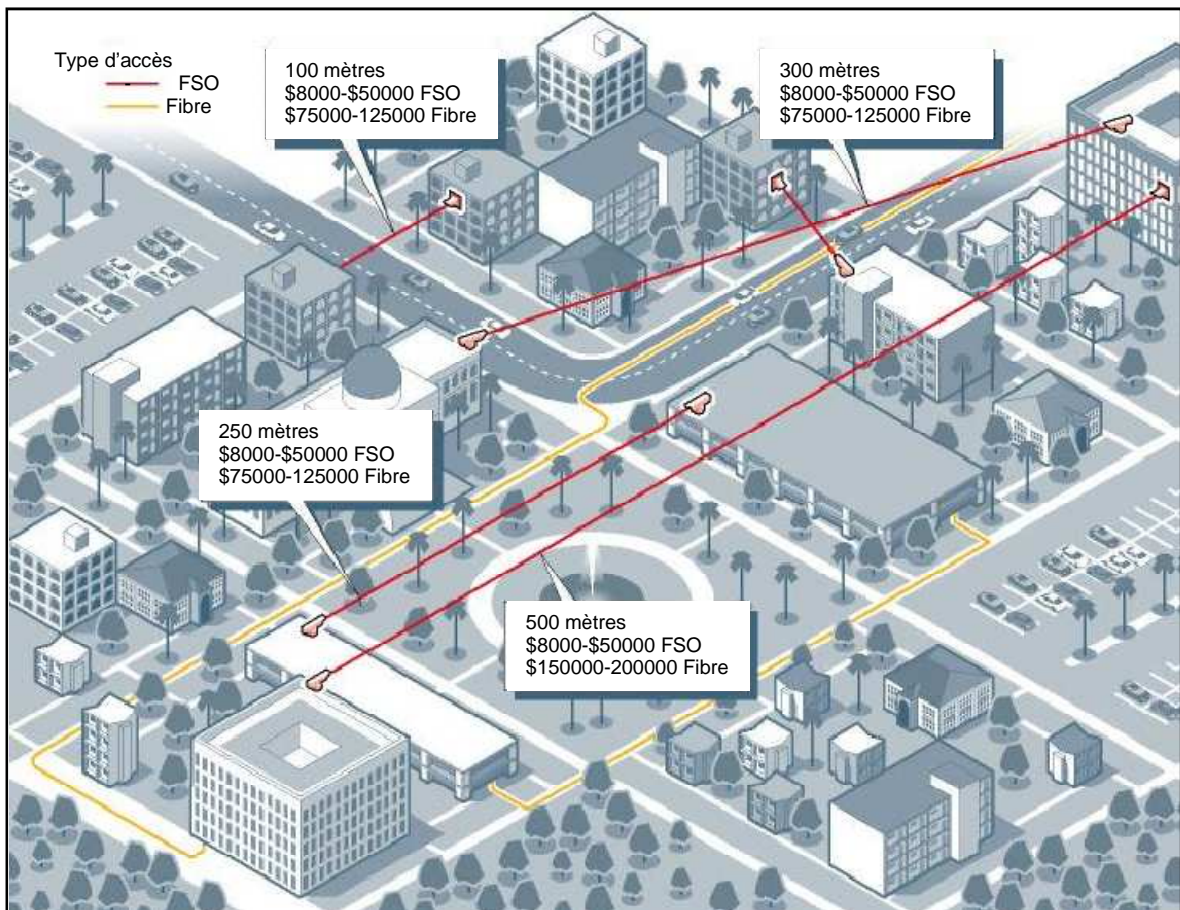
Concernant la technologie optique sans fil, et comme son nom l'indique, signifie la transmission de signaux optiques à travers l'air. Cette transmission optique nécessite l'utilisation des sources lumineuses, qui peuvent être soit des LEDs ou des diodes lasers. Le concept des liaisons FSO est similaire 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 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 épinés dorsales des réseaux. Pour les réseaux urbains, les liaisons FSO ont l'avantage d'être peu coûteuses, rapides et faciles d'installer, flexibles et peuvent être déployées dans tous les réseaux. A titre d'exemple la figure 1.5 et la figure 1.6 représentent une comparaison de coût du service d'accès fourni par les systèmes FSO (*Lightpoint*) et celui du service assuré par des fibres optiques pour une région urbaine et sur un campus [6].



**Fig. 1.5** Comparaison de prix du service d'accès fourni par les systèmes FSO (*Lightpoint*) et celui du service assuré par des fibres optiques dans une région urbaine



**Fig. 1.6** Comparaison de prix du service d'accès fourni par les systèmes FSO (Lightpoint) et celui du service assuré par des fibres optiques sur un campus.

#### 5.4 Technologie FSO Vs Technologie radio

La demande de disposer des réseaux d'accès locaux sans fil, des réseaux multimédia et des transmissions vidéo à des débits élevés est sans cesse croissante. Pour répondre à cette demande, 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 inclus le coût bas, la petite taille, et la consommation d'énergie limitée des composants optique 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 la radio et FSO continueront d'exploitation 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.

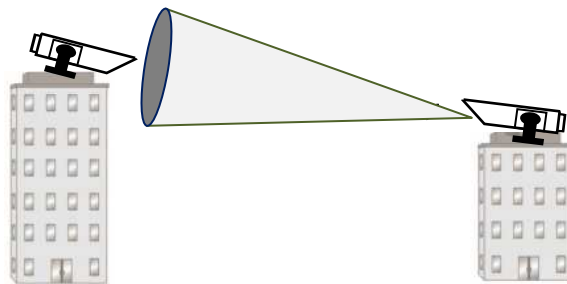
D'autre part, et pour une liaison permanente, il apparaît évident qu'en combinant les deux technologies dans un même réseau permet de garantir une liaison sans coupure avec débit dégradé, pour tous les temps. L'une prene le relais de l'autre en cas de coupure. Dans les régions qui se caractérisent par le brouillard dense, un lien RF de secours «*Back-up*» peut être incorporé pour avoir un système FSO-RF hybride [13] 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.

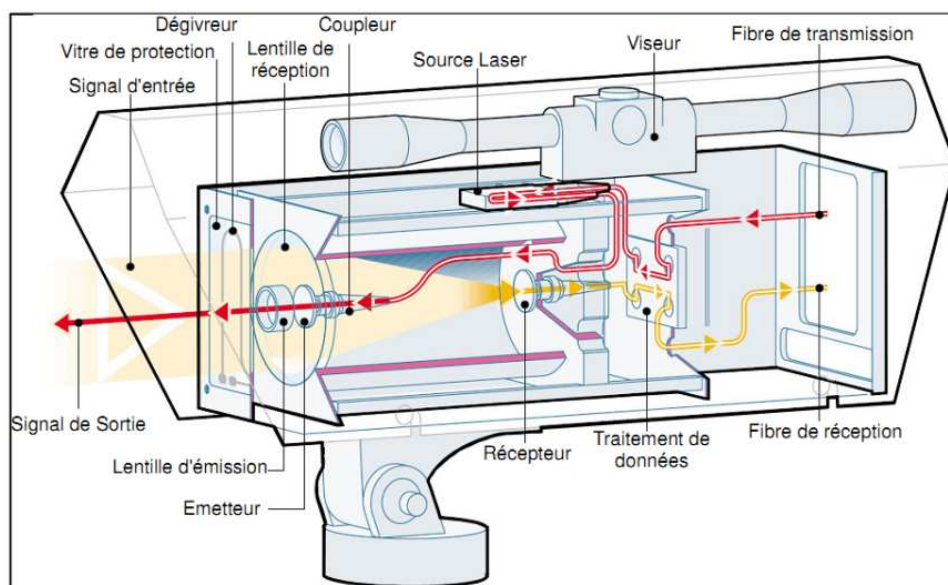
## 6. L'émission et la réception optique dans les systèmes FSO

Le schéma de principe d'un lien terrestre FSO typique est montré sur la figure 1.7. Comme toute autre technologie de communication, un système FSO comprend essentiellement les trois parties suivantes: l'émetteur, le canal et le récepteur. Chacun de ces blocs est présenté par la suite.



**Fig. 1.7** Schéma d'une liaison optique sans fil terrestre FSO

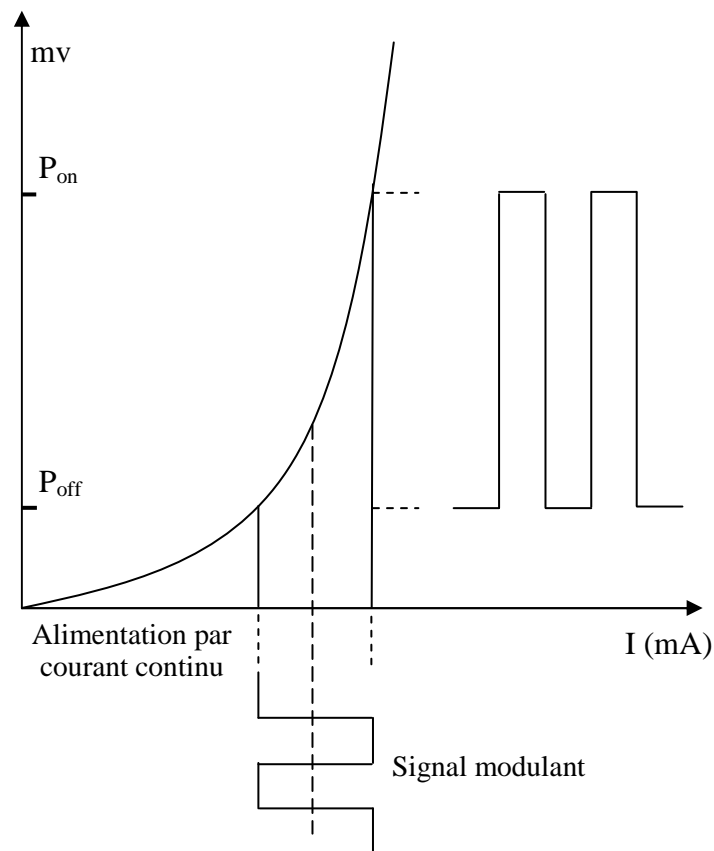
La plupart des équipements sont bidirectionnels (Full duplex) et associent dans le même coffret un émetteur à un récepteur. Certains systèmes gèrent plusieurs canaux de communication en multiplex. Les transmetteurs (Emetteur Récepteur) peuvent être situés sur un toit, sur un coin d'un bâtiment ou à l'intérieur derrière une fenêtre. La figure 1.8 montre un exemple typique d'une unité FSO de la société *LightPoint* [14] permettant à la fois la réception et la transmission de données.



**Fig. 1.8** Illustration d'une unité FSO émettrice réceptrice

## 6.1 L'émetteur FSO

Ce bloc fonctionnel a le rôle primordial de 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 (figure 1.9), ou via un modulateur externe [15].



**Fig. 1.9** Modulation directe par intensité

Les systèmes FSO disponibles dans le commerce utilisent des longueurs d'onde proche du spectre visible, autour de 850 et 1550 nm [16], 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 de 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.



Dans l'opération d'émission optique, le rayon envoyé par la source lumineuse passe à travers une série de lentilles (figure 1.8) qui sont utilisées pour contrôler la quantité de divergence du faisceau laser. La divergence d'un rayon lumineux varie entre quelques centaines de milli radians et quelques microradians. Par exemple pour une divergence de faisceau de 1 milli radiant, 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 1.7. 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 source optique 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.

### **6.1.1 Les diodes électroluminescentes (DEL)**

Les diodes électroluminescentes (DEL) sont des structures semi-conductrices émettant de la lumière. Due à leur puissance d'émission relativement faible, elle sont généralement utilisées dans des applications sur des courtes distances avec des besoins spectrale modérée, jusqu'à 155 Mbps [17], telle que les liaisons optique sans fil à l'intérieurs des bâtiments (*Indoor wireless optical communications* « IWOC »). L'avantage majeur des sources DEL est leurs vies extrêmement longues et le faible coût [18].

### **6.1.2 Les diodes Laser**

La diode laser présente des avantages significatifs pour les applications longue distance 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 de la rentabilité. La plupart de ces lasers sont également utilisés dans la fibre optique, par conséquent, la disponibilité n'est pas un problème.

Dans la plupart des cas, les lasers à semi-conducteurs 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.

### **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) [17].

D'autres facteurs qui influent sur l'utilisation d'une source lumineuse spécifique sont comme suit :

- Prix et disponibilité des composants ;
- Puissance de transmission ;
- Durée de vie ;
- Capacités de modulation ;
- Sécurité oculaire ;
- Dimensions physiques ;
- Compatibilité avec les autres moyens de transmission comme la fibre.

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) [19].

## **6.2 Le récepteur**

Ce bloc fonctionnel permet 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 entre autre) 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*) [20] 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. La complexité associées au pointant actif peut être évitée dans certaines applications (en particulier pour les liaisons courtes distances de débits de données inférieurs).

### 6.2.1 Les Photodétecteurs

En plus des sources de transmission optique, les détecteurs optiques sont aussi d'une grande importance dans la réalisation et le design 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 désirée. 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.

### **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.

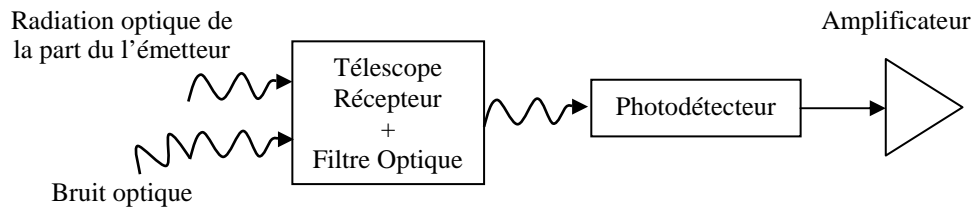
### **6.2.3 Techniques de photodétection**

La photodétection est le processus de conversion du rayonnement optique en un signal électrique dans le but 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 1.10.



**Fig. 1.10** Schéma de principe d'un récepteur de détection optique directe

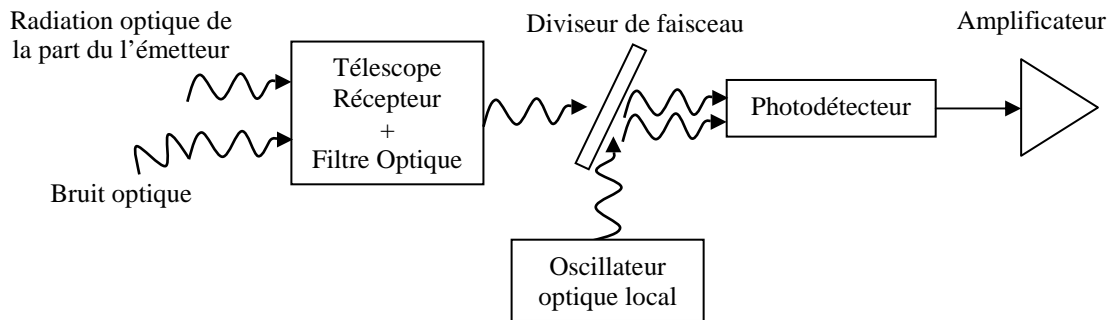
Les modulations multi-niveau (non binaire) compatible avec la détection directe permettent une amélioration considérable en termes d'efficacité spectrale (efficacité de l'utilisation de la bande passante).

### **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», crée 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 1.11.

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



**Fig. 1.11** Schéma de principe d'un récepteur de détection optique non directe (Cohérente)

### 6.3 Caractéristiques des équipements FSO

Actuellement, le nombre de constructeurs des équipements de télécommunications FSO est très important, 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 :

**La portée** : La portée de ce type de liaisons 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.

**La sécurité** : elle est représentée par la classe laser, c'est un facteur important à prendre en compte dans la conception ses systèmes de télécommunications optiques sans fil. Elle conditionne les modalités plus au 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 :

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

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

## 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 et 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, où 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

*Propagation du  
Rayonnement Laser  
dans L'atmosphère*

## 1. Introduction

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 optique sans fil offre des défis ne sont pas présents dans les réseaux qui se basent sur les fibres optique. 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 quantifiable, le plus grand défi inconnue est l'effet de l'atténuation atmosphérique (brouillard, pluie, neige...etc.), même une atmosphère propre et claire est composée de molécules d'oxygène, d'azote et d'autre gaz, et d'autres constituants peuvent exister en particulier dans les régions continentales polluées. Ces particules et molécules peuvent diffuser et/ou absorber les photons lumineux qui se propageant dans l'atmosphère, et par conséquent atténue le signal lumineux. Ce qui fait que la conception d'un système de télécommunications optique en espace libre, nécessite une bonne connaissance des propriétés optiques de l'atmosphère. 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 d'environnement. C'est aussi pourquoi l'industrie des systèmes FSO essaye de trouver des moyens pour compenser les effets indésirables introduites par les différents phénomènes atmosphériques et par l'illumination solaire intense par le choix approprié de la longueur d'onde et l'utilisation des solutions de secours à base des liaisons FH.

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 permettent 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, et permettre 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 de carbone ( $CO_2$ , de 0,01 à 0,1 %), présent dans de plus petites quantités [22]. Il ya 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 les éléments comprenant l'atmosphère et contribue aux phénomènes qui affect les rayons lumineuses, et donc une limitation de la portée.

L'atténuation atmosphérique est causée par un certain nombre de phénomènes sélectifs en longueurs d'onde [23]:

1. L'absorption moléculaire : Caractérisée par une forte dépendance spectrale,
2. La diffusion moléculaire,
3. L'extinction (absorption et diffusion) par les particules en suspension (aérosols) et en précipitation (pluie, neige...),
4. La turbulence atmosphérique due aux variations spatio-temporelle 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 optique laser en mettant l'accent sur les phénomènes physiques qui sont l'absorption, la diffusion et la turbulence optique.

## **2. Structure générale et composition 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 [24]:

1. La troposphère,
2. La stratosphère,
3. La mésosphère.

Dans le cas des télécommunications optiques atmosphériques, on s'intéresse particulièrement à la troposphère car c'est dans cette couche qu'est déployée la majorité des systèmes de communications basés sur les FSOL où se produit l'essentiel des phénomènes météorologiques, cette couche contient environ 75% de la masse atmosphérique de la terre [24].

La propagation du rayonnement optique dans l'atmosphère terrestre est influencée par :

1. Le mélange atmosphérique gazeux dû à la composition chimique de l'atmosphère,
2. La présence de petites particules en suspension de taille variable (0,01 à 100  $\mu\text{m}$  environ) [23], ce sont les aérosols,

3. Les hydrométéores tels que la pluie et la neige,
4. Les lithométéores tels que la poussière, la fumée et le sable,
5. Les variations spatio-temporelles de l'indice de réfraction de l'air, à l'origine, en particulier de la scintillation.

## 2.1 Composition gazeuse

Les constituants gazeux de l'atmosphère sont classés en deux catégories :

- 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 visible et l'infrarouge, jusqu'à 15  $\mu m$  et pour des transmissions atmosphériques au niveau du sol, seul parmi ces constituants, le  $CO_2$  présente des bandes d'absorption importantes.

- Les constituants à proportion volumique variable, sont minoritaires et leur concentration varie en fonction de :
  - ✓ la situation géographique (latitude, altitude, région continentale ou maritime),
  - ✓ l'environnement (urbain, rural ou maritime),
  - ✓ les conditions météorologiques.

Le principal constituant de cette catégorie est la vapeur d'eau ( $H_2O$ ). 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  $O_3$  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'ultra violet et dans l'infrarouge autour de la longueur d'onde de 9,6  $\mu m$ .

## 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  $\mu\text{m}$ . Leurs effets radiatifs directs se manifestent par des processus d'absorption et de diffusion des rayonnements solaires comme des autres types de rayonnements qui se propagent dans l'atmosphère.

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* [25]. La visibilité ( $v$ ) est un paramètre souvent utilisée comme un indicateur de cette concentration.

### **2.2.1. L'effet des aérosols sur la propagation dans l'atmosphère**

L'intensité de la diffusion et de l'absorption du rayonnement par les aérosols dépend de leurs caractéristiques physiques et chimiques et de la longueur d'onde du rayonnement incident. En particulier, les aérosols ont une grande influence sur la propagation des ondes visibles et infrarouge parce que leur dimension est voisine de la longueur d'onde, contrairement aux ondes radioélectriques (HF au millimétrique). 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 et sur le climat, la caractérisation de leur nature et de leur distribution constitue un défi auquel est confrontée actuellement la recherche atmosphérique. 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 et le déploiement de contre-mesures appropriées.

### 2.2.2 Sources et mécanismes de formation des aérosols

Il existe plusieurs sources de particules aérosolaires, nous distinguons :

1. 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 et celles produites par les feux de forêts,...
2. Les sources reliées à l'activité humaine qui produisent 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 :

1. Les aérosols primaires, c'est à dire émis directement dans l'atmosphère sous forme particulaire (cendres volcaniques, embruns marins, poussières désertiques, poussières industrielles,...).
2. 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 :

1. 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.
2. 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.
3. 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 et 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 [22].

### 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 2.1 [6]. D'autre part, ces effets sont toutefois différents selon le système utilisé : faisceaux hertziens, micro-ondes, 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 optique 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 optique sans fil sous l'effet du brouillard.

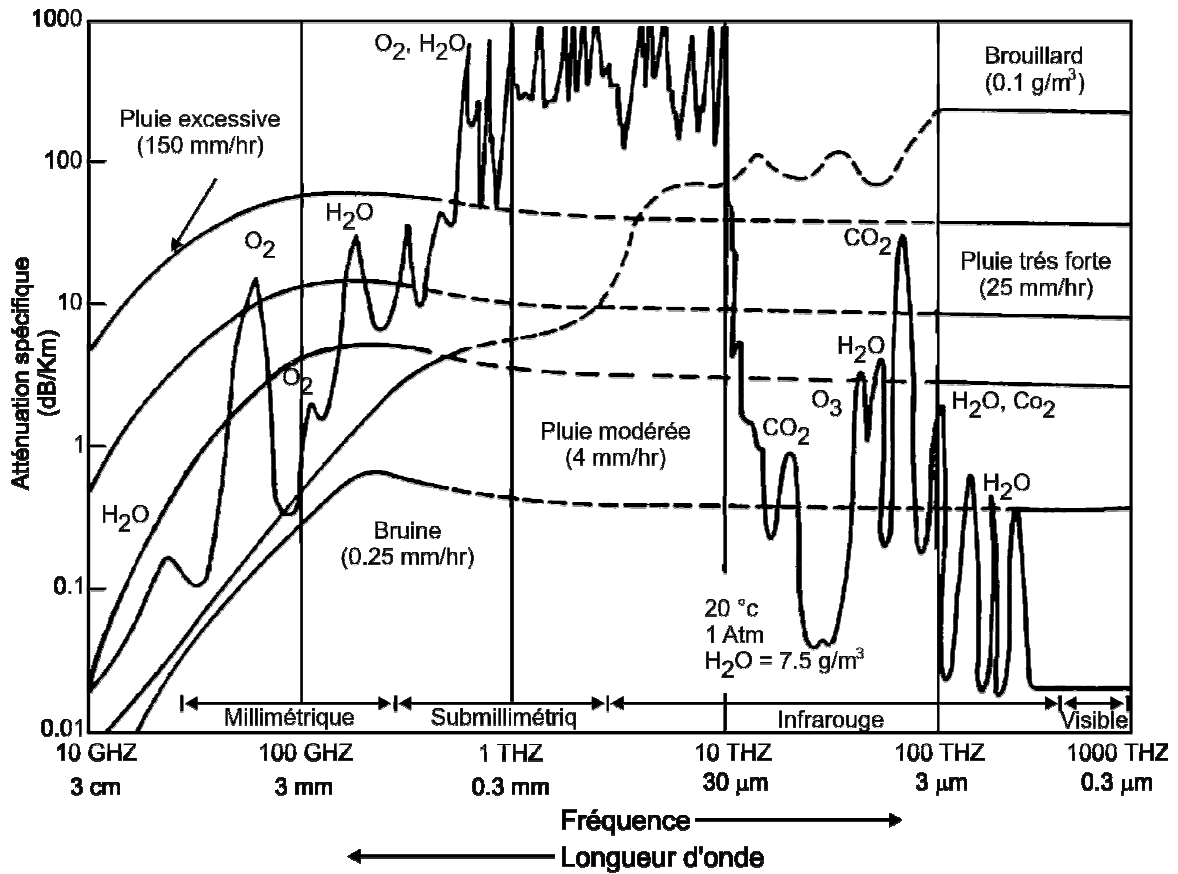


Fig.2.1 Spectre d'atténuation atmosphérique montrant l'effet de certains constituants de l'atmosphère sur l'atténuation ainsi que celui de la pluie et du brouillard.

### 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, le nombre de photons du rayonnement se réduit tout au long du parcours, ainsi que l'intensité du rayonnement.

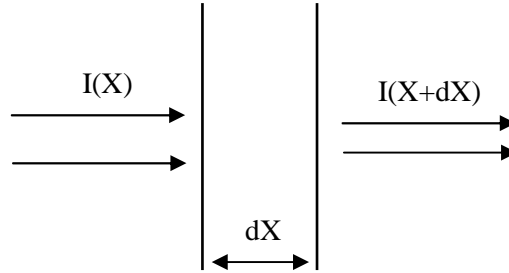
Considérons un faisceau lumineux de longueur d'onde  $\lambda$  qui traverse un milieu absorbant d'épaisseur  $dx$ . Du fait des propriétés absorbantes du milieu, le nombre des photons du rayonnement se réduit tout au long du parcours. Ainsi, l'intensité du rayonnement à la position  $x+dx$  (figure 2.2) s'écrit en fonction de l'intensité à la position  $x$  de la façon suivante [23]:

$$I(\lambda, x + dx) = I(\lambda, x) - dI_a(\lambda, x) \quad (2.1)$$

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  $(\lambda, x)$ .



**Fig. 2.2** 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 :

$$dI_a(\lambda, x) = \alpha(\lambda, x) I(\lambda, x) dx \quad (2.2)$$

Pour un parcours d'épaisseur  $X$  et à partir des deux équations (2.1) et (2.2) on peut écrire :

$$I(\lambda, X) = I(\lambda, 0) \exp \left[ - \int_0^X \alpha(\lambda, x) dx \right] \quad (2.3)$$

On définit alors la transmission spectrale du milieu :

$$\tau_a(\lambda, X) = \frac{I(\lambda, X)}{I(\lambda, 0)} = \exp \left[ - \int_0^X \alpha(\lambda, x) dx \right] \quad (2.4)$$

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

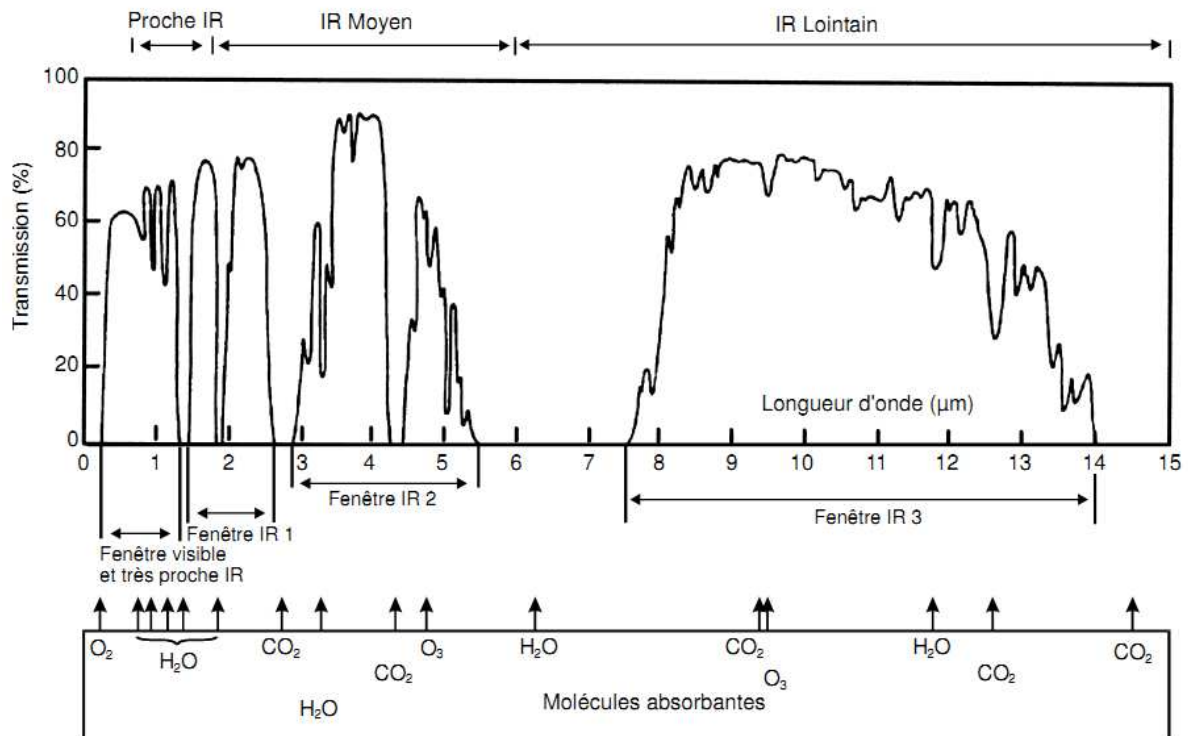
$$\tau_a(\lambda, X) = \exp[-\alpha(\lambda)X] \quad (2.5)$$

Les absorbants atmosphérique peuvent être classés en deux catégories générales: les absorbeurs moléculaires et les absorbeurs aérosolaire.

### 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 2.3 [26], 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.



**Fig. 2.3** Transmission à travers l'atmosphère terrestre en fonction de la longueur d'onde pour un trajet horizontal de 1800 m

Même s'il n'est pas possible de changer la physique de l'atmosphère, il est possible de profiter de fenêtres atmosphériques en choisissant les longueurs d'onde de transmission convenable. 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  $\mu\text{m}$  et 8-14  $\mu\text{m}$  [27]. 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 2.3 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<sub>2</sub>O) et de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) sont les molécules les plus absorbantes.

Les fenêtres de transmission dans la gamme optique sont [28]:

- Visible et IR très proche: de 0.4 à 1.4 μm
- Proche IR ou IR I: de 1.4 à 1.9 μm et 1.9 à 2.7 μm
- moyen IR ou IR II: de 2.7 à 4.3 μm et 4.5 à 5.2 μm
- IR loin ou IR III: de 8 à 14 μm
- Extrême IR ou IR IV: de 16 à 28 μm.

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:

$$\nu_0 = \frac{e_f - e_i}{h} \quad (2.6)$$

Où :  $\nu_0$  : est la fréquence de l'onde incidente  
 $h$ : est la constante de Planck.

### 3.1.2 Absorption aérosolaire

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 μm à particules géant de plus de 10,0 μm. Il a été déterminé que 80% de la masse d'aérosol est contenue dans le kilomètre le plus bas de l'atmosphère. Toutefois, ces particules absorbent également dans les longueurs d'onde infrarouges. Par exemple, le carbone et le fer ont des raies d'absorption de nombreux raies, mais leur abondance dans l'atmosphère est généralement limitée.

### 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 mesuré à la position  $x+dx$  s'écrit en fonction de l'intensité mesurée à la position  $x$  par (2.1). Comme le cas de l'absorption, pour un parcours d'épaisseur  $X$  et à partir des deux équations (2.1) et (2.2) on peut écrire :

$$I(\lambda, X) = I(\lambda, 0) \exp \left[ - \int_0^X \beta(\lambda, x) dx \right] \quad (2.7)$$

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

On définit alors la transmission spectrale du milieu par:

$$\tau_a(\lambda, X) = \frac{I(\lambda, X)}{I(\lambda, 0)} = \exp \left[ - \int_0^X \beta(\lambda, x) dx \right] \quad (2.8)$$

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** [29].
- 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** [29].
- 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 optique 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.

### 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, et affecte principalement les longueurs d'onde ultraviolettes et les longueurs d'onde visibles.

### 3.2.2 Diffusion de Mie

Le régime 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, des 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) [30]. 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 présentée, cette méthode est basée sur la visibilité plutôt que sur les propriétés des particules, qui ne sont pas toujours

connus. Dans le domaine visible et proche infrarouge, le coefficient de diffusion moléculaire  $\beta_m$  est négligeable devant le coefficient de diffusion aérosolaire [31].

A partir du paramètre de visibilité, qui peut être obtenu à partir des stations météorologiques ou des aéroports, une formule simplifiée empirique [28] utilisée dans la communauté FSO pour une longue période pour calculer le coefficient d'atténuation due à la diffusion de Mie est donnée par :

$$\beta_\lambda = \frac{10 \log_{10}(T_{th})}{V} \left( \frac{\lambda}{\lambda_0} \right)^{-q} \quad (2.9)$$

Où  $v$  : la visibilité,

$\lambda$  : la longueur d'onde,

$T_{th}$  : le seuil visuel.

Le coefficient  $q$  a fait l'objet de nombreux travaux expérimentaux. Il a été établi empiriquement par Kruse et al [28].

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

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 (2.9) 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 [28] propose une autre expression pour le paramètre  $q$ , donnée par:

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

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.

Visibilité (Km)	Atténuation (dB/km) Pour $\lambda=800nm$	Atténuation (dB/km) Pour $\lambda=1500nm$
0.5	32.5	30.8
0.7	23	21
0.9	18	16
1.1	14.5	12.5
1.3	12	10
1.5	10	8.33

**Tab. 2.2** Atténuation atmosphérique due à la diffusion basée sur la visibilité

Certaines valeurs de l'atténuation atmosphérique due à la diffusion basées sur la visibilité sont présentées dans le tableau 2.2.

### 3.3 L'extinction atmosphérique

Lors de sa propagation à travers l'atmosphère, le rayonnement électromagnétique subit une dégradation qui peut être très importante et qui est liée à son interaction avec les molécules de gaz et par 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 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 :

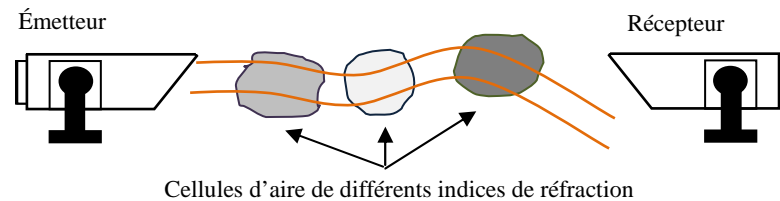
$$\tau(\lambda, X) = \exp \left[ - \int_0^X \gamma(\lambda, x) dx \right] \quad (2.13)$$

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 [32].

### 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.



**Fig. 2.4** Cellules d'air avec différents indice 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 (figure 2.4) 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 [33].

La méthode de calcul de l'atténuation due à la turbulence, le brouillard, la pluie et la neige seront évoquées dans le dernier chapitre.

## 4. Conclusion

Afin de répondre aux besoins croissants en matière de télécommunications à haut débit et à faible coût, on assiste, depuis quelques années, à un certain regain d'intérêt pour les liaisons optiques FSO. 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 est d'une grande importance lors de la conception de l'émetteur et de 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

*Présentation et étude de  
performance des modulations  
OOK, PPM et MPM sous un  
brouillard contrôlé*

## 1. Introduction

Le choix du format de modulation est l'un des facteurs principaux dans la réalisation d'un système de communication de haute performance à un coût raisonnable et complexité acceptable. En raison de la complexité et du coût des techniques de modulation cohérente comme la modulation de phase ou de fréquence [34], 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) [35], également appelée détection « non-cohérente ». Les systèmes de modulation (IM / DD) sont plus simples et moins chers que les systèmes de la 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 nécessaire par une technique de modulation 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 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 (paramètre de normalisation de l'exigence en puissance).

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.

## 2. La Modulation OOK « On-Off Keying »

OOK (*On-Off Keying*) est la modulation la plus simple et la plus utilisée dans les systèmes de communication optique sans fil commercialisés [36] 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 « slot ». La séquence d'informations binaires peut être directement encodée en une suite d'impulsion lumineuse 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 (figure 3.1).



Fig. 3.1 La modulation OOK du message 10011010

Le débit atteint par cette méthode de modulation est noté  $D=1/T_b$ , 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 ya une variante de OOK [37], 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.

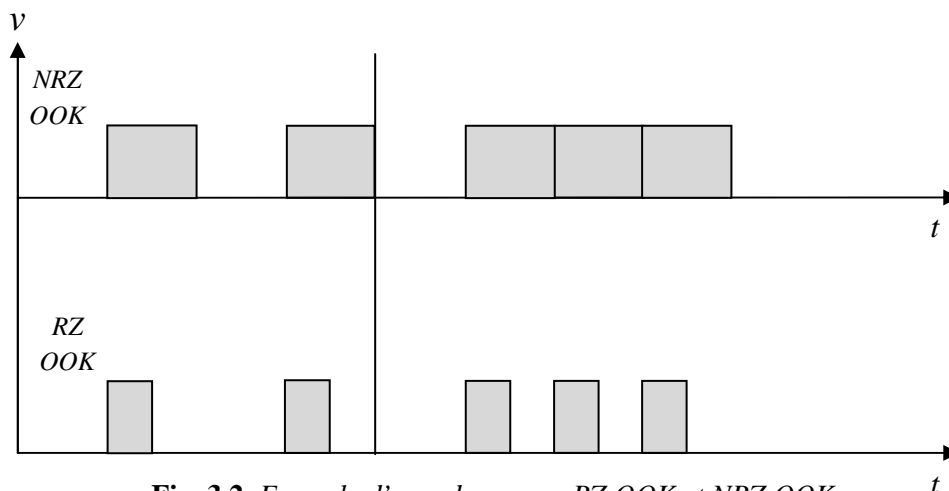


Fig. 3.2. Exemple d'encodage avec RZ OOK et NRZ OOK

Toutefois, comme  $\beta$  diminue, le besoin en bande passante augmente et la puissance requise diminue. Pour  $\beta=0,5$ , ce mode est appelé communément « RZ Retour à Zéro » OOK RZ, (figure 3.2). 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 optique sans fil, la modulation OOK ne peut pas être le meilleur choix pour les futurs systèmes optique 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. La modulation PPM “Pulse Position Modulation”

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 possible, 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  $T$  seconds.

L'enveloppe PPM est donnée par :

$$P(t) = \begin{cases} 1 & \text{pour } t \in [(m-1)T_s, m.T_s] \\ 0 & \text{si non} \end{cases} \quad (3.1)$$

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.



**Fig. 3.3** La modulation 8-PPM du message 101

**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 », (figure 3.3).

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

$$T_s = \frac{T_b \log_2 M}{M} \quad (3.2)$$

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 schéma 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 [38] :

$$\frac{P_{ppm}}{P_{ook}} = \sqrt{\frac{2}{M \log_2 M}} \quad (3.3)$$

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 3.1:** L'efficacité spectrale est définie comme le nombre de bits pouvant être transmis dans une largeur de 1 Hz de bande passante.

On défini la fonction «  $\eta$  » comme étant l'efficacité spectrale, elle est donnée par  $D/B$ , où  $D$  et  $B$  sont le débit et la bande passante, respectivement.

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:

$$\eta_{\text{ppm}} = \frac{D}{1/T_s} \quad (3.4)$$

En utilisant la formule (3.2) et en remplaçant  $D$  par  $1/T_b$ , alors l'efficacité spectrale de la modulation PPM sera:

$$\eta_{\text{ppm}} = \frac{\log_2 M}{M} \text{ bit/s/hz} \quad (3.5)$$

Le récepteur PPM doit traiter  $2^b$  intervalles de temps (slots) en  $b.T_b$  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 potentiel alternative à la méthode PPM ; la modulation MPPM sera étudiée par la suite.

#### 4. La modulation MPPM “Multi-pulse Pulse Position Modulation”

La modulation MPPM, proposée par *Sugiyama* et *Nosu* [39], appelée aussi (*Combinatorial PPM*) [40] 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 tableau (3.1) représente un exemple d'encodage des modulations PPM et 2MPPM pour les différents cas d'une séquence à trois bits.

<i>OOK</i>	<i>PPM</i>	<i>MPPM</i>
000	00000001	00011
001	00000010	00101
010	00000100	01001
011	00001000	10001
100	00010000	00110
101	00100000	01010
110	01000000	10010
111	10000000	01100

**Table. 3.1** Encodage d'une série de trois bit à PPM et à 2MPPM.

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

$$L_{\text{MPPM}} = \binom{M}{w} = \frac{M!}{w!(M-w)!} \quad (3.6)$$

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 3.2:** Un code-book  $A(M, w)$  est l'ensemble des symboles créés par la combinaison du  $M$  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 possible (selon la relation 3.6). L'encodage compatible le plus proche est sur 64 symboles au lieu des 66 possibles ( $2^6=64$ ).

**Définition 3.3 :** 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 3.4 :** 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 :

$$\xi_{\text{PPM}} = \log_2 M / \text{ph} \quad (\text{bit/photon}) \quad (3.7)$$

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

$$\xi_{\text{MPPM}} = \log_2 L / \text{ph} \quad (\text{bit/photon}) \quad (3.8)$$

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 3.4 illustre les conditions de comparaison.

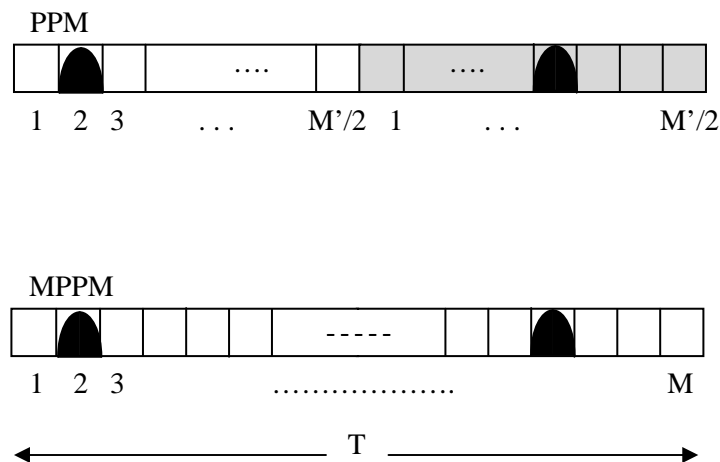


Fig. 3.4 Le principe de réduction de la bande passante

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

$$I_{\text{PPM}} = \log_2 (M'/2)^2 \quad (3.9)$$

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

$$I_{\text{MPPM}} = \log_2 \binom{M}{2} \quad (3.10)$$

Si le nombre de bits transmis par PPM ( $I_{\text{PPM}}$ ) est égale au nombre de bits transmis par MPPM ( $I_{\text{MPPM}}$ ), 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 :

$$(M'/2)^2 = M(M-1)/2 \quad (3.11)$$

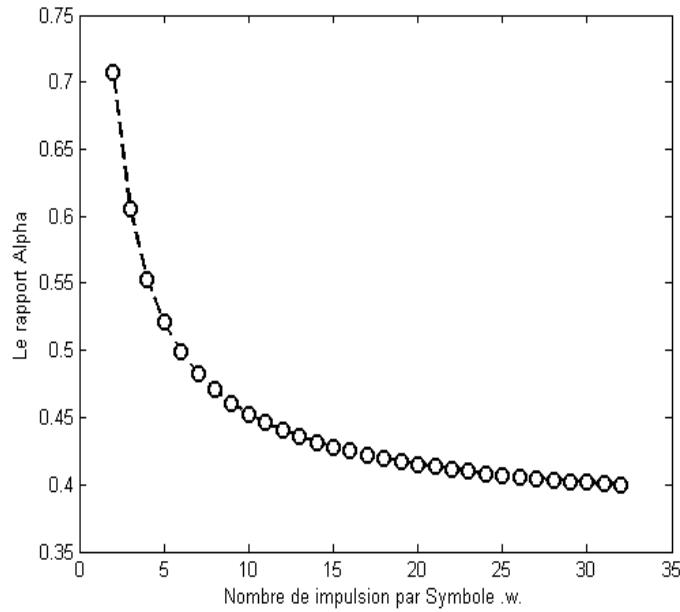
Généralement  $M \gg 1$ , et donc

$$\frac{M'}{\sqrt{2}} = M \quad (3.12)$$

Où  $M'$  et  $M$  sont le nombre de slots correspondant à PPM et MPPM, respectivement, 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 :

$$M = (\sqrt[w]{w!} / w) / M' \quad (3.13)$$

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 3.5. Comme le montre la 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.



**Fig. 3.5** L'effet de réduction de la bande passante par MPPM

L'exigence moyenne en puissance de MPPM normalisée à OOK est donnée par [38] :

$$\frac{P_{\text{MPPM}}}{P_{\text{OOK}}} = \frac{2w}{\sqrt{Md \log_2 L_{\text{MPPM}}}} \quad (3.14)$$

Où  $d$  est la distance de Hamming.

**Définition 3.5 :** La distance de Hamming est une distance au sens mathématique du terme, elle permet de quantifier la différence entre deux symboles,

*Exp:* La distance de Hamming entre  $10\underline{1}1\underline{1}01$  et  $10\underline{0}1\underline{0}01$  est 2 [41].

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 :

$$T = T_b \cdot \log_2 \left( \frac{M}{w} \right) \quad (3.15)$$

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

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

L'efficacité spectrale de MPPM est donnée par :

$$\eta_{\text{MPPM}} = \frac{D}{1/T_s}$$

On remplace  $T_s$  par sa formule (3.16) et  $D$  par  $1/T_b$ , alors l'efficacité spectrale de la modulation MPPM sera donnée par :

$$\eta_{\text{MPPM}} = \frac{\log_2 \left( \frac{M}{w} \right)}{M} \text{ bit/s/hz} \quad (3.17)$$

## 5. Comparaison et discussion

Dans le domaine des télécommunications optique 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 voir les points de force de chaque technique de modulation.

### 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 :

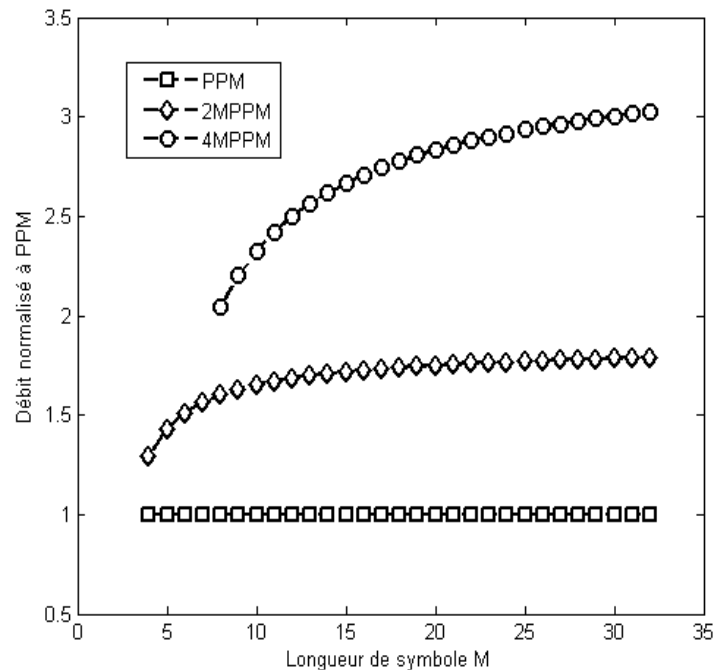
$$D = \frac{\log_2 M}{T} \text{ (bit/s)} \quad (3.18)$$

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.

$$R = \frac{D_{\text{MPPM}}}{D_{\text{PPM}}} = \frac{\log_2 L}{\log_2 M} \quad (3.19)$$

La figure 3.6 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.



**Fig. 3.6** L'amélioration en débit de MPPM par rapport à PPM pour  $w = \{2,4\}$  et pour différentes valeurs de  $M$

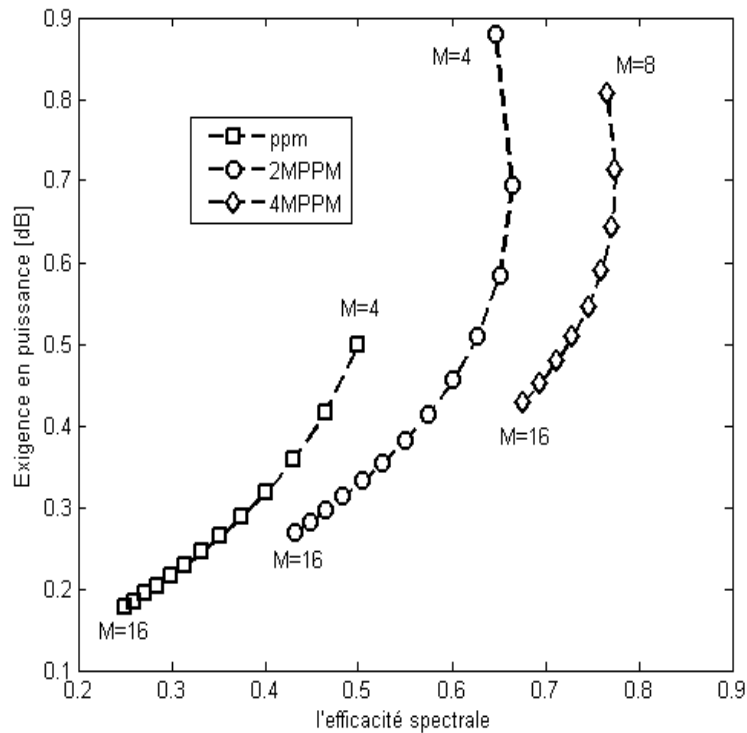
## 5.2 Exigence en puissance et efficacité spectrale de PPM et de MPPM

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'est pas d'intérêt particulier dans les communications optique sans fil, car elles fonctionnent sur un spectre non réglementée, l'efficacité spectrale est reliée à la vitesse des composants optoélectronique nécessaire 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 seulement 10 %, ce qui montre que la PPM souffre d'une faible efficacité en bande passante.

La figure 3.7 présente l'exigence en puissance normalisée en fonction de l'efficacité spectrale pour PPM, 2MPPM et 4MPPM.

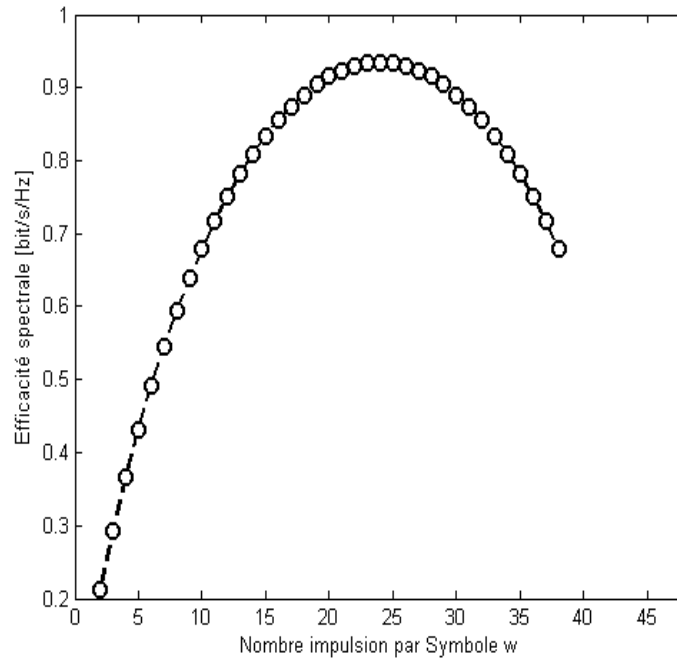


**Fig. 3.7** Efficacité spectrale de PPM et MPPM en fonction du nombre de slots par symbole ( $M$ )

D'après la figure 3.7, 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'impulsion 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  $M$ , avec un comportement différent. MPPM présente une plus grande exigence en puissance que PPM, et elle s'augmente encore plus avec le nombre d'impulsion par symbole  $w$ .

Pour montrer l'effet de l'augmentation du nombre d'impulsion sur l'amélioration de l'efficacité spectrale, on présente la figure 3.8 qui donne l'efficacité spectrale pour différentes valeurs de  $w$ , avec  $M=48$ .



**Fig. 3.8** L'efficacité spectrale de MPPM pour différentes valeur de  $w$ , où  $M=48$

D'après la figure 3.8, 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'impulsion  $w$ .

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

Les caractéristiques de la modulation, à savoir, la période, le cycle de travail «  $Dc$  », 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).

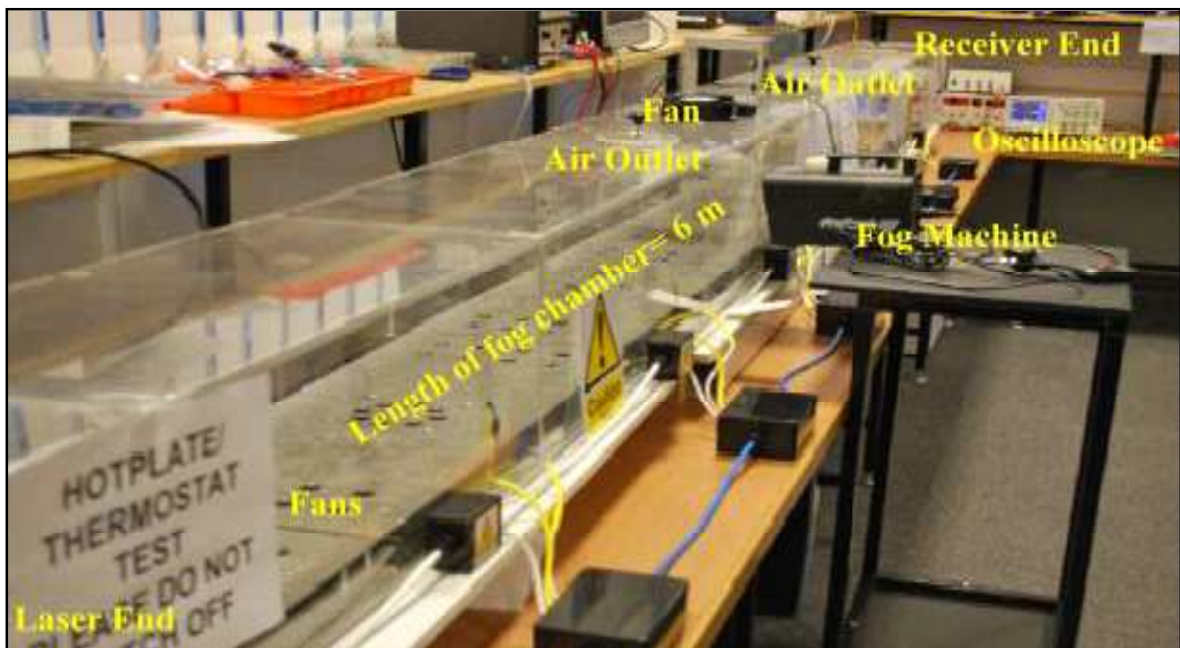
Le brouillard est la principale source d'atténuation dans l'atmosphère, et pourrait considérablement réduire la disponibilité des liaisons FSO. Cette atténuation varie de 0,2 dB/km pour un temps clair à 130 dB/km et 480 dB/km pour le brouillard continental modéré et le brouillard dense maritime, respectivement [42].

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 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 c'est le cas des études réels.

## 6.1 Mise en place de l'expérience

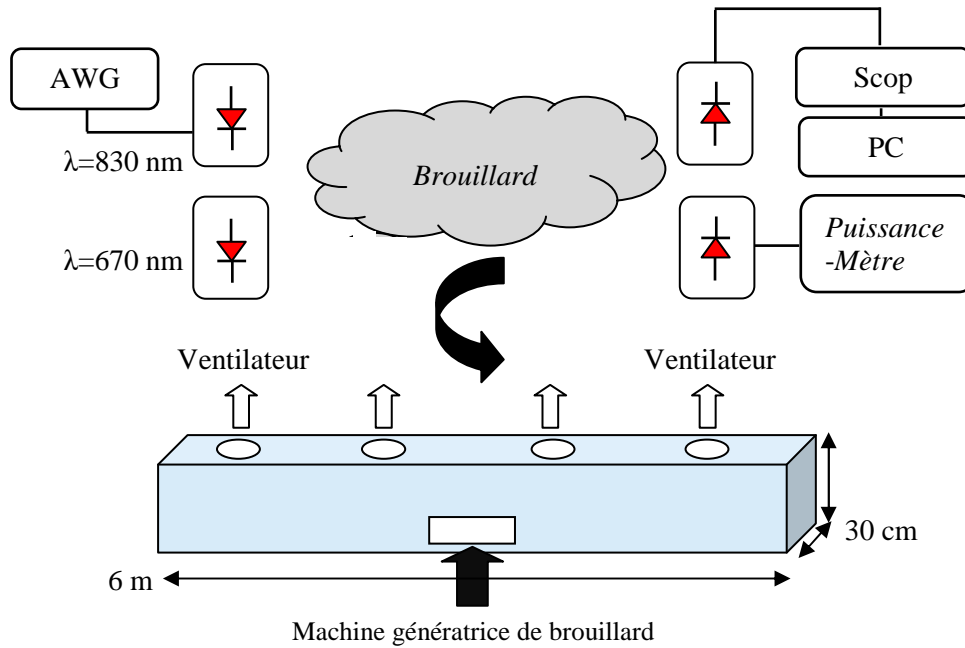
L'expérience a été réalisée au sein du laboratoire du groupe de recherche de la communication optique « NCL », Ecole de l'Informatique, Ingénierie et Sciences de l'Information de l'université de Northumbria, Newcastle, Angleterre [43].



**Fig. 3.9** Le dispositif FSO expérimental

Le système FSO utilisé dans l'expérience est représenté sur les figures 3.9 et 3.10. Le canal FSO est déployé sur une chambre de verre fermée de dimensions de  $600 \times 30 \times 30$  cm<sup>3</sup> 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.

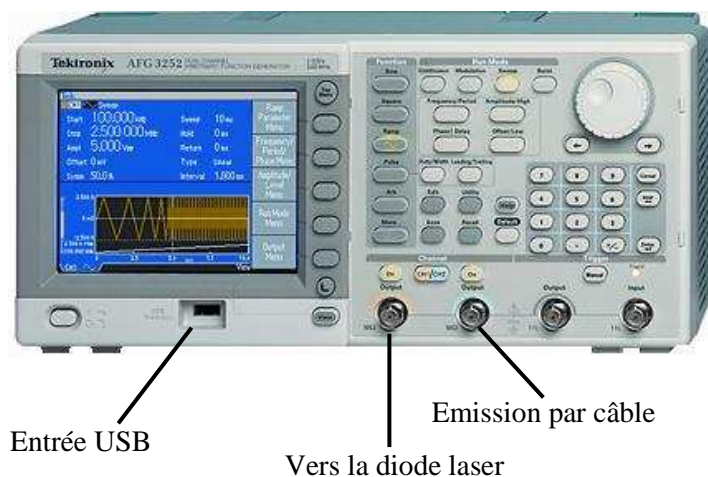




**Fig. 3.10** Bloc diagramme du montage expérimental

L'émetteur est constitué de deux sources laser, l'une émettant à 670 nm 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, 4-PPM 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.



**Fig. 3.11** Le générateur de signaux utilisé

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. Les paramètres de configurations principales sont résumés dans le tableau 3.2.

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 de données automatique 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.

	Paramètre	Valeur
<b>Diode Laser</b>	Longueur d'onde	830 nm
	puissance optique maximale	10mW
	Classe	III b
	Surface du rayon au niveau de récepteur	5 <sub>mm</sub> × 2 <sub>mm</sub>
	Angle de divergence	5 mrad
	DC voltage	5.5V
	Bande passante de modulation	75 MHz
<b>Photodétecteur</b>	Longueur d'onde au sensibilité maximale	900 nm
	Gamme Spectrale de sensibilité	750 - 1100
	Surface actif	1 mm <sup>2</sup>
	Demi-Angle de champ de vision	75 Deg
<b>Lentille</b>	Diamètre	25 mm
	Focale	200 mm

**Tab. 3.2** Paramètres de configurations principales de la liaison

## 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) [44]. 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 [45]. 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 [46]. 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 [44]:

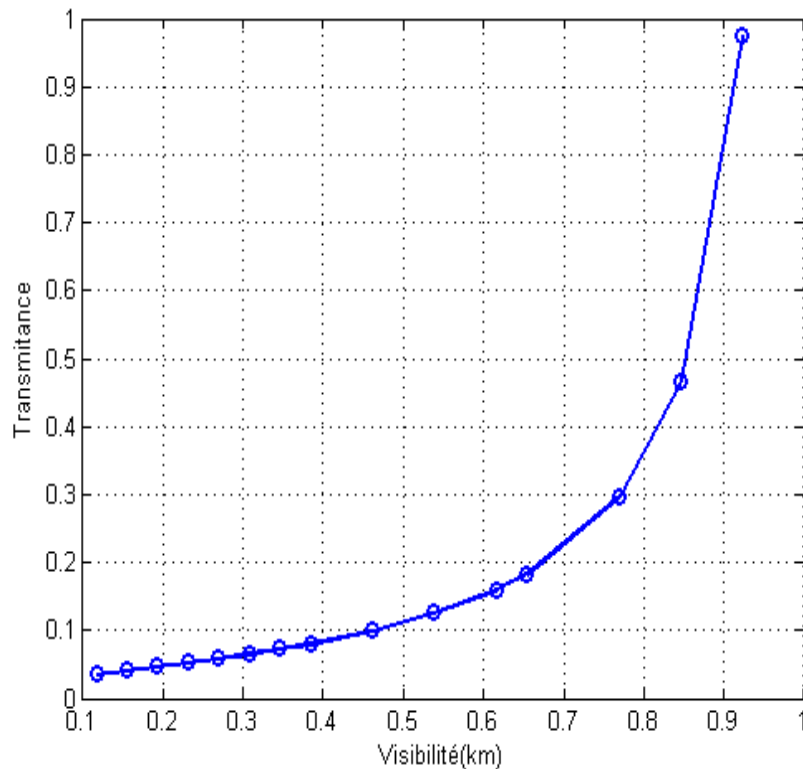
$$V = \frac{10 \log_{10}(T_{th})}{\beta_{\lambda}} \quad [\text{dB/km}] \quad (3.20)$$

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

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 [44] :

$$T = \frac{I(f)}{I(0)} = \exp(-\beta_{\lambda}z) \quad (3.21)$$

Où  $z$  est la longueur de propagation et  $I(f)$  et  $I(0)$  sont les moyennes des intensités optiques reçues en présence et en absence de brouillard, respectivement. La visibilité pour différentes intensités de brouillard (Tab.3.3 [47]) en fonction de la transmittance mesurée dans notre expérience est illustrée sur la figure 3.12



**Fig. 3.12** Transmittance en fonction de la visibilité, jusqu'à 1 km

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

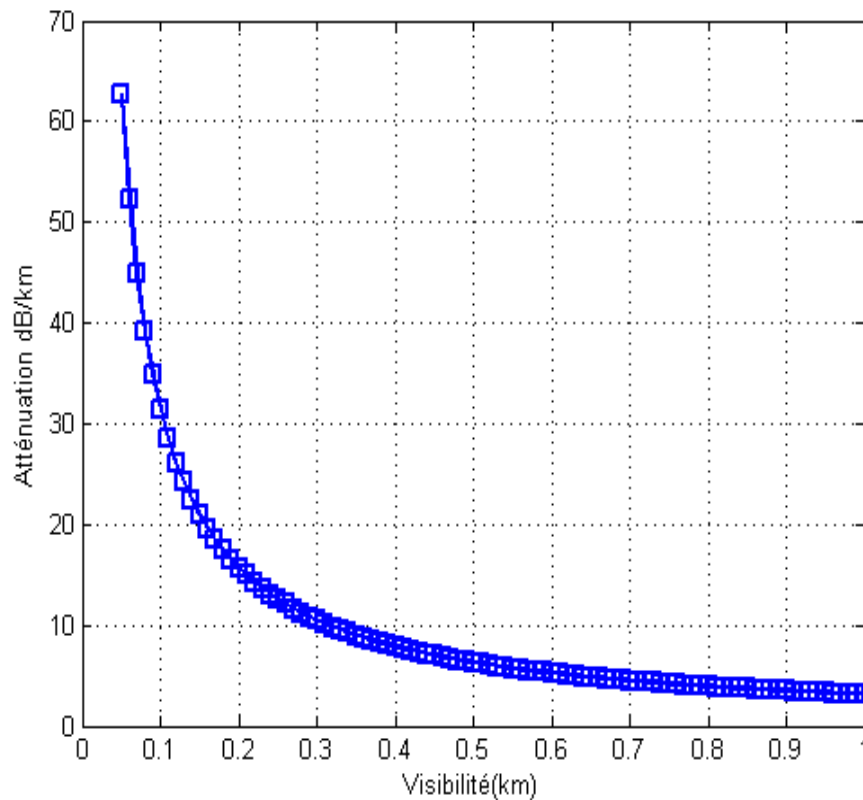
**Tab. 3.3** Transmittance pour différentes valeurs de visibilité

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 (2.9).

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. La figure montre que pour une visibilité de moins de 50 m, l'atténuation est proche de 64 dB/Km, ce

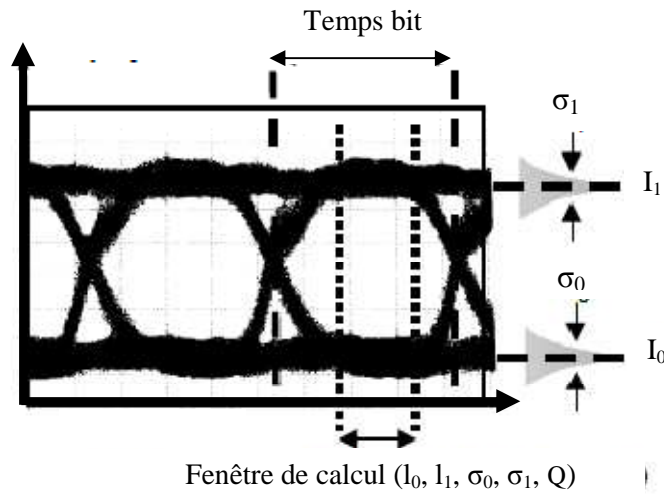
qui est considérablement influent sur la marge brute d'une liaison, et par conséquent sur la distance de déploiement d'une liaison FSO.



**Fig. 3.13** L'atténuation en fonction de la visibilité

### 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.



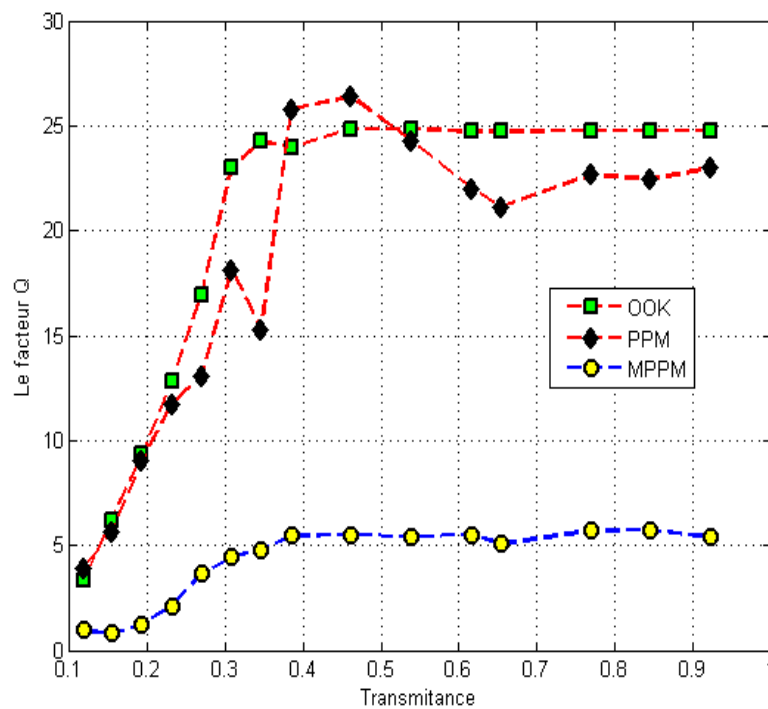
**Fig. 3.14** Diagramme de l'œil

Le facteur de qualité  $Q$  qui représente le rapport signal/bruit au niveau du récepteur est donné par [48]:

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (3.22)$$

Il est à noter que le facteur de qualité dépend des niveaux moyens. Il diminue d'autant plus que le signal transmis est atténué.

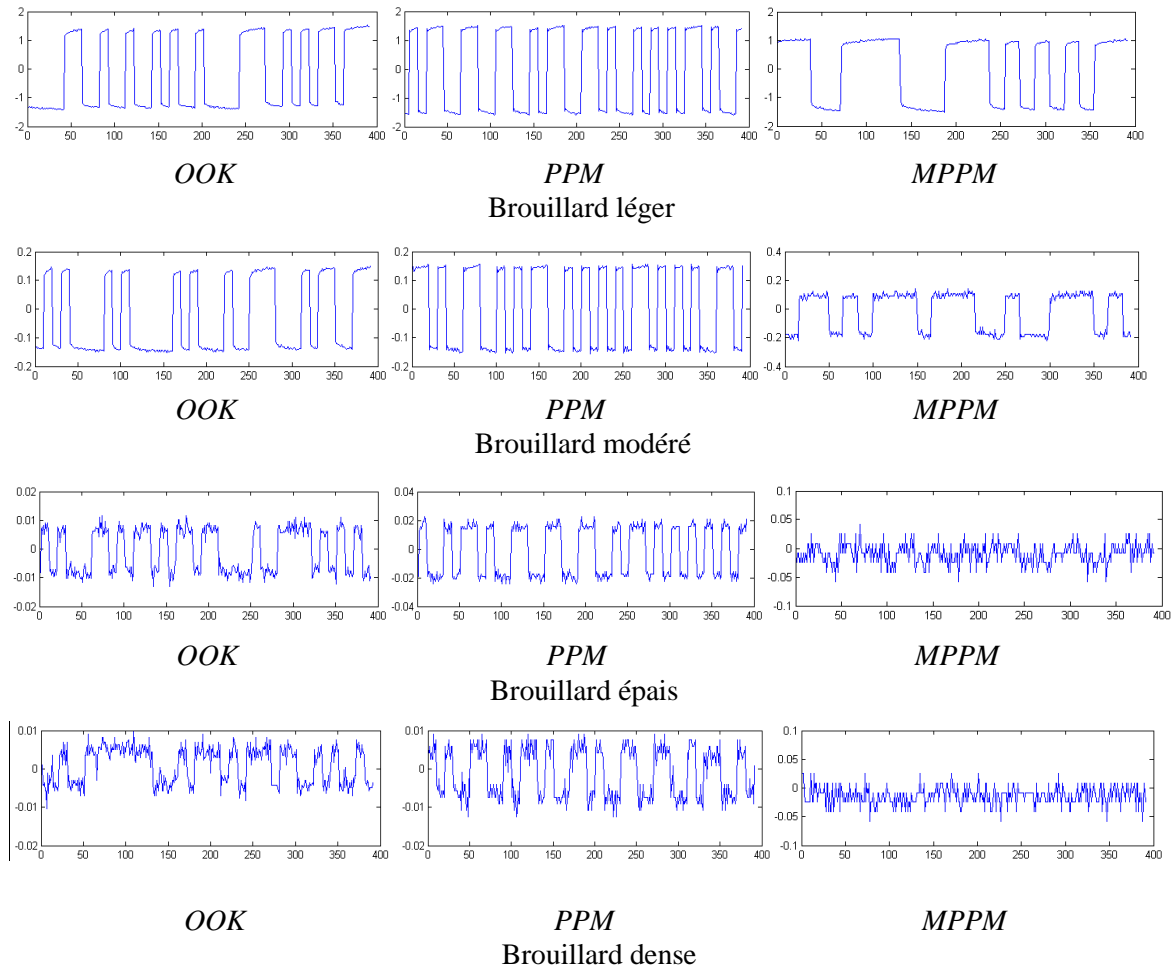
La figure.3.15 présente le facteur de qualité calculé dans notre expérience en fonction de la transmittance, pour les modulations OOK, PPM et MPPM.



**Fig. 3.15** Le facteur de qualité 'Q' en fonction de la transmittance

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

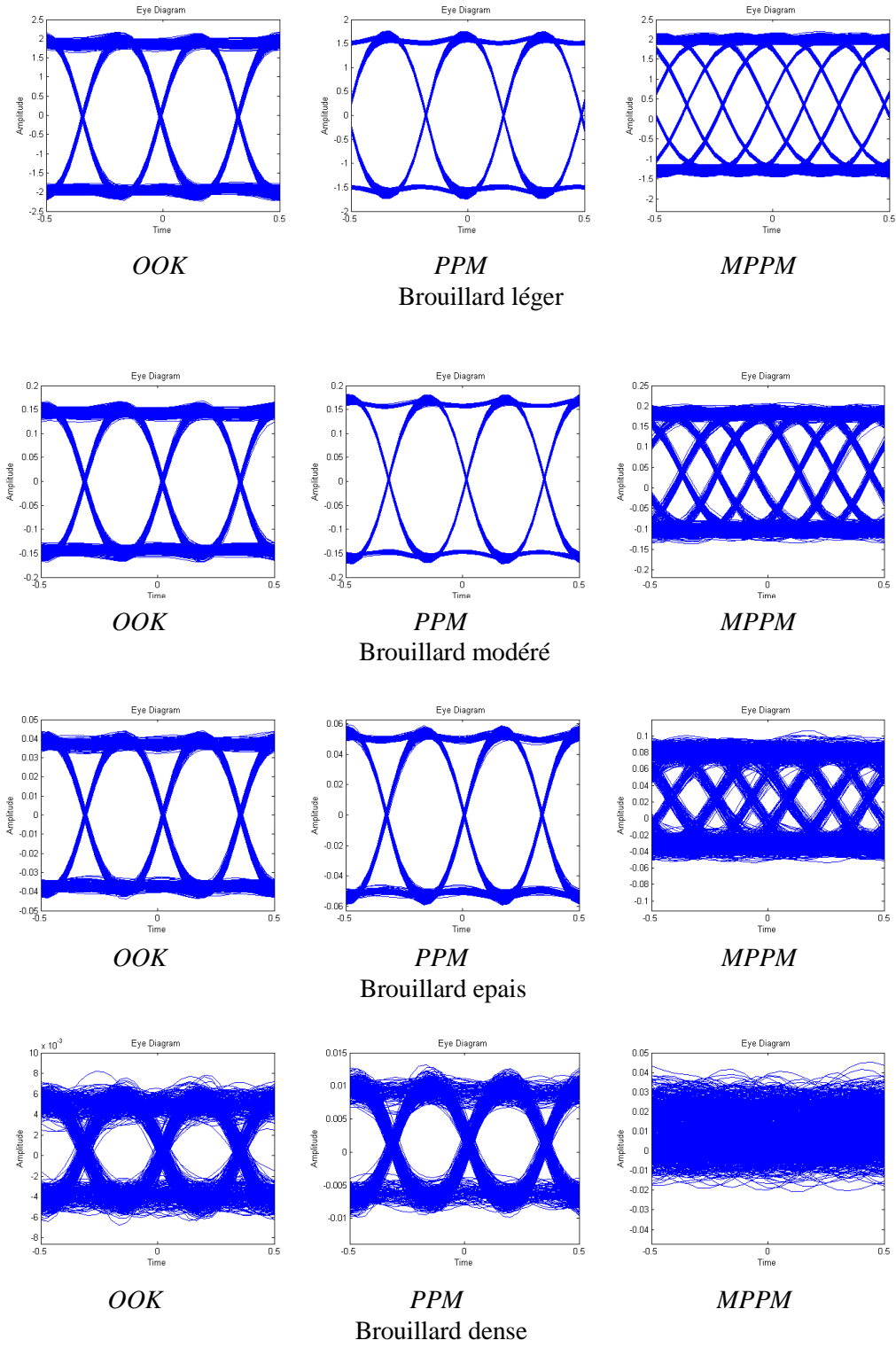
Les signaux reçus à travers les modulations OOK, PPM et MPPM sous différentes intensités de brouillard sont présentés sur la figure 3.16



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

La figure 3.16 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 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.



**Fig. 3.17** Les diagrammes de l'œil de OOK, PPM et MPPM au niveau de réception sous 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 pas des impulsions, et PPM exige 24 slots dont 6 sont occupées pas 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 mesuré pour les différentes modulations OOK, PPM et MPPM sous différentes intensités de brouillard (Claire, Modéré, Epais et Dense) sont présentés dans le tableau 3.4.

Brouillard	Taux d'erreur			
	Claire	Modéré	Epais	Dense
OOK	0	0	0	0
4-PPM	0	0	0	0
2MPPM	0	0	$4,5 \cdot 10^{-4}$	0,4

**Tab. 3.4** Les taux d'erreur mesuré 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 ne 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 (0,4) dans le cas du brouillard dense. Ces résultats confirment que l'utilisation de plusieurs impulsions dans une période 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'augmentant 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.

## 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 compatible 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 lesquels 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 tout en gardant les avantages de cette modulation.

*Chapitre*

4

*Modulations hybrides  
pour les futurs Systèmes  
FSO*

## 1. Introduction

L'un des paramètres principaux dans la conception des systèmes de communications optique sans fil est le choix approprié de type de modulation. 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 (*Pulse Position Modulation*) est une méthode de modulation populaire dans les systèmes de communication optique 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 (*Multi-Pulse Pulse Position Modulation*) a été proposée, cette dernière réduit la bande passante de transmission requise d'environ moitié 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'information 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 *Multiple Level Modulation* (PAM) et *Multi-pulse Pulse Position Modulation* (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. Le deuxième système de modulation combine les modulations MPPM et PWM (*Pulse Width Modulation*) donnant MPDWM (*Multi Pulse Dual Width Modulation*). On va présenter les expressions de l'efficacité en puissance, l'efficacité spectrale, le débit normalisé, et des résultats de comparaison de MPDWM avec MPPM, puis on va faire une comparaison générale entre les deux modulations hybride développées PAM-MPPM et PWM-MPPM. Pour atteindre une amélioration considérable en termes de débit, on va présenter *Multi-*

*Pulse Dual Amplitude-Width Modulation* (MPDAWM) comme autre modulation hybride, sur la base de MPPM, PAM et PWM.

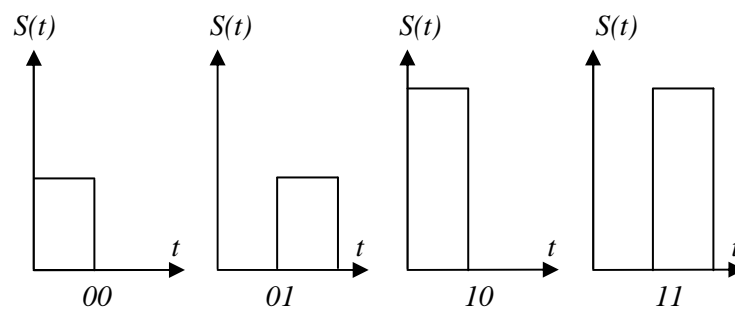
Dans la dernière section de ce chapitre on va présenter une autre modulation hybride : DPIM (Digital Pulse Interval Modulation) combiné avec PAM et PWM.

## 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.

### 2.1 La modulation PAM

La plupart des systèmes de communication optique 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.



**Fig. 4.1** Exemple d'encodage PAM

Les modulations Multi-Niveaux et en particulier la PAM (*Pulse Amplitude Modulation*) portent l'information à travers l'amplitude des impulsions (figure 4.1). Ce type de modulations est assez puissant en termes d'efficacité spectrale, et très faible en

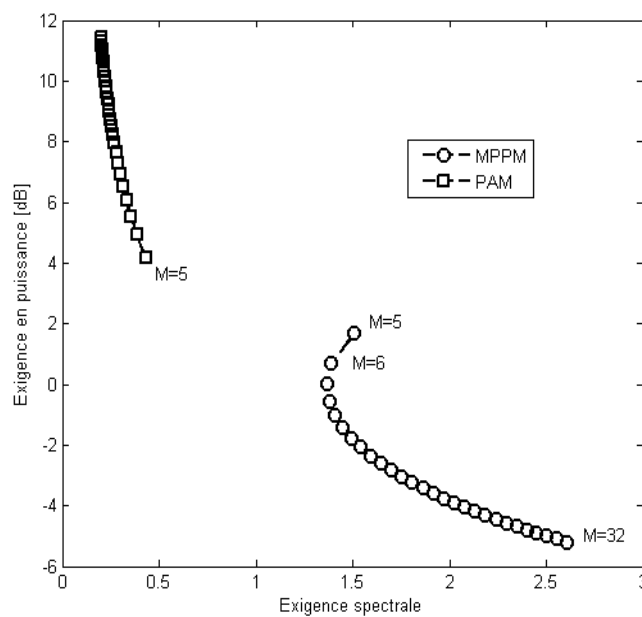
termes d'efficacité en puissance. Les exigences en bande passante et en puissance pour PAM, PPM, MPPM normalisées par OOK, sont indiquées dans le tableau. 4.1 [49].

	Exigence en puissance	Exigence en bande passante
PAM	$P_{PAM}/P_{ook} = \frac{M-1}{\sqrt{\log_2 M}}$	$B_{PAM} = \frac{1}{\log_2(M)}$
PPM	$P_{PPM}/P_{ook} = \sqrt{\frac{2}{M \log_2 M}}$	$B_{PPM} = \frac{M}{\log_2(M)}$
MPPM	$P_{MPPM}/P_{ook} = \frac{2w}{\sqrt{Md \log_2 L}}$	$B_{MPPM} = \frac{M}{\log_2 L}$

**Tab. 4.1** Les exigences en bande passante et en puissance de PAM, PPM, MPPM normalisées par OOK

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 4.2 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.



**Fig. 4.2** Puissance normalisée en fonction de l'exigence spectrale de PAM et 3MPPM

## 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 [49]. 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  $T = \log_2(L) / D$  ( $D$  : 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:

$$L_{\text{MPAPM}} = 2^w \binom{M}{w} = 2^w \frac{M!}{w!(M-w)!} \quad (4.1)$$

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 ( $A_1, A_2$ ) pour transmettre un des  $L$  symboles. Le nombre de symboles possible par 3MPAPM avec la combinaison Position-Amplitude est donné par :

$$L_{\text{3MPAPM}} = 8 \binom{M}{3} = 8 \frac{M!}{3!(M-3)!} = \frac{4}{3} M(M-1)(M-2) \quad (4.2)$$

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

### 2.2.1 Le Débit de MPAPM

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

$$D = \frac{\log_2 L}{T} \text{ (bit / s)} \quad (4.3)$$

Où :  $L$  est le nombre de symboles possible pour MPPM ou MPAPM;

$T$  est la durée de symbole.

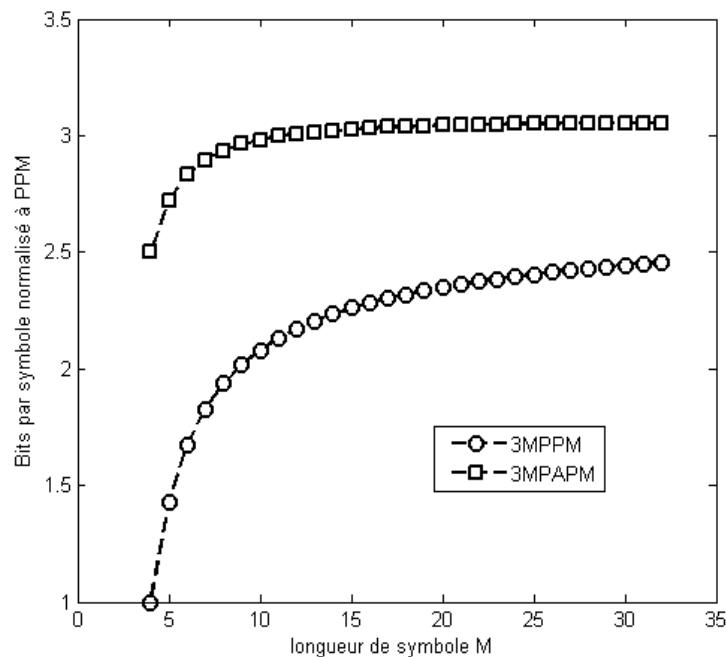


Pour montrer l'amélioration en débit on va utiliser le paramètre  $R$  qui représente le débit normalisé.

$$R = \frac{D_M}{D_{PPM}} = \frac{\log_2 L}{\log_2 M} \quad (4.4)$$

$D_M$  est le débit de MPPM ou de MPAPM

La figure 4.3 présente 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.



**Fig. 4.3** Débit normalisé de 3MPPM et 3MPAPM

### 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:

$$A_2 = 2.A_1 \quad (4.5)$$

L'exigence moyenne en puissance de la modulation MPAPM normalisée à OOK à été étudiée par *Yu Zeng* et *Al* [49]. 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 :

$$\left\{ \begin{array}{l} P_1 = 0A_1 + wA_2 \\ P_2 = 1A_1 + (w - 1)A_2 \\ P_3 = 2A_1 + (w - 2)A_2 \\ P_4 = 3A_1 + (w - 3)A_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ P_w = (w - 1)A_1 + A_2 \\ P_{w+1} = wA_1 + 0A_2 \end{array} \right. \quad (4.6)$$

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

$$\begin{aligned} P_{MPAPM} &= \frac{P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_{w+1}}{w + 1} \\ &= \frac{A_1 + 2A_1 + 3A_1 + \dots + wA_1 + \dots + A_2 + 2A_2 + \dots + wA_2}{w + 1} \end{aligned} \quad (4.7)$$

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

$$P_{MPAPM} = (A_1 + A_2) \frac{w}{2} \quad (4.8)$$

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

$$P_{MPAPM} = \frac{3w}{2} A_1 \quad (4.9)$$

La puissance moyenne par symbole pour MPPM est donnée par :

$$P_{MPPM} = w \cdot A_1 \quad (4.10)$$

D'après les relations (4.9) 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.

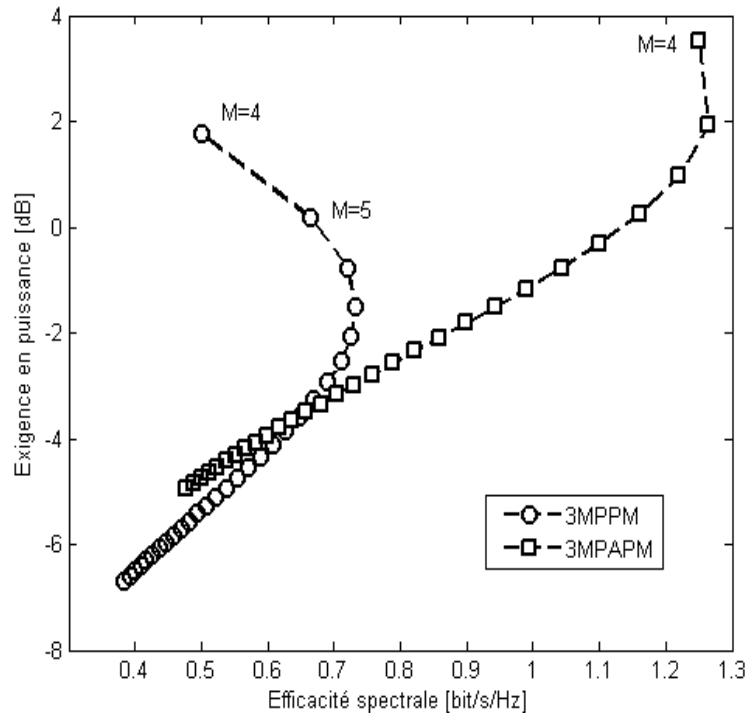
$$B_{MPAPM} = \frac{M}{T_b \cdot \log_2 L_{MPAPM}} \quad (4.14)$$

L'efficacité spectrale (s'exprime 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 4.4 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. La 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.



**Fig. 4.4** Exigence en puissance en fonction de l'efficacité spectrale pour 3MPPM et 3MPAPM

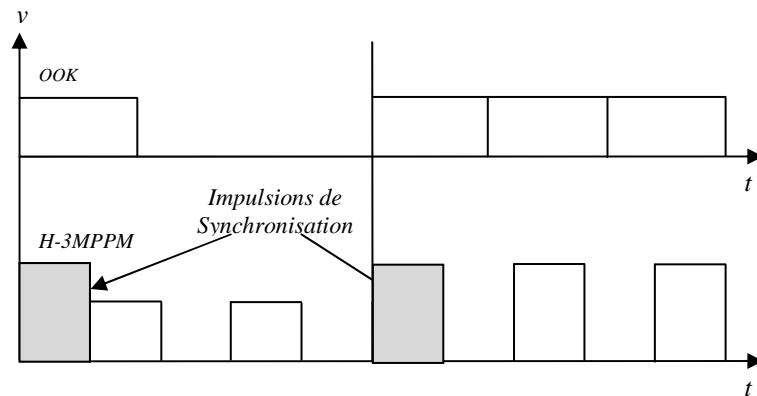
### 2.3 Harmonic MPPM (H-MPPM)

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 le problème d'absence de synchronisation des symboles, on va présenter un nouveau concept de modulation ; *H-MPPM* (*Harmonic MPPM*) [50] 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  $A_2$  (figure 4.5), 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 *Harmonique MPPM*.



**Fig. 4.5.** 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 :

- a. Simplifier 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.
- b. Mise en place de l'opération de synchronisation; puisque l'amplitude de l'impulsion de synchronisation  $P_1$  est toujours différente de l'amplitude des impulsions porteuse de l'information  $P_n$ , donc au niveau du récepteur la distinction entre l'impulsions de synchronisation et celles porteuse 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.

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 ( $A_1, A_2$ ).

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  $L=2^b$ .

### 2.3.1 Le Débit de H-MPPM

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

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

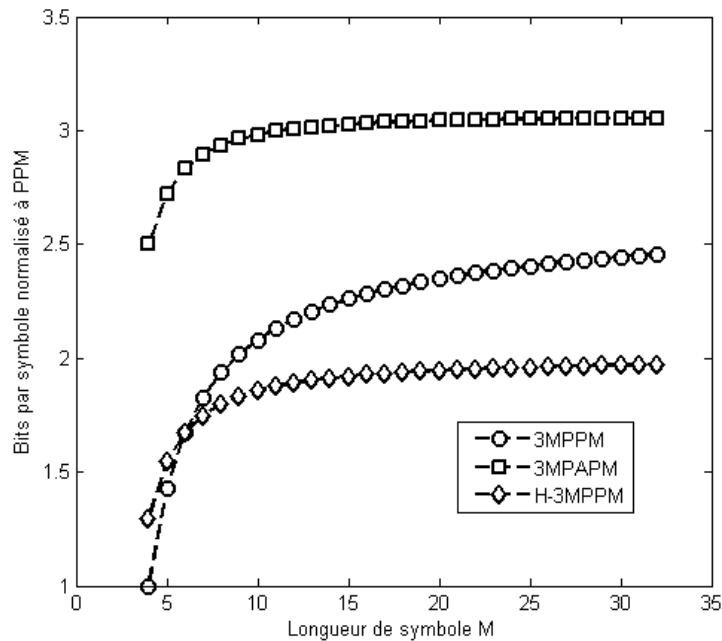


Fig. 4.6. Débit normalisé de 3MPPM, 3MPAPM et H-3MPPM

La figure 4.6 présente le débit normalisé des modulations 3MPPM, 3MPAPM et H-3MPPM basés 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, à titre d'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  $M = 32$ .

Ces résultats montrent que la modulation H-MPPM n'est pas la solution idéale lorsque le débit est d'une 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.

### 2.3.2 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 :

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

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 (4.5), de ce fait, la puissance moyenne des quatre puissances de H-MPPM est donnée par :

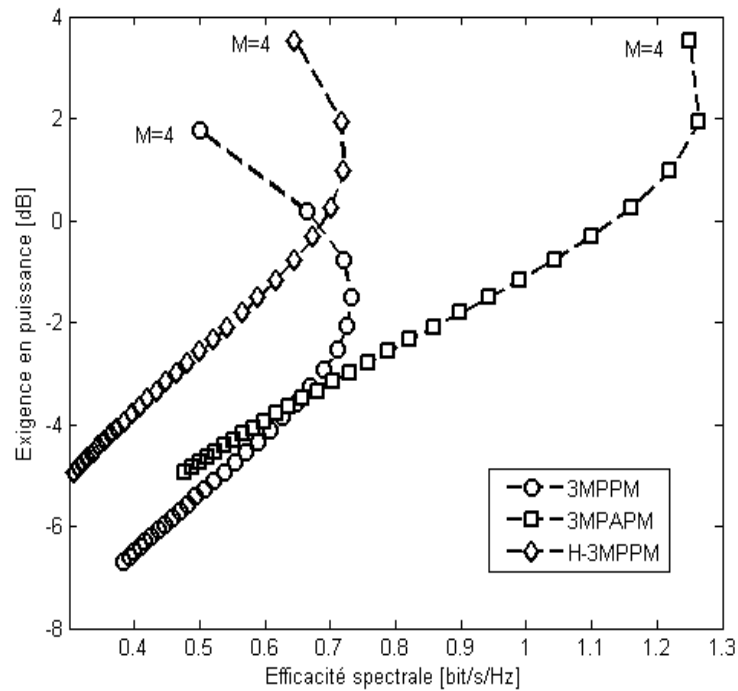
$$P_{H-MPPM} = \frac{3w}{2}A_1 \quad (4.21)$$

On remarque d'après les relations (4.9) 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 4.7 montre l'exigence en puissance en fonction de l'efficacité spectrale pour différentes longueur de symbole  $M$  pour les trois modulations 3MPPM, 3MPAPM et H-3MPPM.



**Fig. 4.7** Exigence en puissance en fonction de l'efficacité spectrale pour 3MPPM, 3MPAPM et H-3MPPM

La figure montre que la modulation H-3MPPM dépasse 3MPPM pour  $M = 4$  et  $5$  en termes l'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.

#### 2.4 Anisochrone 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 H-MPPM (AH-MPPM) est une forme modifiée de H-MPPM, qui présente un débit de transmission plus élevé et une meilleure efficacité spectrale en éliminant tout 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 [51]. Dans le nouveau concept AH-MPPM 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 données par  $(w+1) T_s$  et  $M.T_s$  respectivement. Ainsi, la durée moyenne des symboles est donnée par:

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

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

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

Pour  $w=3$ , on a :

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

### 2.4.1 Le débit de AH-MPPM

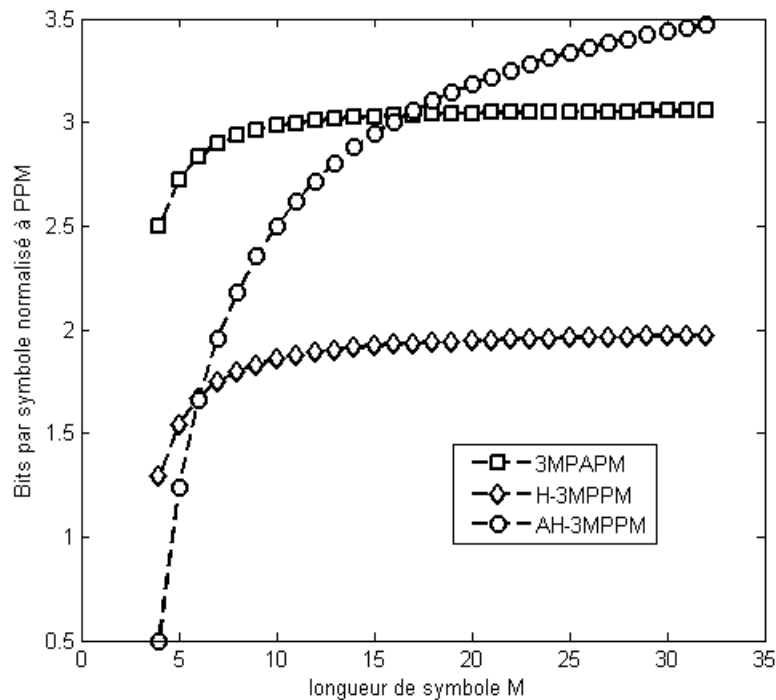
Une des principales raisons de la migration du concept isochrone au concept anisochrone est l'amélioration du débit de données. Le débit qui peut être atteint avec AH-MPPM est fonction de la longueur moyenne des symboles:

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

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.

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

La figure 4.8 montre les différents rapports de débit de 3MPAPM, H-3MPPM et AH-3MPPM basés sur la longueur des symboles  $M$ .



**Fig. 4.8** Débit normalisé de 3MPAPM, H-3MPPM et AH-3MPPM

D'après la figure 4.8, 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  $M$  inférieur 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.

#### 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).

	MPAPM	H-MPPM	AH-MPPM
$L$	$2^w \frac{M!}{w!(M-w)!}$	$2 \frac{(M-1)!}{(w-1)!(M-w)!}$	$2 \frac{(M-2)!}{(w-1)!(M-w-1)!}$
<i>L'exigence en puissance moyenne normalisée</i>	$\frac{P}{P_{OOK}} = \frac{3w}{\sqrt{Md \log_2 L_{MPPM}}}$		
<i>Efficacité Spectrale</i>	$\eta = \frac{\log_2 L}{M}$		

**Tab. 4.2** Expressions des efficacités en bande passante et Exigences normalisées en puissance pour MPAPM, H-MPPM, AH-MPPM

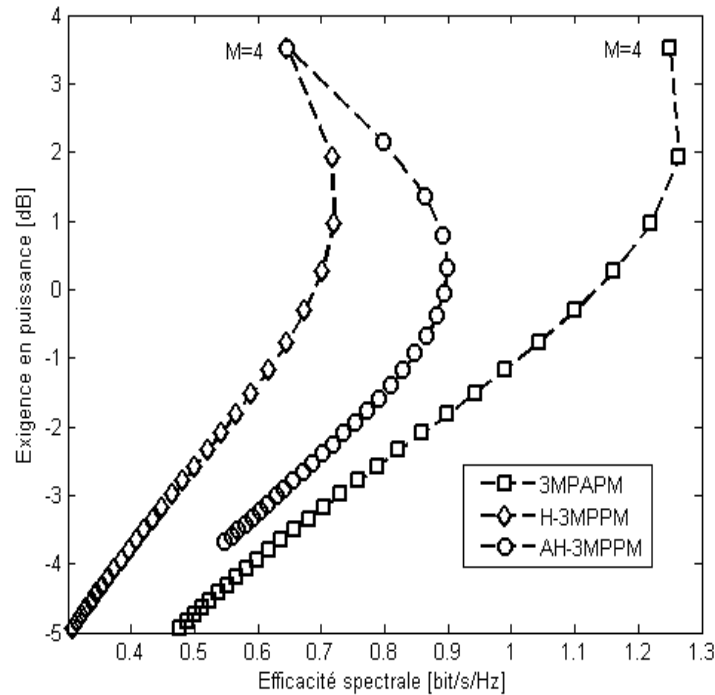
L'efficacité spectrale de la modulation AH-MPPM basée sur la longueur moyenne des symboles est donnée par:

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

L'efficacité en bande passante et l'exigence en puissance normalisées pour 3MPAPM, H-3MPPM, et AH-3MPPM, sont données dans le tableau 4.2.

La figure 4.9 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  $M=32$ .



**Fig. 4.9** Exigence en puissance en fonction de l'efficacité spectrale pour 3MPAPM, H-3MPPM et AH-3MPPM

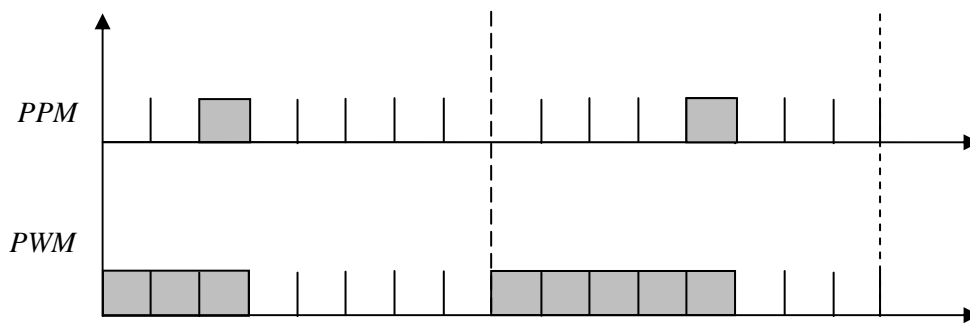
La combinaison des modulations MPPM et PAM a été déjà proposée sous forme de MPAPM, et elle présente une amélioration remarquable en termes de débit et d'efficacité spectrale, mais le problème de synchronisation est toujours présent, nous sommes censés donc de trouver une solution. Dans un premier temps on a présenté H-MPPM « Harmonic Multi-Pulse 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 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 (4.5).

### 3. La modulation hybride MPPM-PWM

Comme signalé dans la section précédente, les modulations hybrides sont des solutions prometteuses pour bénéficier des avantages des deux modulations. Toujours dans ce contexte, on présente dans cette section une combinaison entre MPPM et PWM (*Pulse Width Modulation*), où l'information sera présentée par la combinaison Position-Largeur.

#### 3.1 La modulation PWM

La différence entre la modulation PWM (*Pulse Width Modulation*) et la modulation PPM (*Pulse Position Modulation*) est dans la façon dont les symboles sont exprimés. En PWM, les symboles sont représentés par la largeur de l'impulsion au lieu de la position de l'impulsion. La PWM encode  $b$  bits de données binaires en une impulsion continue, en occupant de 1 à  $M$  slots (figure 4.10).



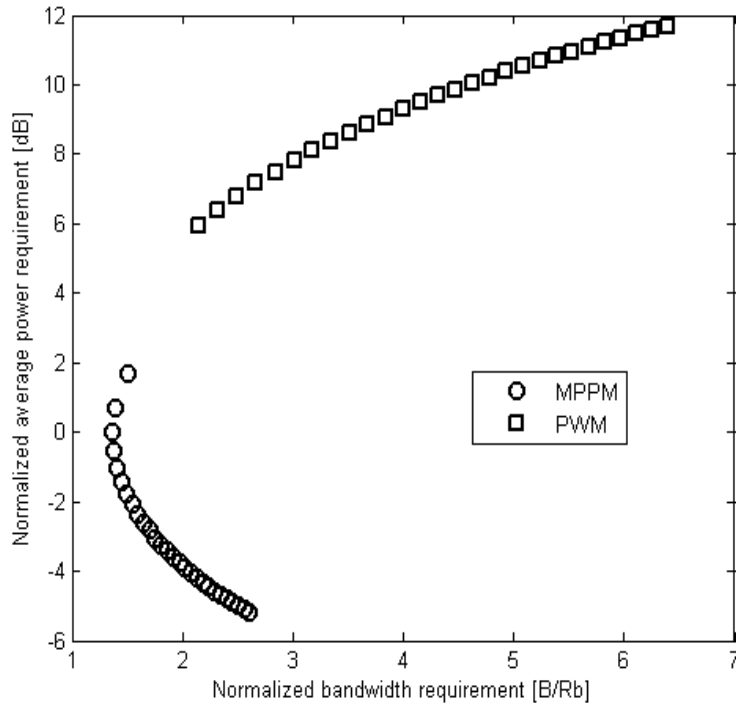
**Fig. 4.10** Les techniques de modulation PPM et PWM

L'exigence en puissance et l'efficacité spectrale pour PWM sont, respectivement données par [52]:

$$\frac{P_{\text{PWM}}}{P_{\text{OOK}}} = \frac{M+1}{\sqrt{\log_2 M}} \quad (4.29)$$

$$\eta_{\text{PWM}} = \frac{\log_2 M}{M} \quad (4.30)$$

La figure 4.11 présente la puissance moyenne normalisée en fonction de l'exigence spectrale des deux modulations PWM et 3MPPM. On remarque que la modulation PWM présente une efficacité spectrale très médiocre et une exigence en puissance très élevée. Dans ce travail, on va utiliser que deux largeurs d'impulsion dans les combinaisons PWM-MPPM, afin d'avoir le minimum d'exigence en puissance.



**Fig. 4.11** Puissance normalisée en fonction de l'exigence spectrale de PWM et 3MPPM

### 3.2 La modulation MPDWM (Multi-Pulse Dual Width Modulation)

Dans la nouvelle approche de modulation MPDWM, les impulsions peuvent prendre deux largeurs, alors l'information est représentée par la combinaison Position-Largeur. La relation entre les deux largeurs d'impulsion  $l_1$  et  $l_2$  est un paramètre de conception. Dans ce travail nous allons prendre :

$$l_2 = (3/2)l_1 \quad (4.31)$$

Dans MPDWM, chaque séquence de  $b$  bits est encodée avec un parmi les  $L = 2^b$  symboles. Chaque intervalle est partitionné en  $M$  slots,  $w$  slots sont de durée variable ( $T_s$  ou  $(3/2)T_s$ ). Si on considère que chaque impulsion débute à partir de  $t=k.T_s$  ( $0 \leq k \leq M-1$ ), alors le nombre de slots qui peuvent être occupés par des impulsions est compris entre  $(M-w)$  et  $M$ , pour donner une moyenne de  $(M-w/2)$ .

Le nombre de symboles possible avec MPDWM est :

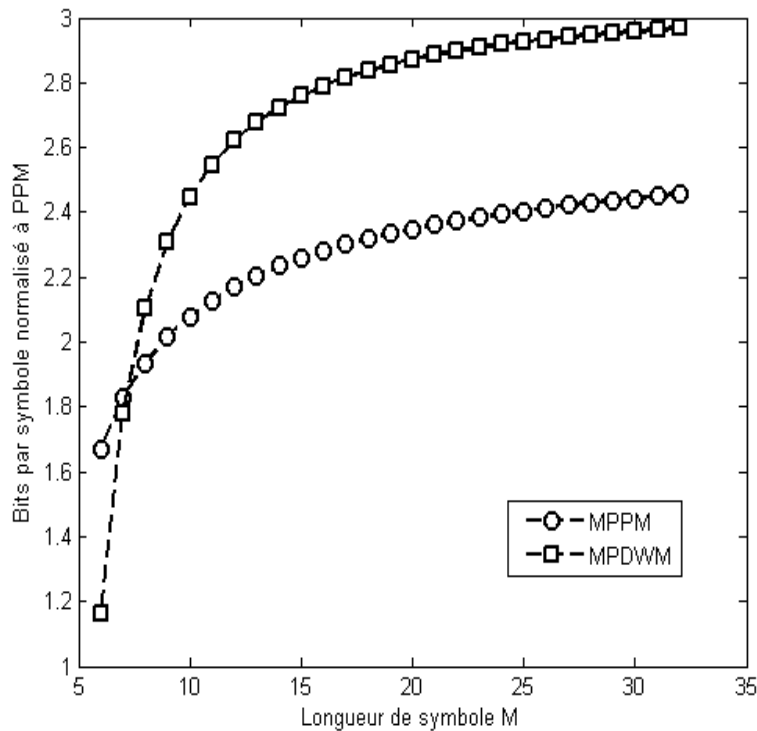
$$L_{\text{MPDWM}} = 2^w \binom{M - \frac{w}{2}}{w} \quad (4.32)$$

### 3.2.1 Le Débit de MPDWM

Basé sur le nombre de slots qui peuvent être occupés par des impulsions, le débit que peut atteindre la modulation MPDWM est donné par :

$$D_{\text{MPDWM}} = \frac{\log_2 L_{\text{MPDWM}}}{M T_s} \text{ (bit / s)} \quad (4.33)$$

La figure 4.12 présente le débit normalisé  $R$  pour les deux modulations MPPM et MPDWM basés sur la longueur des symboles  $M$ .



**Fig. 4.12** Débit normalisé de 3MPPM et 3MPDWM

Deux conclusions s'imposent par la figure 4.12, la première est que le débit normalisé atteint par MPDWM et MPPM augmente avec  $M$ . La seconde, est que la méthode MPDWM est meilleure que MPPM, pour toute valeur de  $M$  supérieur à 8. Ce qui rend MPDWM une bonne solution pour les communications haut débit.

### 3.2.2 Exigence en puissance et efficacité spectrale de MPDWM

La procédure de calcul de puissance moyenne normalisée est la même que pour H-MPPM, où chaque symbole de MPDWM doit avoir une puissance parmi les suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} P_1 = 0l_1 + wl_2 \\ P_2 = 1l_1 + (w - 1)l_2 \\ P_3 = 2l_1 + (w - 2)l_2 \\ P_4 = 3l_1 + (w - 3)l_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ P_w = (w - 1)l_1 + l_2 \\ P_{w+1} = wl_1 + 0l_2 \end{array} \right. \quad (4.34)$$

Selon les relations (4.8) et (4.31), la puissance moyenne par symbole est donnée par la relation:

$$P_{MPDWM} = \frac{5w}{4} l_1 \quad (4.35)$$

De ce fait, la puissance moyenne normalisée de la modulation MPDWM est donnée par la relation:

$$\frac{P_{MPDWM}}{P_{OOK}} = \frac{5w}{2\sqrt{Md \log_2 L_{MPPM}}} \quad (4.36)$$

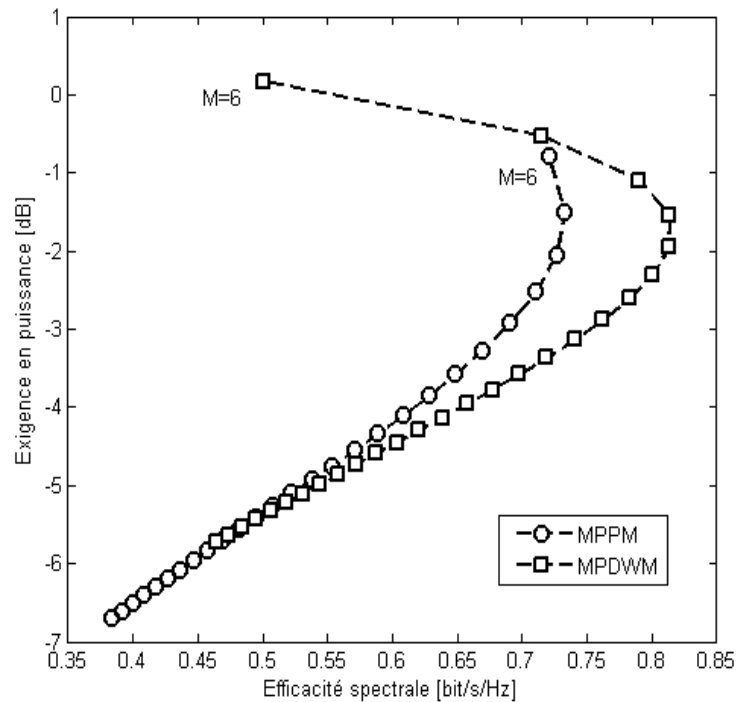
L'efficacité spectrale de la modulation MPDWM est donnée par:

$$\eta_{MPDWM} = \frac{\log_2 L_{MPDWM}}{M} \quad (4.37)$$

La figure 4.13 présente les exigences en termes de puissance normalisée basées sur l'efficacité spectrale pour les modulations MPPM et MPDWM avec trois impulsions par symbole et pour différentes valeurs de  $M$ , allant de 6 à 32.

La figure montre que la modulation MPPM est meilleure que MPDWM du point de vue efficacité en puissance pour toutes les valeurs de  $M$ , et en ce qui concerne l'efficacité spectrale, la modulation MPDWM présente une meilleure efficacité pour les valeurs de  $M$  supérieur à 8.





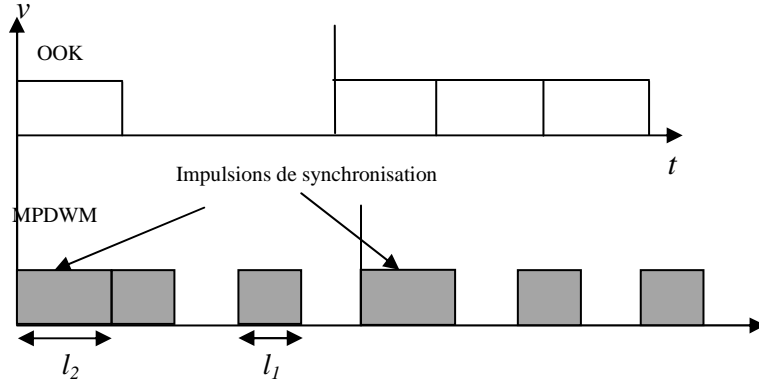
**Fig. 4.13** L'exigence en puissance en fonction de l'efficacité spectrale pour 3MPPM et 3MPDWM

Ces résultats montrent que la combinaison PWM-MPPM présente une amélioration notable en termes de débit de données et en termes d'efficacité spectrale, mais le problème d'absence de synchronisation est toujours présent. Pour résoudre ce problème et améliorer encore plus le débit et l'efficacité spectrale, l'utilisation de l'approche définie dans la section 2.3, et la migration vers une version anisochrone est une solution prometteuse.

### 3.3 Anisochrone MPDWM

Afin de résoudre le problème d'absence de synchronisation et améliorer le débit et l'efficacité spectrale plus encore dans MPDWM, on va présenter *Anisochronous Harmonic MPDWM* comme une autre modulation hybride compatible avec les systèmes de communication optique sans fil.

Dans AH-MPDWM (comme pour AH-MPPM) une impulsion  $P_1$  va être implantée au début de chaque symbole pour la synchronisation des symboles, et les autres impulsions  $P_n$  seront porteuses d'information (figure 4.14), la largeur de l'impulsion de synchronisation  $P_1$  dépend de la largeur des impulsions porteuse d'information  $P_n$  du symbole précédent. Si les impulsions  $P_n$  ont une largeur  $l_1$ , alors l'impulsion  $P_1$  prend la largeur  $l_2$ , et si les impulsions  $P_n$  ont une largeur  $l_2$ , alors l'impulsion  $P_1$  prend la largeur  $l_1$ .



**Fig. 4.14.** Exemple d'encodage d'une série de bit de données avec AH-MPDWM

Dans le nouveau concept de modulation AH-MPDWM on va éliminer tous les slots non utilisés au sein de chaque symbole, et afin d'éviter les symboles dans lesquels le temps entre les impulsions voisines est égal à zéro, un slot de garde sera ajouté à chaque symbole immédiatement après la dernière impulsion.

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

$$T_{\text{mean}} = \frac{M+w+1}{2} T_s \quad (4.38)$$

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

$$L_{\text{AH-MPDWM}} = 2^{\binom{M - \frac{w}{2} - 2}{w-1}} \quad (4.39)$$

### 3.3.1 Débit de AH-MPDWM

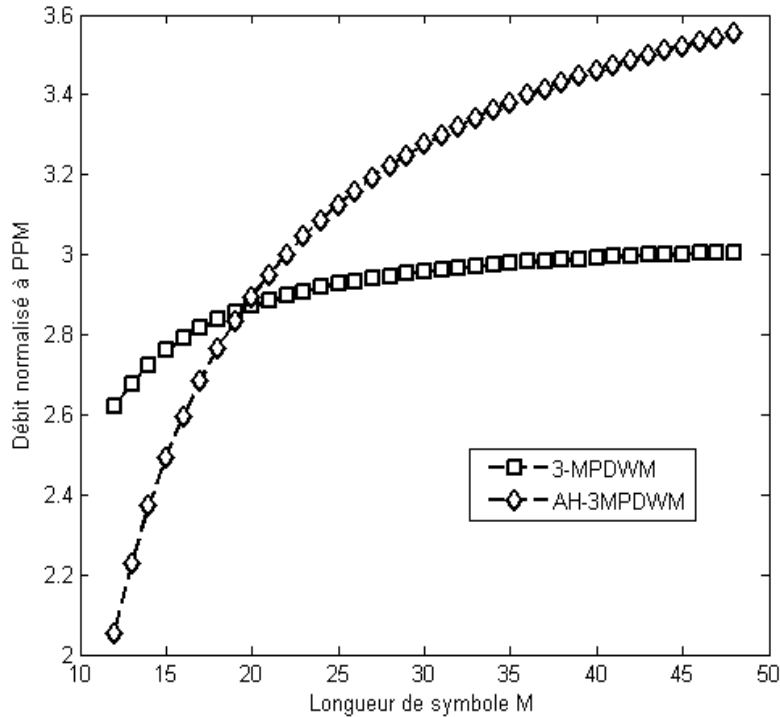
Une des principales raisons du passage du concept de modulation isochrone au concept anisochrone est l'amélioration du débit de données. Le débit atteint avec la modulation AH-MPDWM en fonction de la longueur moyenne des symboles est donné par:

$$D_{\text{AH-MPDWM}} = \frac{\log_2 L_{\text{AH-MPDWM}}}{T_{\text{mean}}} \quad (4.40)$$

Le débit de données normalisé basé sur la longueur moyenne des symboles de la modulation AH-MPDWM est donné par :

$$R = \frac{D_{\text{AH-MPDWM}}}{D_{\text{PPM}}} = \frac{(2M)\log_2 L_{\text{AH-MPDWM}}}{(M+w+1)\log_2 M} \quad (4.41)$$

La figure 4.15 présente le rapport de débit  $R$  pour les deux modulations MPDWM et AH-MPDWM basés sur la longueur des symboles  $M$ . Le débit normalisé atteint par les deux modulations MPDWM et AH-3MPDWM augmente avec la valeur de  $M$ , avec une croissance plus rapide pour la seconde.



**Fig. 4.15** Débit normalisé de 3MPDWM et de AH-3MPDWM

Le débit correspondant à la modulation MPDWM est meilleur que celui de AH-MPDWM pour des valeurs de  $M$  inférieur à 20, et au-delà de cette valeur la modulation AH-MPDWM prend avantage sur MPDWM. L'amélioration du débit atteint par la modulation AH-MPDWM est principalement le résultat de l'élimination des slots inutilisés de chaque symbole.

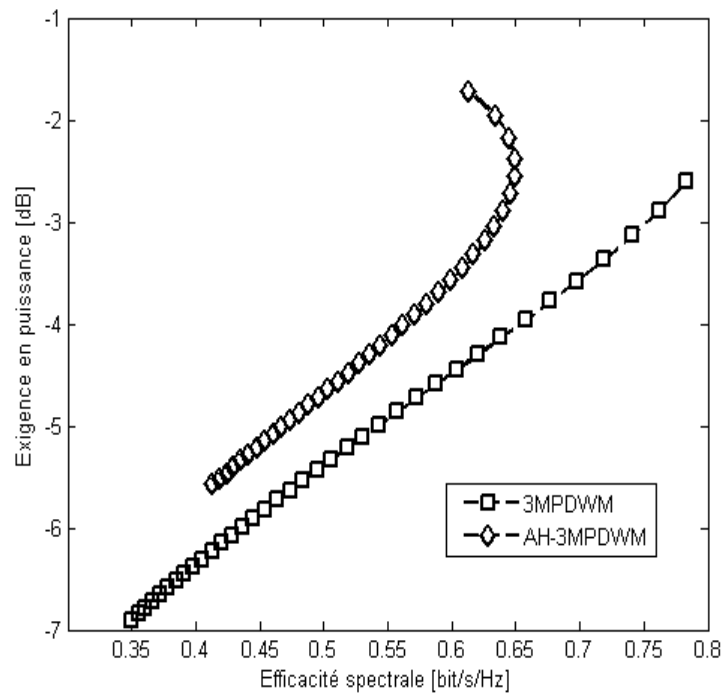
### 3.3.2 Exigence en puissance et efficacité spectrale AH-MPDWM

Le rapport entre les deux largeurs  $l_1$  et  $l_2$  dans la modulation AH-MPDWM est le même que pour la modulation MPDWM. Ainsi, la formule générale de l'exigence de puissance de AH-MPDWM normalisée à OOK est la même que pour MPDWM, elle est donnée par (4.36).

L'efficacité spectrale de AH-MPDWM basée sur la longueur moyenne des symboles est donnée par:

$$\eta_{\text{AH-MPDWM}} = \frac{\log_2 L_{\text{AH-MPDWM}}}{M_{\text{mean}}} = \frac{2 \log_2 L_{\text{AH-MPDWM}}}{(M + w + 1)} \quad (4.42)$$

La figure 4.16 montre l'avantage de AH-MPDWM en termes d'efficacité spectral par rapport à MPDWM pour les valeurs de  $M \geq 19$ . L'amélioration de l'efficacité spectrale se répercute sur l'efficacité en puissance, qui se dégrade. Enfin de compte, le choix du type de modulation dépend du système de communication utilisé, parce que chaque système donne la priorité à quelques paramètres, et par conséquent à quelques modulations au dépend d'autres.



**Fig. 4.16** L'exigence en puissance en fonction de l'efficacité spectrale pour 3MPDWM et AH-3MPDWM

#### 4. AH-MPPM vs AH-MPDWM

Dans cette section on va effectuer une comparaison entre les deux approches AH-MPPM et AH-MPDWM, pour trouver laquelle des deux présente le meilleur débit, efficacité en puissance, efficacité spectral et moins de complexité.

#### 4.1 Le débit de AH-MPPM v.s le débit de AH-MPDWM

Le passage vers le concept anisochrone pour les deux modulations hybrides a pour principal but l'amélioration du débit, ce passage influence différemment l'amélioration de ce paramètre.

La figure 4.17 présente le rapport de débit  $R$  pour les deux types de modulations AH-MPPM et AH-MPDWM basé sur la longueur des symboles  $M$ .

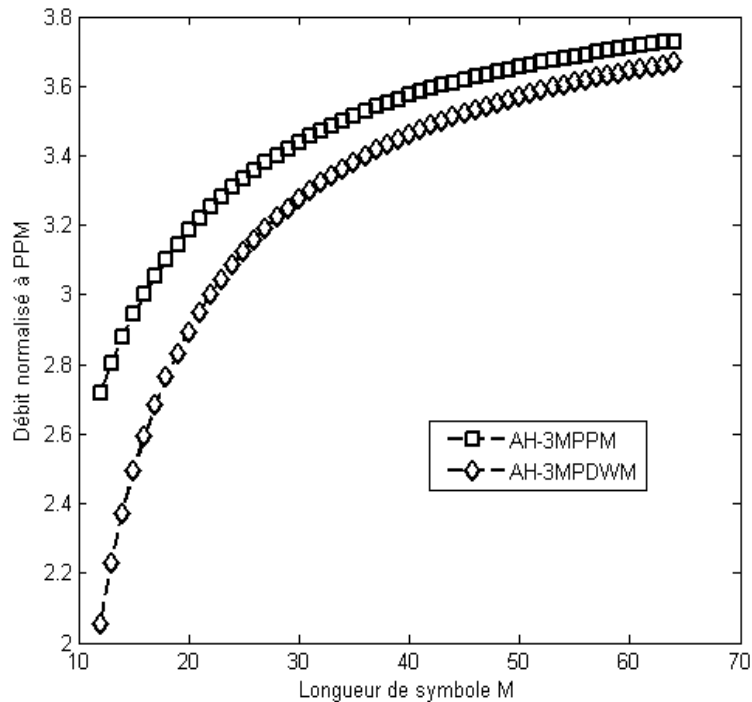


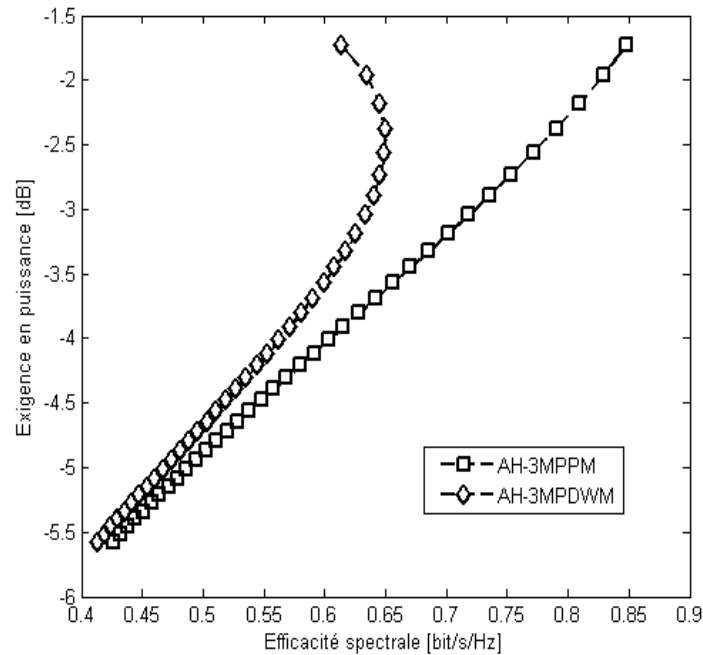
Fig. 4.17 Débit normalisé de AH-3MPPM et de AH-3MPDWM

La figure 4.17 montre que le débit normalisé atteint par les deux types de modulation augmente avec la valeur de  $M$ , mais avec différent comportement, où AH-MPPM est meilleur que AH-MPDWM pour toute valeur de  $M$ . De ce fait, la combinaison anisochrone PAM-MPPM est plus efficace du point de vue débit de données comparée à la combinaison anisochrone PWM-MPPM, surtout pour les valeur inférieur de  $M$ .

#### 4.2 Exigence en puissance et efficacité spectrale

Pour faire une comparaison équitable, on va choisir la relation entre les deux amplitudes de PAM-MPPM et les deux largeurs de PWM-MPPM pour avoir ( $A_2=3/2 A_1$ ) et ( $l_2=3/2 l_1$ ) respectivement, ce qui fait que la puissance moyenne normalisée des deux approches est donnée par (4.36).

La figure 4.18 présente les exigences en puissance normalisées basées sur l'efficacité spectrale pour les modulations AH-MPPM et AH-MPDWM avec trois impulsions par symbole et pour différentes valeurs de  $M$ , allant de 12 à 48.



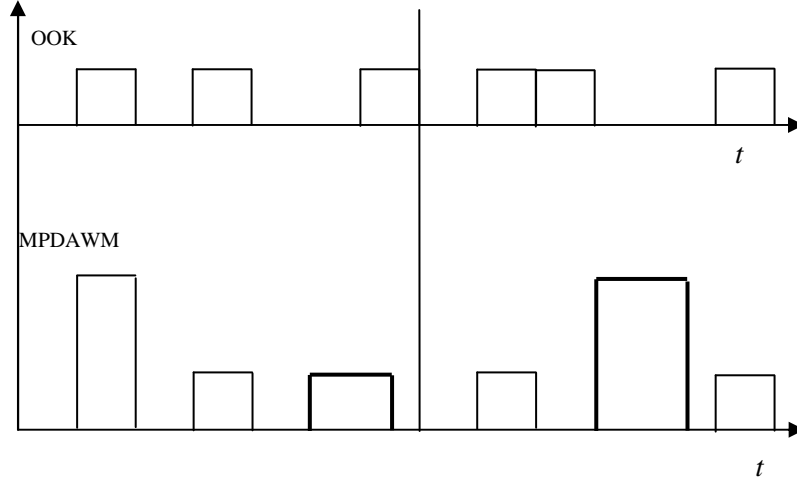
**Fig. 4.18** L'exigence en puissance en fonction de l'efficacité spectrale pour AH-MPPM et AH-MPDWM

La figure 4.18 montre que les deux types de modulation présentent la même efficacité en puissance, et que AH-MPPM dépasse AH-3MPDWM en termes d'efficacité spectrale pour toutes les valeurs de  $M$ .

## 5. Multi-Pulse Dual Amplitude-Width Modulation (MPDAWM)

Après avoir présenté deux méthodes de modulation pour résoudre le problème de synchronisation des symboles, amélioration du débit et l'efficacité spectrale dans la modulation Multi-Pulse PPM, on va présenter dans cette section une autre modulation hybride sur la base de MPPM, PAM et PWM, pour avoir le maximum de débit et une amélioration significative en termes d'efficacité énergétique et spectrale.

Pour cette méthode, l'impulsion peut prendre deux niveaux et deux largeurs (figure 4.19). De ce fait, l'information est présentée par les combinaisons Position-Largeur-Amplitude. Les relations entre les deux niveaux et les deux largeurs sont des paramètres de conception. Dans ce travail, la relation entre les deux niveaux est donnée par (4.5), et la relation entre les deux largeurs est donnée par (4.31).



**Fig. 4.19** Exemple d'encodage MPDAWM

Dans MPDAWM [53], l'émetteur envoie  $w$  impulsions optiques à chaque symbole, chaque intervalle de symbole est partitionné en  $M$  slot, dont  $(M-w)$  slot sont de durée  $T_s$ , et les autres  $w$  slots sont de durée variable ( $T_s$  ou  $3/2 T_s$ ). Le nombre moyen de slots qui peuvent être occupés par des impulsions est compris entre  $(M-w)$  et  $M$ , (en considérant que chaque impulsion débute à  $t = k.T_s$  ( $0 \leq k \leq M-1$ )). Donc, le nombre moyen de slots pouvant être occupés par des impulsions est  $(M - w/2)$ .

Le nombre de symbole possible avec MPDAWM par la combinaison Position-Amplitude-Largeur est donné par:

$$L_{\text{MPDAWM}} = 4^w \binom{M - \frac{w}{2}}{w} = 4^w \frac{(M - \frac{w}{2})!}{w!(M - \frac{3}{2}w)!} \quad (4.43)$$

### 5.1 Le Débit de MPDAWM

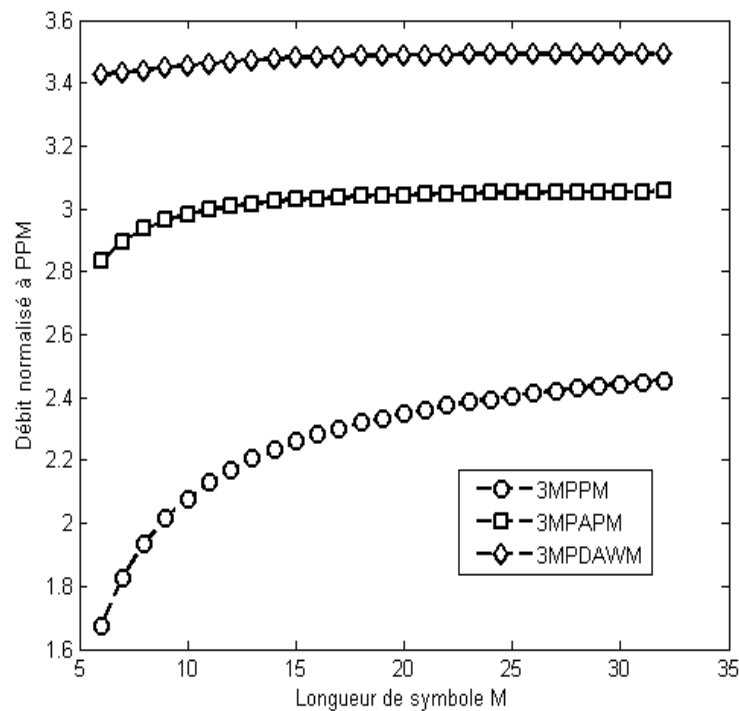
Le débit que peut atteindre la modulation MPDAWM est donné par :

$$D_{\text{MPDAWM}} = \frac{\log_2 L_{\text{MPDAWM}}}{M.T_s} \text{ (bit / s)} \quad (4.44)$$

Pour montrer l'amélioration en débit, on utilise le débit normalisé à PPM. Pour MPDAWM le débit normalisé est donné par :

$$R_{\text{MPDAWM}} = \frac{\log_2 L_{\text{MPDAWM}}}{\log_2 M} \text{ (bit/s)} \quad (4.45)$$

La figure 4.20 montre le débit normalisé des modulations MPPM, MPAPM et MPDAWM avec trois impulsions et pour différentes valeurs de  $M$ . La figure montre que MPDAWM présente le débit de données le plus élevé. La différence entre les modulations est presque constante pour des valeurs élevées de  $M$ . Ces résultats montrent que la méthode MPDAWM est une très bonne solution pour les systèmes de communications optiques sans fil à très haut débit.



**Fig. 4.20** Débit normalisé de 3MPPM, 3MPAPM et 3MPDAWM

## 5.2 Exigence en puissance et efficacité spectrale de MPDAWM

Chaque symbole dans la modulation MPDAWM doit avoir une puissance parmi les suivantes :



$$\left\{ \begin{array}{l} P_1 = 0A_1 + wA_2 + 0d_1 + 0d_2 \\ P_2 = 1A_1 + (w - 1)A_2 + 0d_1 + 0d_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ P_n = wA_1 + 0A_2 + 0d_1 + 0d_2 \\ P_{n+1} = 0A_1 + 0A_2 + 0d_1 + wd_2 \\ P_{n+2} = 0A_1 + 0A_2 + 1d_1 + (w - 1)d_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ P_{n+n} = 0A_1 + 0A_2 + wd_1 + 0d_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ P_k = 1A_1 + 1A_2 + 1d_1 + (w - 3)d_2 \end{array} \right. \quad (4.46)$$

Afin de trouver l'exigence moyenne en puissance, nous définissons la puissance  $P_1$ , comme l'exigence en puissance moyenne par symbole dans le cas où l'information est présentée uniquement par la combinaison Position-Amplitude, donnée dans (4.8). Puisque on a pris la relation entre les deux amplitudes la même que dans MPAPM, alors la valeur de la puissance  $P_1$  est donnée par la relation (4.9). D'autre part, on définit la puissance  $P_2$ , comme l'exigence en puissance moyenne dans le cas où l'information est présentée uniquement par la combinaison Position-Largeur. Puisque on a pris la relation entre les deux largeurs la même que pour MPDWM, alors la valeur de la puissance  $P_2$  est donnée par la relation (4.35).

L'exigence moyenne en puissance de MPDAWM est donnée par :

$$P_{\text{MPDAWM}} = \frac{P_1 + P_2}{2} = \frac{11}{8} w A_1 \quad (4.47)$$

A partir des formules (4.10) et (4.47), on peut définir la relation entre les deux exigences en puissance de MPPM et MPDAWM qui est donnée par :

$$\frac{P_{\text{MPDAWM}}}{P_{\text{MPPM}}} = \frac{11}{8} \quad (4.48)$$

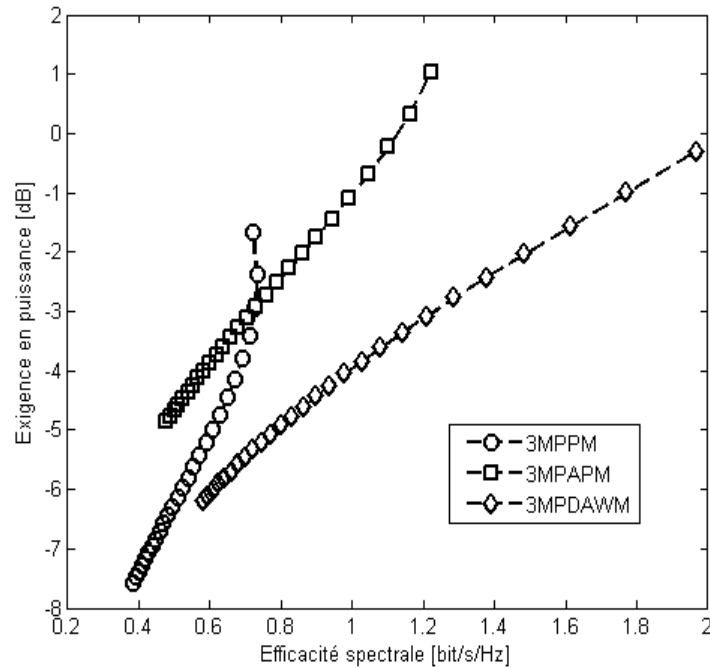
Pour trouver l'exigence moyenne en puissance normalisée de MPDAWM on utilise les relations (4.48) et (3.14).

$$\frac{P_{\text{MPPM}}}{P_{\text{OOK}}} \times \frac{P_{\text{MPDAWM}}}{P_{\text{MPPM}}} = \frac{P_{\text{MPDAWM}}}{P_{\text{OOK}}} \quad (4.49)$$

Par conséquent:

$$\frac{P_{\text{MPDAWM}}}{P_{\text{OOK}}} = \frac{11}{4} \frac{w}{\sqrt{Md \log_2 L_{\text{MPPM}}}} \quad (4.50)$$

La figure 4.21 montre l'exigence en puissance normalisée en fonction de l'efficacité spectrale pour les modulations MPPM, MPAPM et MPDAWM, avec trois impulsions par symbole, et pour différentes valeurs de  $M$ , allant de 6 à 32.



**Fig. 4.21** Exigence en puissance en fonction de l'efficacité spectrale pour 3MPPM, 3MPAPM et 3MPDAWM

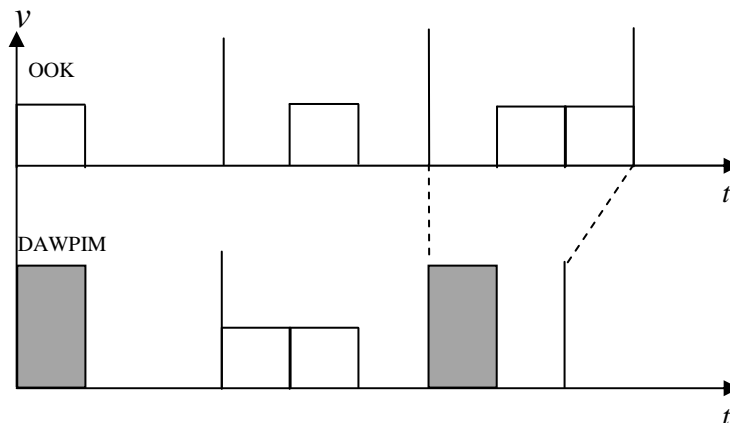
La figure 4.21 montre que pour les trois types de modulation l'efficacité spectrale diminue avec l'augmentation de  $M$ , où MPDAWM est beaucoup plus efficace que MPPM et légèrement plus efficace que MPAPM. Concernant l'efficacité en puissance, les trois régimes montrent une amélioration (diminution des exigences en puissance), où MPDAWM est beaucoup efficace par rapport à MPAPM, et présente moins d'efficacité que MPPM.

Ces résultats montrent que la modulation MPDAWM améliore de près de 1,5 dB l'efficacité en puissance par rapport à MPAPM, avec une légère amélioration en termes d'efficacité spectrale, plus une considérable amélioration en débit.

## 6. La combinaison de DPIM avec PAM-PWM

Dans cette section on va présenter un autre type de modulation hybride. La DPIM (Pulse Interval Modulation) sera combinée avec PAM-PWM.

La DPIM (Digital Pulse Interval Modulation) est une forme modifiée de PPM, au lieu d'encoder la séquence de données par la position de l'impulsion dans une durée de symbole fixe, la séquence de bits est représentée par l'intervalle de temps entre deux impulsions consécutives [54]. La modulation DPIM ne nécessite aucune synchronisation, comme chaque symbole commence par une impulsion. Afin d'éviter que le temps entre des impulsions de deux symboles adjacents soit égal à zéro, un slot de garde supplémentaire peut être ajouté à chaque symbole immédiatement après l'impulsion. Ainsi, un symbole qui encode une série de  $b$  bits est représenté par une impulsion de puissance constante suivie par  $k$  slots de puissance zéro, où  $1 \leq k < M$ , ( $M = 2^b$ ). La durée minimale et la durée maximale des symboles est respectivement  $2.T_s$  et  $M.T_s$ , de sorte que la durée moyenne des symboles soit :  $(m+2).T_s / 2$ .



**Fig. 4.22** Un exemple d'encodage d'une série de bits de données avec DAWPIM

La DAWPIM (Dual Amplitude-Width Pulse Interval Modulation) [55] est une forme modifiée de la modulation DPIM existante. Au lieu d'encoder la séquence de données juste selon l'intervalle de temps entre les impulsions, les données dans DAWPIM sont représentées par une combinaison Amplitude-Largeur et l'intervalle de temps entre deux impulsions consécutives (figure 4.22).

Par combinaison Amplitude-Largeur, le nombre de symboles possibles dans l'ensemble des signaux DAWPIM est donné par :

$$L_{\text{DAWPIM}}=4.M \quad (4.51)$$

Un exemple d'encodage d'une série de bits avec PPM, DPIM et DAWPIM est présenté sur le tableau 4.3.

<i>Les bits</i>	<i>PPM</i>	<i>DPIM</i>	<i>DAWPIM</i>
000	10000000	10	a0
001	01000000	100	a00
010	00100000	1000	aa0
011	00010000	10000	A0
100	00001000	100000	A00
101	00000100	1000000	AA0
110	00000010	10000000	aA0
111	00000001	100000000	Aa0

**Tab. 4.3** Exemple d'encodage d'une série de bits avec PPM, DPIM et DAWPIM

Où : -  $a$  : est une impulsion avec une amplitude  $A_1$ .

-  $A$ : est une impulsion avec une amplitude  $A_2=2. A_1$ .

-  $L$ 'amplitude de l'impulsion  $A$  et de deux fois celle de  $a$ , avec une même largeur.

Afin d'éviter que l'intervalle du temps entre les impulsions de deux symboles voisins soit égal à zéro, un slot de garde supplémentaire sera ajouté à chaque symbole immédiatement après l'impulsion. La longueur minimale et la longueur maximale des symboles est données par  $2T_s$  et  $M.T_s$  respectivement, de sorte que la longueur moyenne soit :  $(M+2) T_s / 2$ .

#### **a. Débit de DAWPIM**

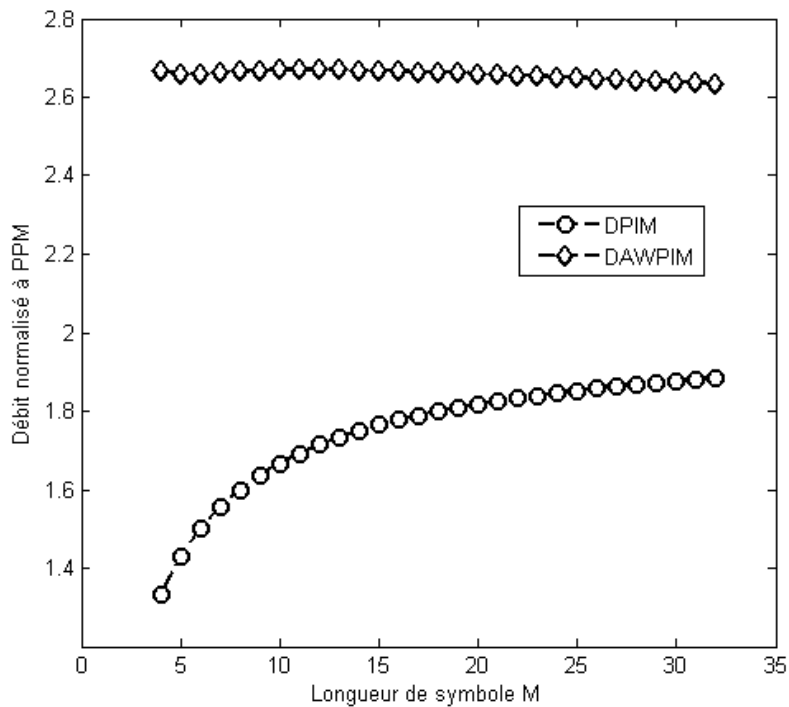
La longueur de symboles n'est pas constante dans le cas de DAWPIM, nous devons donc utiliser le débit moyen basé sur la longueur moyenne des symboles. Le débit qui peut être atteint par DAWPIM en fonction de la longueur moyenne des symboles est donné par:

$$D_{\text{DAWPIM}} = \frac{\log_2(4M)}{T_{\text{mean}}} \quad (4.52)$$

Pour montrer l'amélioration en débit, on utilise le paramètre  $R$ , qui présente le rapport du taux de données de DAWPIM normalisé à celui de PPM.

$$R = \frac{D_{\text{DAWPIM}}}{D_{\text{PPM}}} = \frac{(2M)\log_2(4M)}{(M+2)\log_2 M} \quad (4.53)$$

La figure 4.23 présente le rapport  $R$  pour DPIM et DAWPIM basé sur la longueur des symboles  $M$ . La figure montre que DAWPIM est meilleur en termes de débit que DPIM pour toutes les valeurs de  $M$ . Cette amélioration décroît avec la valeur de  $M$ . Pour les valeurs supérieures à  $M=32$ , le débit atteint par DAWPIM est 1.4 fois celui atteint par DPIM. Ces résultats montrent que pour la combinaison de PAM et PWM avec DPAIM on obtient une amélioration remarquable en termes de débit.



**Fig. 4.23** Débit normalisé de DPIM et DAWPIM

#### **b. Exigence en puissance et efficacité spectrale de DAWPIM**

L'exigence en puissance minimale et maximale par symbole de la modulation DAWPIM sont données par  $1.A_1$  et  $4.A_1$  respectivement. Ainsi, l'exigence moyenne est donnée par  $(5/2). A_1$ .

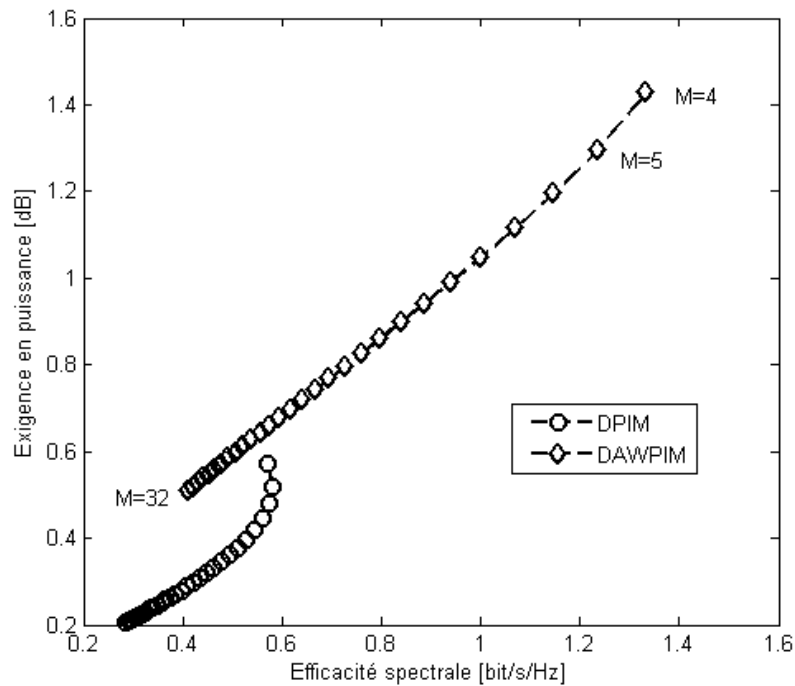
Pour la modulation PPM, l'exigence moyenne en puissance par symbole est  $A_I$ . Par conséquent, la relation entre les deux puissances moyennes de PPM et celle de la modulation DAWPIM est (5/2). De ce fait, la puissance moyenne normalisée de la modulation DAWPIM sera donnée par :

$$\frac{P_{DAWPIM}}{P_{OOK}} = \frac{5}{2} \sqrt{\frac{2}{M \log_2 M}} \quad (4.54)$$

L'efficacité spectrale de DAWPIM est donnée par:

$$\eta_{DAWPIM} = \frac{2 \log_2(4M)}{(M + 2)} \quad (4.55)$$

La figure 4.24 présente l'exigence en puissance normalisée en fonction de l'efficacité spectrale pour DPIM et DAWPIM pour différentes valeurs de  $M$  allant de 4 à 32. La figure montre que DAWPIM présente une meilleure efficacité spectrale surtout pour les grandes valeurs de  $M$ , et une efficacité en puissance plus faible pour toute valeur de  $M$ .



**Fig. 4.24** Exigence en puissance en fonction de l'efficacité spectrale pour DPIM et DAWPIM

Ces résultats montrent que la modulation DAWPIM est une bonne solution pour les systèmes qui exigent des communications synchronisée, une efficacité spectrale moyenne, et un bon débit de données. Le seul inconvénient de cette méthode de modulation est la dégradation de l'efficacité en puissance.

## 7. 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 optique 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 deux nouvelles méthodes de modulation, basées respectivement sur la combinaison MPPM-PAM et MPPM-PWM. Les deux approches résolvent le problème de synchronisation des symboles, et présentent une amélioration remarquable en termes de débit et d'efficacité spectrale avec un avantage pour PAM-MPPM par rapport à PWM-MPPM. Le seul inconvénient de ces deux méthodes est une dégradation en termes d'efficacité en puissance.

Dans un deuxième temps on a présenté un autre type de modulation hybride appelée Multi-Pulse Dual Amplitude-Width Modulation (MPDAWM), présenté sur la base de MPPM, PAM et PWM, pour avoir le maximum de débit et une amélioration significative en termes d'efficacité énergétique et spectrale.

Dans la dernière section de ce chapitre on a présenté la combinaison PAM-PWM avec DPIM, cette méthode de modulation hybride présente une amélioration en termes de débit et d'efficacité spectrale, mais avec une efficacité en puissance médiocre.

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 optique sans fil.

*Chapitre*

5

*Conception et Réalisation d'un  
Logiciel pour la Détermination de  
la (QoS)*



## 1. Introduction

La disponibilité et la fiabilité d'une liaison optique atmosphérique 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 neige, 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. Il apparaît donc, très important de bien connaître les limites et les possibilités offertes par ce type de liaisons afin d'obtenir une qualité de service en correspondance avec les attentes d'un opérateur de télécommunications. La détermination des meilleures conditions de disponibilité et de qualité de service requises pour une liaison de communication de type FSO nécessite une étude précise, théorique et expérimentale pour pouvoir établir, d'une manière précise, la disponibilité d'une telle liaison.

La marge brute d'une liaison FSO est l'un des éléments clefs lors du déploiement d'une liaison optique sans fil afin de pouvoir estimer la disponibilité de cette liaison. Cet élément permet de connaître la capacité à transmettre des données malgré les variations des conditions climatiques.

Les paramètres et les caractéristiques des équipements nécessaires à connaître pour déterminer la marge brute d'une telle liaison sont:

- La puissance émise,
- La sensibilité du récepteur,
- La surface de capture du récepteur,
- La divergence du faisceau émis.
- La longueur d'onde utilisée.

En connaissant la distance de la liaison et à partir de ces données techniques, livrées, la plupart du temps, par le constructeur, nous pouvons connaître la valeur de l'affaiblissement géométrique de la liaison, sa marge brute de puissance optique afin de remonter finalement à la disponibilité de la liaison et sa qualité de service.

Le but du présent chapitre est de présenter les modèles théoriques qui servent à calculer les différentes atténuations atmosphériques, et la réalisation d'un outil logiciel permettant aux spécialistes dans ce domaine qui mettent en œuvre les liens FSO dans leurs

propre usage ou pour leurs clients d'évaluer la disponibilité et la qualité de la liaison 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 la liaison optique sans fil (longueur, hauteur au dessus du sol, etc.).

Comparé à d'autres logiciels développés dans le domaine [56,57], le logiciel développé «**WOCL.Predi**» fournit la prévision instantanée ainsi que la prévision à long terme. Il prend en compte le cas où les unités FSO sont installées à l'intérieur, avec comme obstacle les fenêtres.

## 2. La marge brute d'une liaison FSO

Comme c'est le cas lors de la conception d'un système de transmission par fibre optique, une analyse de marge de liaison est nécessaire pour la conception des liaisons FSO. 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, 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 de la liaison optique atmosphérique 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 :

$$M_{liaison} \text{ (dB)} = P_e + |S_r| - Att_{Geo} \text{ (dB)} - Att_{mol} \text{ (dB)} - \sum P_{sys} \text{ (dB)} \quad (5.1)$$

Où :

- $P_e$  est la puissance émise par l'émetteur (dBm),
- $S_r$  est la sensibilité du récepteur (dBm),
- $Att_{Geo}$  est l'atténuation géométrique de la liaison (dB),
- $Att_{mol}$  est l'atténuation moléculaire correspondante à la longueur d'onde utilisée dans la liaison (dB),

- $P_{\text{sys}}$  sont les autres pertes relatives au système (dB), incluent 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 sur la lentille (supposées nulles dans le cas idéal).

La marge brute de la liaison peut être considérée comme le seuil de performance du lien. C'est un élément de base pour réaliser ensuite des calculs de probabilités de disponibilité de la liaison. 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 (aérosolaire ou suite à la présence des précipitations),
- 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 par la lumière ambiante.
- L'atténuation due au mouvement des grands immeubles causant ainsi un dépointage optique.

Le maintien d'une liaison performante implique que la puissance sur la zone active de la photodiode doit être dans l'intervalle borné par la sensibilité du récepteur  $P_s$  et par la puissance de saturation du récepteur  $Pr_{\text{max}}$ .

Le but du logiciel développé dans cette thèse 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 la marge (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, aux nuages ...etc.

Le tableau 5.1 donne un exemple d'application de calcul de marge brute pour un équipement FSO opérant à  $0,850 \mu\text{m}$  à travers une distance de 500 mètres dont l'affaiblissement moléculaire correspondant à cette longueur d'onde est de l'ordre de 0,205 dB.

Puissance d'émission	9 mW (9, 54 dBm)	80 mW (19 dBm)
Distance du lien	500 mètres	500 mètres
Sensibilité	-38, 23 dBm	-38, 23 dBm
Divergence du faisceau	2 mrad	1 mrad
Surface de capture	0, 005 m <sup>2</sup>	0, 002 m <sup>2</sup>
Aff. Géométrique	21,96 dB	19, 92 dB
Pertes système	0 dB	0 dB
<b>Marge brute</b>	<b>25, 60 dB</b>	<b>37,10 dB</b>
<b>Marge brute Spécifique</b>	<b>51,2 dB/Km</b>	<b>74,2 dB/Km</b>

**Tab. 5.1** Exemples de Marge brute d'une liaison de 500 m opérant à 0, 850  $\mu$ m

Si la puissance d'émission est égale à 9 mW, cela correspond en effet à une puissance à l'émission en dBm qui vaut :

$$p_e = 10 \log_{10} \frac{9mW}{1mW} = 9.54 \text{ dBm} \quad (5.2)$$

La marge brute spécifique de la liaison est donnée par :

$$M_{Liaison} (dB / Km) = \frac{1000m}{l} M_{Liaison} (dB) \quad (5.3)$$

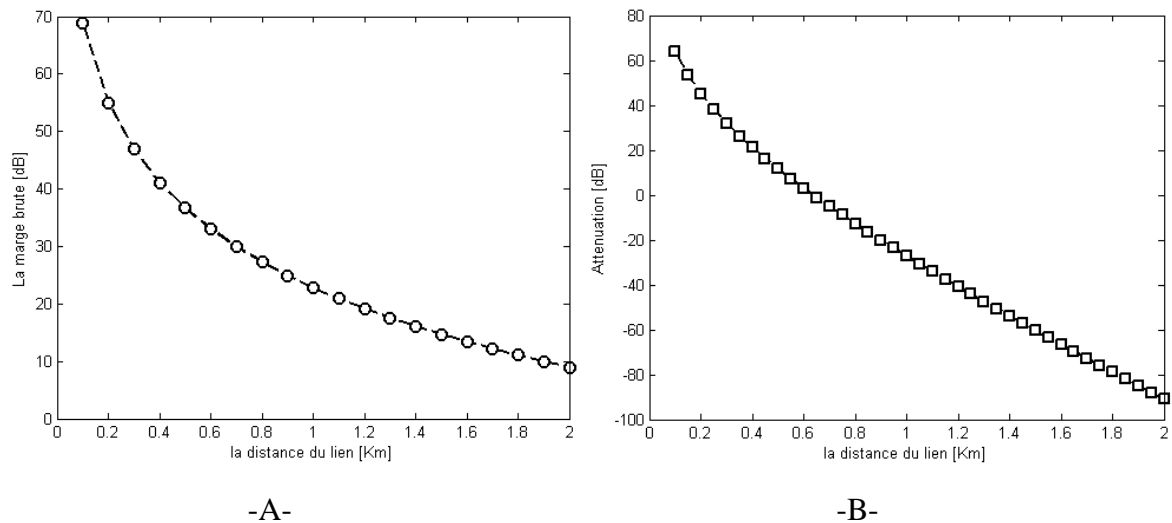
Pour  $M_{liaison} = 25,6 \text{ dB}$

on a :  $M_{liaison.S} = 52,2 \text{ dB/km}$

C'est évident que dans une atmosphère claire, un lien FSO peut avoir des centaines, voir 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 maximal 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 quel 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.

La courbe 5.1.A présente la marge d'une liaison FSO (avec des paramètres donnés) en fonction de la distance entre les deux extrémités de la liaison, et la courbe 5.1.B présente l'atténuation en fonction de la distance. La première courbe fournit la marge brute « Extra power » 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.



**Fig. 5.1** -A- Marge brute d'une liaison en fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur.  
B- :L'atténuation géométrique en fonction de la distance

## 2.1 Atténuation 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 (ex: pluie, brouillard, neige), d'autres sont liés aux constituants atmosphériques (par exemple les molécules gazeuses) qui sont présents naturellement dans l'atmosphère. L'affaiblissement moléculaire ou l'affaiblissement linéique par temps clair 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 5.2. [58].

Longueur d'onde (nm)	$A_{sp}$ Absorption moléculaire spécifique (dB/km)
550	0.13
690	0.01
870	0.41
850	0.41
1550	0.01

**Tab. 5.2** Valeurs de l'affaiblissement moléculaire (dB/km) dû à la composition de l'atmosphère pour quelques longueurs d'onde utilisées dans les systèmes FSO.

On peut dire que l'atténuation moléculaire aura moins d'effet sur la performance des systèmes FSO comparée à d'autres facteurs d'atténuation.

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

$$A_{mol} \text{ (dB)} = A_{sp} (\lambda) * l \text{ dB} \quad (5.4)$$

Où :

$A_{sp}$  est l'atténuation moléculaire spécifique (dB/km).

$l$  est la distance entre l'émetteur et le récepteur (Km).

$A_{mol}$  est l'atténuation moléculaire totale (dB).

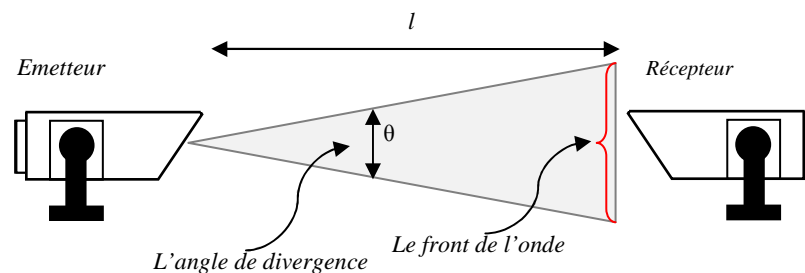
*Exemple:*

$$l = 271 \text{ m}, \lambda = 850 \text{ nm}, \text{ donc, } A_{sp} = 0.41 \text{ dB/km}$$

$$A_{mol} = 0.271 \times 0.41 = 0.111 \text{ dB.}$$

## 2.2 Affaiblissement géométrique

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



**Fig. 5.2** Les paramètres pour calculer l'atténuation géométriques

Dans certains systèmes FSO qui utilisent le suivi actif, cette divergence peut être assez faible. Par contre dans les systèmes qui ne l'utilisent pas, la divergence est une méthode utilisée pour simplifier l'alignement et le suivi nécessaires au déploiement des liaisons FSO de telle sorte qu'une partie du faisceau atteigne toujours le récepteur, et la liaison sera maintenue.

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 au niveau du récepteur ( $S_{capture}$ ) et la surface du spot de l'onde à une distance  $l$  ( $S_l$ ), (figure 5.2). L'affaiblissement géométrique dans un système FSO est donné par la relation suivante [59]:

$$A_{geo} = \frac{S_l}{S_{capture}} \quad (5.5)$$

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  $\tan(\theta/2) \approx \theta/2$ . Par conséquent, le rayon du spot à une distance  $l$  vaut  $l.\theta/2$ , de ce fait que la surface du spot s'écrit :

$$S_l = \frac{\pi}{4}(l.\theta)^2 \quad (5.6)$$

L'affaiblissement géométriques dans un système FSO est donné par :

$$A_{geo} = 10.\log \frac{S_l}{S_{capture}} = 10.\log \left[ \frac{\pi/4.(l.\theta)^2}{S_{capture}} \right] \text{dB} \quad (5.7)$$

Où :  $l$  est la distance émetteur-récepteur, (en km)

$S_{capture}$  est la surface de capture du récepteur (en  $m^2$ ),

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

L'affaiblissement géométrique est une 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.

### 2.3 Les Pertes du système

La première source de pertes dans un système optique en espace libre 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 absorbé [60]. 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 [61].

### 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, la neige, 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 est variée. Les courtes ruptures (de quelques millisecondes) peuvent ne pas être remarquées par les utilisateurs (par exemple une connexion à internet). 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, neige...) 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.

### 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 (Tab. 5.3) [61]. 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 optique élimine les pertes dues à l'effet d'absorption. Toutefois, la théorie de Mie exige des informations détaillées sur les paramètres, comme la taille des particules de brouillard, l'indice de réfraction, distribution granulométrique etc. qui ne peuvent être facilement disponibles sur une place d'installation donnée. En outre, elle implique des calculs complexes.

<i>Type</i>	<i>Rayon (<math>\mu\text{m}</math>)</i>
Molécules d'aire	0,0001
Brouillard	1 à 20
Pluie	100 à 10000
Neige	1000 à 5000
Grêle	5000 à 50000

**Tab. 5.3** 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 5.1:** 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 POM et mesurée à l'aide d'un Transmissomètre ou d'un Diffusiomètre [62].

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

$$\alpha_{\text{brouillard}} = \frac{3,912}{v} \left( \frac{\lambda_{\mu m}}{0.55 \mu m} \right)^{-q} \text{ dB} \quad (5.8)$$

Où  $v$  est la visibilité

$\lambda$  est la longueur d'onde.

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

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

$$q = \begin{cases} 1.6 & \text{Si } v > 50 \text{ km} \\ 1.3 & \text{Si } 6 \text{ km} < v < 50 \text{ km} \\ 0.585 v^{1/3} & \text{Si } v < 6 \text{ km} \end{cases} \quad (5.9)$$

L'équation (5.9) 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 [28] est donné par:

$$q = \begin{cases} 1.6 & \text{Si } v > 50 \text{ km} \\ 1.3 & \text{Si } 6 \text{ km} < v < 50 \text{ km} \\ 0.16 v + 0.34 & \text{Si } 1 \text{ km} < v < 6 \text{ km} \\ V - 0.5 & \text{Si } 0.5 \text{ km} < v < 1 \text{ km} \\ 0 & \text{Si } v < 0.5 \text{ km} \end{cases} \quad (5.10)$$

Al Nabulsi [6] a proposé une autre relation pour prédire l'atténuation due au brouillard en caractérisant deux types, d'advection et de rayonnement séparément.

- *Le brouillard d'advection* : 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 sont 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:

$$\gamma_{adv}(\lambda) = \frac{0,11478\lambda + 3,3867}{v} \quad (5.11)$$

- *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:

$$\gamma_{rad}(\lambda) = \frac{0,18126\lambda^2 + 0,13709\lambda + 3,7502}{v} \quad (5.12)$$

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

$$a_{spec} = \frac{10}{\ln(10)} \gamma(\lambda) \quad \text{dB/Km} \quad (5.13)$$

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.

### 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 (200-2000  $\mu\text{m}$ ) [63] est significativement plus grand que les longueurs d'onde typiques utilisées dans les systèmes FSO. Les technologies RF sans fil 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 [64] :

$$\text{Aff}_{\text{pluie}} = 1,076 * R^{0,67} \text{ dB/km} \quad (5.14)$$

L'intensité 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.

### 3.3 Atténuation due à la neige

Les flocons de neige sont généralement plus grands que les gouttes de pluie et causent beaucoup plus de fluctuations d'intensité et une atténuation importante du signal reçu. L'affaiblissement dû à la neige est une fonction de la longueur d'onde utilisée  $\lambda$  (nm) et de l'intensité  $S$  (mm/h) de précipitation selon les deux relations suivantes [65,66]:

1. Pour la neige au dessous de 500 m d'altitude (Neige humide) on a:

$$\text{Aff}_{\text{neige}} = (0,0001023\lambda_{\text{nm}} + 3,7855476) \times S^{0,72} \text{ dB/km} \quad (5.15)$$

2. Pour la neige au-dessus ou égale à 500 m d'altitude (Neige sèche) on a:

$$\text{Aff}_{\text{neige}} = (0,0000542\lambda_{\text{nm}} + 5,4948776) \times S^{1,38} \text{ dB/km} \quad (5.16)$$

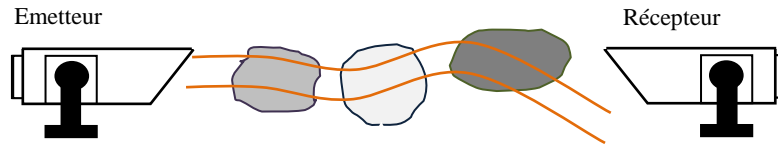
L'intensité de précipitation de la neige (taux de précipitations) est le paramètre fondamental employé pour décrire localement la neige. Sa mesure est relevée dans les stations météorologiques.

Connaissant la marge de la liaison, nous pouvons déduire la probabilité d'interruption de la liaison due à la neige.

### 3.4 Les effets de scintillations

Le désert peut paraître l'endroit parfait pour le déploiement des systèmes FSO. Cela est certainement vrai quand l'atténuation de l'atmosphère est concernée. Mais 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) [67] et de différentes températures (figure 5.3). 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, quand elles sont petites, le faisceau est élargi.



**Fig. 5.3** Cellules d'air avec différents indice de réfraction dans le trajet d'une liaison FSO

Le paramètre de structure de l'indice de réfraction  $Cn^2$  représente un bon outil de mesure de la turbulence [68]. Ce n'est pas facile à mesurer ce paramètre, il dépend de la température, de la vitesse du vent, de l'altitude, de l'humidité, et de la pression atmosphérique [69] 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 [70] :

$$Cn^2 = \begin{cases} 10^{-13} \text{ m}^{-2/3} & \text{pour forte turbulence;} \\ 10^{-14} \text{ m}^{-2/3} & \text{pour turbulence modérée;} \\ 10^{-16} \text{ m}^{-2/3} & \text{pour faible turbulence.} \end{cases}$$

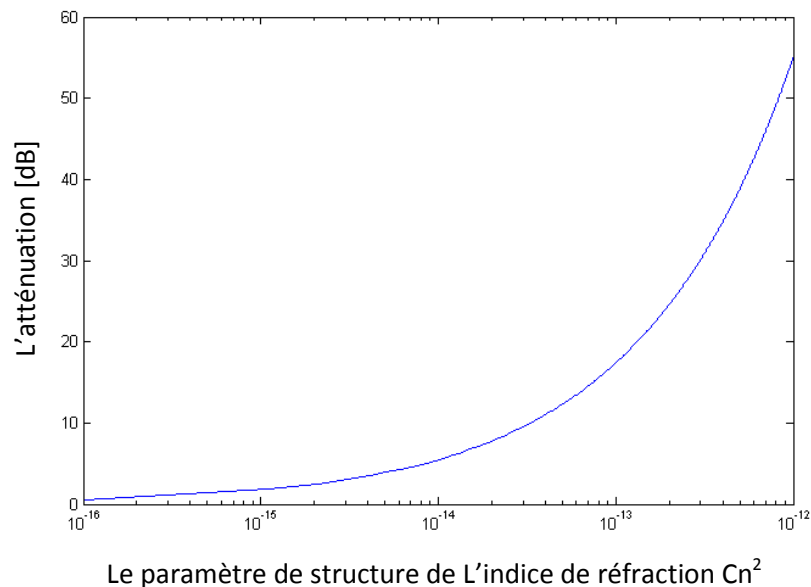
Généralement  $Cn^2$  est plus important près du sol. Pour minimiser les effets de la scintillation sur la voie de transmission, les systèmes FSO ne doivent pas être installés à proximité des surfaces chaudes (toits de goudron). Il est recommandé que les unités FSO soient installées un peu plus haut 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 :

$$a_{\text{sin}} = 2\sqrt{23,17 \left( \frac{2\pi}{\lambda} 10^9 \right)^{7/6} Cn^2 . l^2} \text{ [dB]} \quad (5.17)$$

Où  $\lambda$  représente la longueur d'onde de l'émetteur [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 5.4.



**Fig.5.4** 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* » [71]. D'autre part, il est important de noter que les systèmes FSO conçus pour une haute disponibilité dans un lieu continental typique avec pluie, neige et brouillard, ne peuvent pas être affectés par ce genre turbulence [72].

### 3.5 Interférence solaire

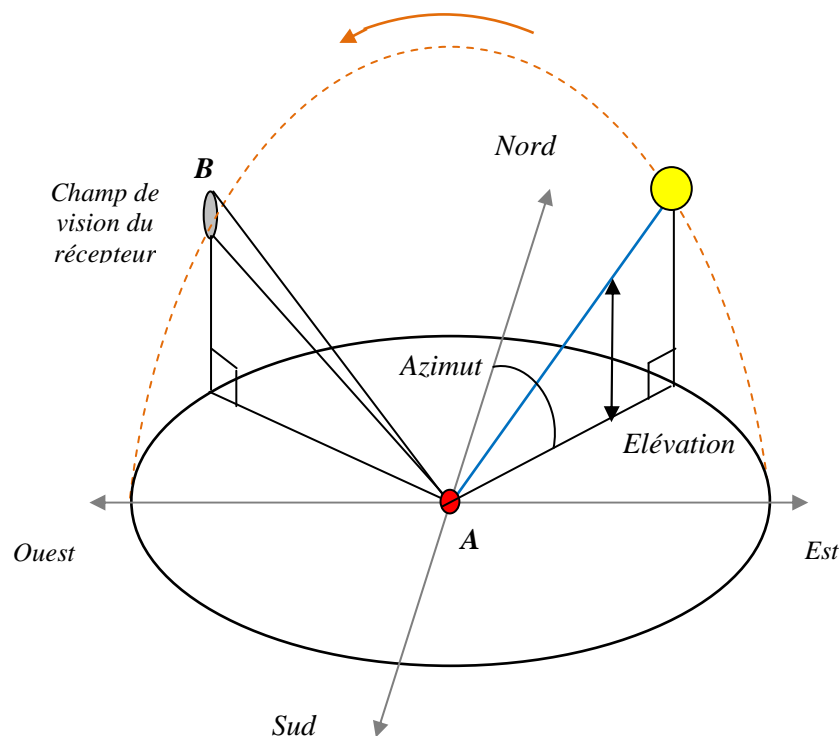
Pour un système FSO qui utilise un récepteur très sensible avec une lentille à grande ouverture, la lumière naturelle peut potentiellement interférer avec le signal utile reçu. Dans certaines circonstances, la lumière directe du soleil peut entraîner des pannes de la liaison pour des durées de plusieurs minutes quand le soleil est dans le champ de vision du récepteur (FOV *Filed 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 [73].

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 réfléchié par une surface de verre est également possible [74].

### 3.5.1 Trajectoire du soleil

La figure 5.5 représente schématiquement les aspects géométriques tels que les angles d'élévation ( $Els$ ) et d'azimut ( $Azs$ ) 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 ( $\Delta El$ ).



**Fig. 5.5** Représentation schématique de la course du soleil vis-à-vis d'une liaison optique atmosphérique.

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.

### 3.5.2 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 Watts/m<sup>2</sup>, elle est définie par la relation suivante [75] :

$$Power = 1200 * \cos\left(\frac{\pi}{2} - Elv\right) \quad (5.18)$$

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

$$P_{solaire} = F_{solaire} * Power * Cap.surface * \frac{Bande_{recepteur}}{100} \quad (5.19)$$

Où :

- $F_{solaire}$  est la puissance spectrale du soleil,
- $Cap.Surface$ : est la surface de capture du récepteur,
- $Bande_{recepteur}$  est la largeur de bande du récepteur.

La densité du flux solaire en fonction de la longueur d'onde (nm) et de la puissance  $F_{solaire}$  est donnée par la relation suivante :

$$F_{solaire} = (\alpha 10^{-13} \lambda^5) - (\beta 10^{-9} \lambda^4) + (\gamma 10^{-6} \lambda^3) - (\mu 10^{-3} \lambda^2) + (\delta \lambda) - (\theta 10^2) \quad (5.20)$$

Avec :

$$\alpha = 8.97162055148876$$

$$\beta = 4.649127391289745$$

$$\gamma = 9.37072684333339$$

$$\mu = 9.066632383289905$$

$$\delta = 4.05479801934347$$

$$\theta = 5.70237282654237$$

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

Les conditions de réception de la lumière du soleil dans le récepteur sont :



$$\begin{cases} E_s \in [E_l - \Delta E_l, E_l + \Delta E_l] \\ A_s \in [A_l - \Delta A_l, A_l + \Delta A_l] \end{cases} \quad (5.21)$$

Ou

$$\begin{cases} E_s \in [-E_l - \Delta E_l, -E_l + \Delta E_l] \\ A_s \in [(A_l + \pi) - \Delta A_l, (A_l + \pi) + \Delta A_l] \end{cases} \quad (5.22)$$

Où :  $\Delta E_l = \Delta A_z = 4\theta/2$  ( $\theta$  étant la divergence du faisceau).

Nous signalons que le calcul de la durée d'exposition des récepteurs FSO aux rayons solaires est déterminé de la façon suivante : Pour chaque valeur de temps jour, mois, heure, minute et seconde de l'année on évalue l'azimut, l'élévation et la puissance rayonnée par le soleil et on calcule le nombre de cas où les conditions précédentes sont satisfaites.

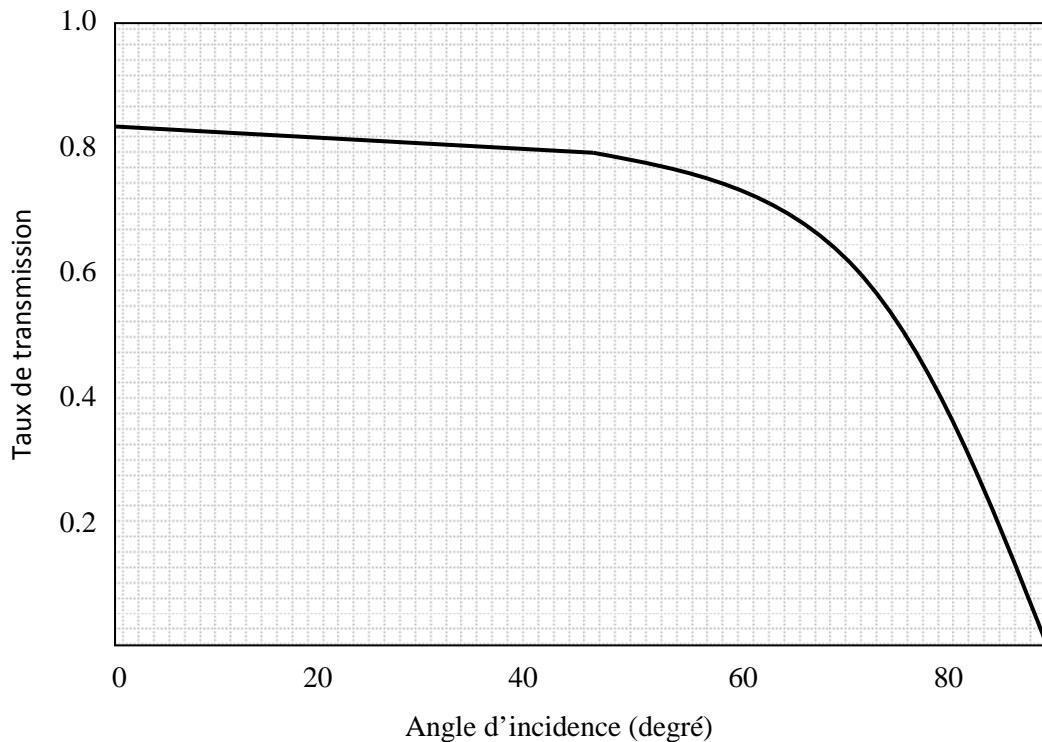
#### 4. Installation des unités FSO derrière les fenêtres

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) 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 [76].

Le taux de transmission d'un vitrage en fonction de l'angle d'incidence du rayon lumineux est donné sur la figure 5.6 [77].

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  $i = 90^\circ$ .



**Fig. 5.6** Taux de transmission d'un vitrage en fonction de l'angle d'incidence du rayon lumineux

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:

$$\frac{I_s}{I_0} = (1 - R)^2 e^{-\alpha e} \quad (5.23)$$

Où  $\alpha$  est le coefficient d'absorption de la vitre et  $R$  est le coefficient de réflexion de la vitre [77].

$$R = \frac{1}{2} \left[ \frac{\operatorname{tg}^2(\theta_r - \theta) + \sin^2(\theta_r - \theta)}{\operatorname{tg}^2(\theta_r + \theta) + \sin^2(\theta_r + \theta)} \right] \quad (5.24)$$

Où :  $\theta$  et  $\theta_r$  sont les angles d'incidence et 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* « WAM ») [78] permet de mesurer l'atténuation des rayons laser à travers les fenêtres sans accéder aux deux côtés d'une fenêtre.

## 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 (Tab. 5.4). 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.

Emetteur <i>Intérieur</i>	Canal atmosphérique <i>Extérieur</i>	Récepteur <i>Intérieur</i>
La puissance optique P(w)	Atténuation atmosphérique (dB)	Le diamètre des lentilles (cm)
La bande passante B (hz)	Les pertes de scintillations (dB)	Efficacité de la diode
La longueur d'onde $\lambda$ (nm)	La distance (L)	Bruit d'amplification
Les pertes optiques (dB)	Les pertes de pointage (dBm)	Les pertes optiques
L'angle de divergence (mrad)	Visibilité (m)	Champ de vision (mrad)

**Tab. 5.4** 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 (Tab. 5.5). Pour une disponibilité de 9.999 % le lien devrait être indisponible quatre minutes seulement par mois. [79].

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 [80].

<i>Disponibilité</i>	<i>Temps de rupture par année</i>	<i>Temps de rupture par mois</i>	<i>Temps de rupture par semaine</i>
99.9%	8.76 heures	43.2 min	10.1 min
99.99%	52.6 min	4.32 min	1.01 min
99.999%	5.26 min	25.9 s	6.05 s
99.9999%	31.5 s	2.59 s	0.605 s

**Tab. 5.5.** 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  $T_{up} + T_{Down}$  [81]:

$$Dis(\%) = \frac{T_{up}}{T_{up} + T_{down}} \cdot 100 \quad (5.25)$$

## 6. Description du logiciel développé

Le logiciel appelé « **WOCL.Predi** », développé dans le cadre de cette thèse est un outil de simulation, destiné aux concepteurs de réseaux optiques atmosphériques, d'utilisation simple, permettant d'évaluer la qualité de service d'une liaison FSO en fonction de la disponibilité. Il s'appuie sur les bases statistiques locales des différents paramètres climatiques auxquels la liaison sera exposée et les caractéristiques techniques des équipements.

Ce logiciel est un outil d'aide à la décision dans la planification d'infrastructures de liaisons haut débit de courtes distances. Il pourrait être un outil intéressant pour les acteurs qui déploient des infrastructures de transfert de données à très haut débit : opérateurs télécom, intégrateurs de systèmes télécom, fournisseurs de solutions de télécom, installateurs, sociétés de conseil en télécom, grandes entreprises, collectivités locales, opérateurs de diffusion média... etc.

Comparé à d'autres logiciels développés dans le domaine, « WOCL.Predi » permet une évaluation instantanée et une évaluation de disponibilité à long terme (pendant une année). Le logiciel développé prend en compte le cas où les unités de transmission et de réception FSO sont installées derrière des fenêtres. Il consiste en un outil statistique composé d'un IHM (Interface Homme Machine) et d'un noyau de calcul mettent en œuvre les différents phénomènes physiques responsables de la rupture du lien, et une base de données pour fournir les statistiques des effets atmosphériques enregistrés durant une année. L'outil développé se compose de quatre écrans: l'écran de saisie des données, et trois écrans pour la présentation des résultats.

### **6.1 L'écran de saisie des données d'entrée**

L'écran de saisie des données d'entrée du logiciel est constitué de six blocs d'information sur les différents paramètres caractérisant la liaison optique atmosphérique, qui sont (figure 5.7):

- Données caractérisant le site d'implantation de la liaison (latitude, longitude, altitude, hauteur par rapport au sol, etc.),
- Données caractérisant les équipements utilisés (nombre d'émetteurs, puissance, diamètre, divergence, etc.),
- Données communes relatives aux points de communications (visibilité, zone horaire, etc.);
- Données communes relatives aux équipements (angle de divergence, longueur d'onde, perte du système);
- Données relatives aux conditions climatologiques (utilisées dans le cas de la prédiction instantanée).

La prédiction à long terme doit être calculée sur une année donnée. Les statistiques des effets atmosphériques pour le lieu concerné doivent être disponibles le long de cette année. Dans ce cas, la disponibilité est donnée en pourcentage. Dans le cas de la disponibilité instantanée, les effets atmosphériques peuvent être entrés directement dans les champs de l'écran de saisie, et la disponibilité est définie par la possibilité ou l'impossibilité de la connexion.

The screenshot shows a software window titled 'File Help' with a 'Sites data' section. It contains two columns for 'Site 1' and 'Site 2'. Each site has fields for Name, Latitude (dms), Longitude (dms), Altitude (m), High/Ground (m), and Window thickness (mm). Below these are 'Equipements Data' fields: Translitters Nbr, Power/Sensibility (dBm), Diametre (cm), Divergence (mrad), and Bandwidth (nm). A 'Shared site data' section at the bottom includes Visibility (km), Time (hh mm ss), Date, and UTC. To the right, 'Atmo conditions' includes Rain, Snow, Intensity (mm/h), Fog, and Turbulence. A 'Shared equipemets data' section includes Wavelength (nm), Data Rate (Mbps), and System loss (dB). Buttons for 'Calculate', 'Reset', and 'Quit' are at the bottom.

Fig. 5.7 L'écran de saisie des données

A partir du menu *Fichier* du logiciel, l'utilisateur peut choisir le type de prédiction; *prédiction instantanée* ou *prédiction à long terme*. Il ya des entrées communes entre les deux types de prédiction, et d'autres entrées sont soit actives ou inactives selon le type de prédiction sélectionnée par l'utilisateur. Pour la prédiction instantanée tous les champs sont actifs, mais dans le cas de la prédiction à long terme les entrées du bloc « *Atmo-conditions* », la visibilité et l'heure du bloc « *shared sites data* » (données communes des sites) sont inactives (figure 5.7).

Les tableaux 5.6 et 5.7 présentent un exemple des données d'entrées utilisées par la suite dans notre calcul.

<i>Latitude (dms)</i>	0.148737	0.14696
<i>Longitude (dms)</i>	34.858292	34.853397
<i>Altitude (m)</i>	486	490
<i>Hauteur par rapport au sol (m)</i>	12	25

Tab. 5.6 Les caractéristiques des sites de communication

	Émission	Réception
Nombre d'émetteurs	1	/
Puissance d'émission/ sensibilité (dBm)	20	-30
Diamètre (m)	0.1	0.15
Divergence (mrad)	2	3
Bande passante (nm)	/	100
Longueur d'onde (nm)	550	

**Tab. 5.7** Les caractéristiques des équipements de communication

## 6.2 Présentation des résultats

A travers un exemple, on va montrer le fonctionnement du logiciel développé en utilisant les modèles théorique discutés précédemment. A partir des données météorologiques permettant de caractériser l'atmosphère terrestre, et des caractéristiques techniques des systèmes FSO, un bilan de fonctionnement de la liaison va être établi

### a) Caractéristiques de la liaison

Nous allons présenter les caractéristiques techniques de la liaison optique atmosphérique et décrire le site de déploiement de la liaison.

➤ *Le spot du faisceau (Beam Spot, Bs)*: La surface du rayon laser au niveau du plan de réception est donnée par cette formule :

$$Bs \text{ (m)} = l \cdot \text{tang} (\theta) \quad (5.26)$$

Où :  $l$  est la distance, ( $l=0,797$  km), et  $\theta$  est l'angle de divergence, ( $\theta=2$  mrad).

$$Bs = 0.797 \times 2 = \mathbf{1,59 \text{ m}}$$

En utilisant un diamètre de surface de capture de 0,12 m on obtient un affaiblissement géométrique (5.7) égale à :

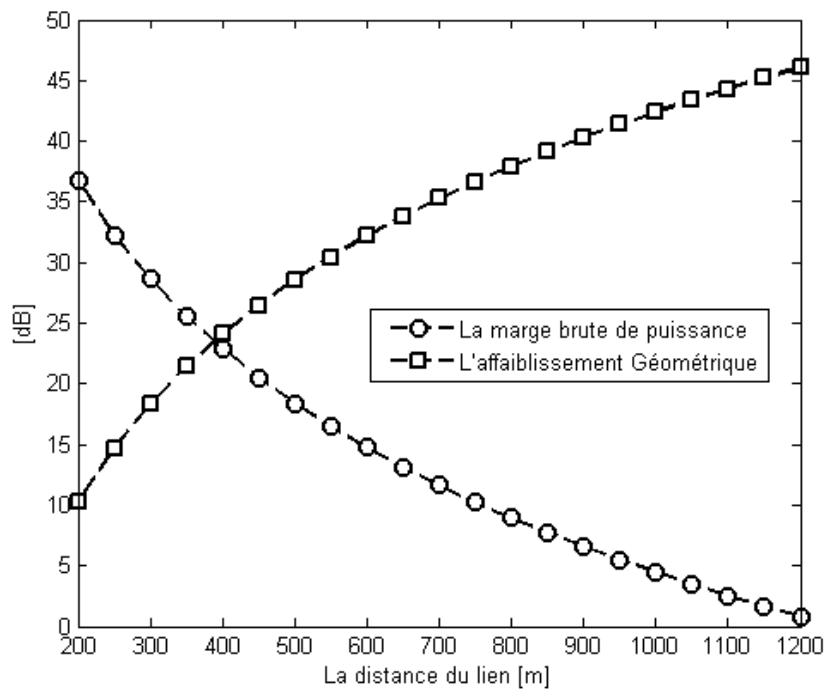
$$A_{geo} = 10 \cdot \log \frac{S_{trans}}{S_{capture}} = 10 \cdot \log \left[ \frac{\pi / 4 \times (797 \times 2)^2}{\pi \cdot (0.12)^2} \right] = \mathbf{37.88 \text{ dB}}$$

Les pertes relatives au système ( $\sum P_{sys}$ ) sont considérées égales à 2 dB. L'affaiblissement moléculaire à une longueur d'onde de 550 nm dans l'atmosphère claire est de l'ordre de 0,12 dB/km. La puissance d'émission et la sensibilité du récepteur sont données dans le tableau 5.7. Ce qui donne une marge brute de puissance pour la liaison :

$$\begin{aligned}
 M_{\text{liaison}} \text{ (dB)} &= P_e + |S_r| - \text{Att}_{\text{Geo}} \text{ (dB)} - \text{Att}_{\text{mol}} \text{ (dB)} - \sum P_{\text{sys}} \text{ (dB)} \\
 &= 20 \text{ dB} + 30 \text{ dB} - 37,88 \text{ dB} - (0,12 \cdot 0,797) \text{ dB} - 2 \text{ dB} \\
 &= \mathbf{10,02 \text{ dB}}
 \end{aligned}$$

La marge brute spécifique de la liaison est donnée par :

$$\begin{aligned}
 M_{\text{Liaison}} \text{ (dB / Km)} &= \frac{1000m}{797} M_{\text{Liaison}} \\
 &= \mathbf{12,56 \text{ dB}}
 \end{aligned}$$



**Fig. 5.8** La marge brute de puissance et l'affaiblissement géométrique en fonction de la distance

La figure 5.8 présente la marge brute de puissance de la liaison et l'affaiblissement géométrique en fonction de la distance émetteur-récepteur ( $l$ ), allant de 200 à 1200 mètres. La figure montre que la marge brute de puissance décroît proportionnellement en fonction de la distance, ce qui montre que la longueur d'une liaison FSO a un grand impact sur la marge brute d'une liaison et par conséquent sur la puissance supplémentaire au niveau de réception qui va être utilisée pour compenser l'atténuation due aux effets climatologiques. Cette simple logique montre un compromis entre la distance et la disponibilité de la liaison FSO sous différentes conditions atmosphérique.



**b) Prédiction à long terme**

Dans la prédiction à long terme, 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 mesure ( $T_{up} + T_{Down}$ ).

L'indisponibilité est alors la période durant laquelle la liaison n'est pas assurée  $T_{Down}$  divisée par la période total d'évaluation:

$$D (\%) = \frac{T_{Down}}{T_{up} + T_{down}} \times 100 \quad (5.27)$$

Le calcul de la disponibilité présenté ici tient compte seulement des coupures suite à des conditions météorologiques et atmosphériques extrêmes. Les effets externes (hormis les effets atmosphériques) tels que les coupures de courant, par exemple, ne sont pas pris en compte dans notre calcul. La disponibilité mesurée est donc reliée seulement aux effets de l'atmosphère sur la propagation du rayon optique.

Dans le cas de la prévision à long terme, un fichier d'entrée donne au noyau de calcul les données suivantes :

- Les intensités de la pluie et la durée,
- Les intensités de la neige et la durée,
- Les jours avec brouillard et la durée,
- Brouillard avec neige et la durée,
- Brouillard avec pluie et la durée,
- Les jours non nuageux avec le paramètre de structure de l'indice de réfraction et la durée,

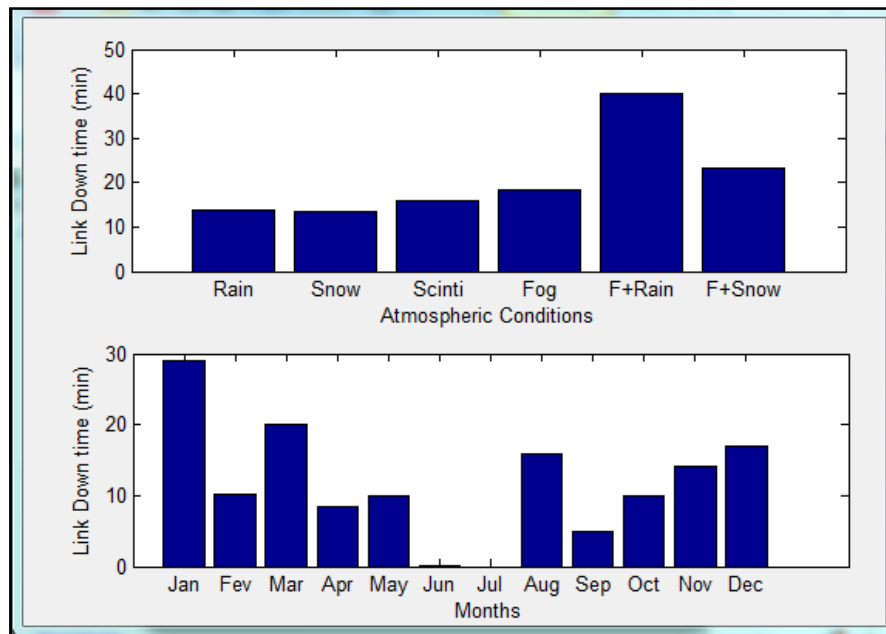
enregistrées pendant une période d'une année, afin de donner la probabilité de connexion sous les conditions météorologiques enregistrées durant la période d'évaluation.

Les résultats de prédiction sont présentés sous forme de deux fenêtres. La première fenêtre se compose de quatre blocs d'information (figure 5.9):

- Les caractéristiques communes du lien,
- la disponibilité instantanée,
- la disponibilité annuelle
- les effets climatologiques annuels.



La deuxième fenêtre de présentation des résultats de prédiction à long terme donne le temps d'indisponibilité par mois pour chaque effet climatologique en deux histogrammes (figure 5.10).



**Fig. 5.10** L'indisponibilité en fonction des mois et en fonction des conditions atmosphériques

On remarque sur la figure 5.10 que l'effet de pluie avec brouillard présente l'influence la plus importante pour une indisponibilité de 41 minutes, et d'après le deuxième histogramme, l'indisponibilité de la liaison est au maximum au mois de janvier avec une indisponibilité de 29 minutes.

### c) Prédiction instantanée

Dans le cas de la prédiction instantanée, la disponibilité est calculée comme étant le montant de puissance supplémentaire reçue par le récepteur (Extra Power).

L'effet choisi dans la prédiction instantanée est la pluie avec une intensité de 10mm/heure.

L'atténuation causée par la pluie est donnée par la relation (5.14).

$$Aff_{\text{pluie}} = 1,076 * 8^{0,67} * (797/1000) \approx \mathbf{3,45 \text{ dB}}$$

L'atténuation causée par les aérosols est calculée par la formule (5.8). Puisque la visibilité est de 1 Km, alors le paramètre  $q$  est égal à 1,3 d'après la relation (5.10).

$$\alpha_{\text{Aerosols}} = \frac{3,912}{14} \text{ dB}$$

$$= \mathbf{0.28 \text{ dB}}$$

Le montant de puissance supplémentaire reçu par le récepteur (Extra Power) est donné par :

$$\begin{aligned}
 EP \text{ (Extra Power)} &= M_{\text{liaison}} - \text{Aff}_{\text{atmo}} - A_{\text{aerosolaire}} \\
 &= 10.02 - 3.45 - 0.28 \\
 &\approx \mathbf{6.3 \text{ dB}}
 \end{aligned}$$

Le bloc de la prédiction instantanée présenté sur la figure 5.11 est composé de :

- L'atténuation climatologique (dB)
- L'atténuation aérosolaire (dB)
- Puissance supplémentaire (Extra power) (dB)

Common Link features	
Link distance (m)	797.503
Beam Spot (m)	1.59501
Link inclination (Deg)	11.1371
Geo att. (dB)	37.8799
Molecular att. (dB)	0.103675
Link Margin (dB)	10.0165
Linear L.Margin (dB/km)	12.5598

Instantaneous availability	
Climat att. (dB)	3.43245
Aerosol att. (dB)	0.279286
Extra power (dB)	6.30471

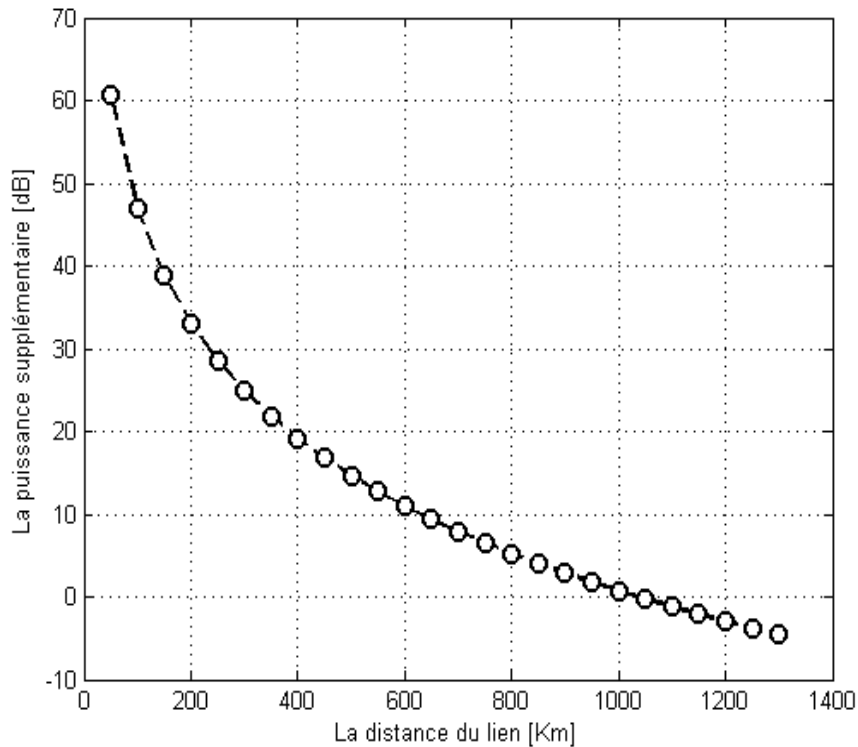
Annual availability		
	Availability %	Unavailability (h)
Aerosol+Snow+Fog+Rain attenuation	0	0

Annual climat Effects			
	Downtime per year (min)	Annual value %	Max value dB
Fog attenuation	0	0	0
Rain attenuation	0	0	0
Snow attenuation	0	0	0
Fog+Rain attenuation	0	0	0
Fog+Snow attenuation	0	0	0
Scintillation attenuation	0	0	0
Sun attenuation	0	0	0

Fig. 5.11 Ecran de récupération des données pour une prédiction instantanée

La figure 5.12 présente la puissance supplémentaire (EP) en fonction de la distance ( $l$ ), allant de 50 à 1300 mètres. La figure montre que la puissance supplémentaire au niveau du récepteur décroît proportionnellement avec la distance, pour  $l$  égale à 50 la puissance supplémentaire est 79.14 dB, et pour  $l=1300$  m la puissance supplémentaire au niveau de récepteur est égale à -3.46 dB.



**Fig. 5.12** La puissance supplémentaire en fonction de la distance

### 6.3 Les fichiers Input/Output

Pour la prévision à long terme, un fichier d'entrée (Excel) doit être disponible, il fournit au noyau de calcul les données suivantes :

- Les intensités de la pluie,
- Les intensités de la neige,
- Les jours avec brouillard,
- La visibilité dans le cas de brouillard + l'intensité de la neige,
- La visibilité dans le cas de brouillard + l'intensité de la pluie,
- Les jours non nuageux+ le paramètre de structure de l'indice de réfraction,

enregistrées pendant une période d'une année, afin de donner la qualité de service d'une liaison optique atmosphérique en termes de probabilité de connexion sous les conditions météorologiques enregistrées durant la période d'évaluation.

Le document Output est un genre de fichier de rapport, il peut être exploré pour les prévisions à long terme, il rassemble à la fois les données d'entrées saisies par l'utilisateur sur les caractéristiques de la liaison, et les données résultantes donnant la disponibilité et les effets climatologiques sur la prédiction annuelle.

## 7. Conclusion

Les liaisons FSO constituent une alternative aux faisceaux hertziens et aux câbles optiques afin de faire face aux besoins croissants en matière de télécommunication à débits élevés. Le principal inconvénient de leur utilisation est le rôle néfaste que peut jouer l'atmosphère sur la transmission du rayonnement, et donc sur la disponibilité et la fiabilité du système. La sévérité et la durée de ces effets vont affecter la distance et la disponibilité de la liaison.

La disponibilité d'une liaison FSO 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 longueurs 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. Plusieurs facteurs entrent en jeu, y compris la fiabilité des équipements, la conception du réseau et les conditions climatiques, telles que la pluie, la neige, le brouillard et la scintillation qui sont fonction des paramètres géographiques et topographiques du site d'installation.

Dans ce chapitre, nous avons présenté un logiciel développé "WOCL.Predi" qui permet 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. Nous avons présenté les différentes fonctionnalités du logiciel. À partir des données des équipements, de la localisation géographique et des paramètres climatiques et atmosphériques (brouillard, neige, pluie, etc.) la marge de liaison, les probabilités d'interruption pour chaque type d'atténuation (aérosols, scintillation, lumière ambiante, pluie, neige, etc.) sont données. La disponibilité est donnée en pourcentage dans la prédiction à long terme, et citée en termes de puissance supplémentaire (Extra Power) dans le cas de la prédiction instantanée.

"**WOCL.Predi**" 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 utile dans le domaine de la simulation et de la modélisation pour tous les spécialistes qui mettent en œuvre des liens de communication FSO à très haut débit.

# *Conclusion générale et perspectives*

Le marché des communications sans fil à haut débit, est partagé entre les transmissions radio haute fréquence et les transmissions optiques en espace libre qui gagnent de plus en plus de parts de marché des télécommunications sans fil. 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 type de modulation compatible 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. Dans un premier temps et pour résoudre ce problème, on a introduit deux méthodes de modulation hybrides, basées sur la combinaison de PAM-MPPM et de PWM-MPPM respectivement. Les deux approches résolvent le problème de synchronisation, et elles présentent une amélioration remarquable en termes de débit et d'efficacité spectrale, avec un avantage à la combinaison PAM-PPM par rapport à la combinaison PWM-MPPM. Le seul inconvénient de ces deux méthodes de modulations est la dégradation dans l'efficacité en puissance.

Dans un deuxième temps on a présenté une autre modulation hybride appelée Multi-Pulse Dual Amplitude-Width Modulation (MPDAWM), présentée sur la base de MPPM, PAM et PWM, pour avoir le maximum de débit et une amélioration significative en termes d'efficacité énergétique et spectrale, l'information est présentée au sein des symboles par combinaison Position-Amplitude-Largeur. Dans le même contexte, on a proposé une autre méthode de modulation hybride en combinant les techniques DPIM, PAM et PWM. Cette combinaison présente une bonne amélioration en termes de débit et d'efficacité spectrale, en revanche, elle est moins performante en termes d'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 meilleure 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 disponible.

La détermination des meilleures conditions de disponibilité et de qualité de service requises (QoS) pour une liaison de communication de type FSO nécessite une étude précise, théorique et expérimentale pour pouvoir établir, d'une manière précise, la disponibilité d'une telle liaison. Dans cette thèse, on a essayé de mettre en évidence l'influence de l'atmosphère et de ses différents constituants sur la propagation d'un faisceau laser. On a utilisé des modèles théoriques pour développer un logiciel "WOCL.Predi" qui permet 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.). Nous avons présenté les différentes fonctionnalités logicielles. Comparé à d'autres logiciels développés dans le domaine, le logiciel développé «WOCL.Predi » fourni la prévision instantanée ainsi que la prévision à long terme, et il prend en compte le cas où les unités FSO sont installées derrière des fenêtres.

Le logiciel développé est un outil essentiel pour l'étude et le choix technique des infrastructures FSO et la de 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.

# B

# Bibliographie

- [1] Mohammed O. Zaatari, "Wireless Optical Communications Systems in Enterprise Networks". The Telecommunications Review, 2003.
- [2] <http://inventors.about.com/>
- [3] D. Killinger, "Free space optics for laser communication through the air". Optics & Photonics News, vol. 13, pp. 36-42, Oct. 2002.
- [4] R. W. Burns. "Communications: An International History of the Formative Years (History of Technology Series)". Publié par: Institution of Electrical Engineers, London, 1998.
- [5] I. Kim, "10 G FSO systems position technology for the future". Lightwave online pp. 19-21, Juillet. 2009.
- [6] Maher Al Naboulsi, "Contribution à l'étude des liaisons optiques atmosphériques, propagation, disponibilité et fiabilité", Thèse de doctorat, l'université de bourgogne. 2005.
- [7] Site officiel du constructeur MRV ([www.mrv.com](http://www.mrv.com))
- [8] D. Killinger, "Free space optics for laser communication through the air" Optics & Photonics News, vol. 13, pp. 36-42, Oct. 2002.
- [9] Site officiel de l'autorité de régulation de la poste et des télécommunications ([www.arpt.dz](http://www.arpt.dz))
- [10] H. Willebrand et B. S. Ghuman, "Free Space Optics: Enabling Optical Connectivity in today's network. Indianapolis", SAMS publishing, 2002.
- [11] A. K. Majumdar et J. C. Ricklin, "Free-Space Laser Communications: Principles and Advances". New York: Springer, 2008.
- [12] A. Acampora, "Last mile by laser," Scientific American, June 17. 2003.
- [13] 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, November. 2004
- [14] <http://www.lightpointe.com/>
- [15] Mezien Imane "Liaison Optique Inter-satellitaire" thèse de magistère, université de Tlemcen. 2010.
- [16] Understanding the performance of free-space optics, white papers ([www.lightpointe.com](http://www.lightpointe.com)).
- [17] Heinz Willebrand, et Baksheesh S. Ghuman, "Free-Space Optics: Enabling Optical Connectivity in Today's Networks".Sams Publishing. 2002.
- [18] 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.
- [19] M. V Raghavendra, "Optical Wireless Communication Link Design". (International Journal of Computer Science and Technology) IJCST Vol. 1, Issue 2, December 2010.
- [20] 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, October 2009.
- [21] Sugianto Trisno "Design and Analysis of Advanced Free Space Optical Communication Systems". Thèse de doctorat, Université de Maryland. Washington, D.C. USA. 2006.

- [22] Roberto Ramirez-Iniguez, Sevia M. Idrus et Ziran Sun, "Optical Wireless Communications, IR for Wireless Connectivity", publié par Taylor & Francis Group. 2008.
- [23] O. Bouchet, H. Sizun, C. Boisrobert, F. de Fornel et P.-N. Favennec "Optique sans fil. Propagation et communication". par. Hermès/Lavoisier 2004.
- [24] C. Andrews. "Field Guide to Atmospheric Optics Larry". University of Central Florida. SPIE Field Guides. Volume FG02. SPIE press Bellingham, Washington USA.2004.
- [25] Youngseob KIM. "Modélisation de la qualité de l'air: Évaluation des paramétrisations chimiques et météorologiques". Thèse de doctorat de l'Université Paris-Est .2011.
- [26] Michael Bass. Handbook of Optics. Volume V. "Atmospheric Optics, Modulators, Fiber Optics, X-Ray and Neutron Optic".Third Edition.2010.
- [27] Allen Geiger ; Chueh Ting ; Edward J. Burlbaw ; Jianwu Ding et Shinn-Der Sheu, "3.5 micron free-space laser communications", SPIE; <http://dx.doi.org/10.1117/12.682557>
- [28] Recommendation ITU-R P.1817-1 (02/2012). Propagation data required for the design of terrestrial free-space optical links . P Series Radiowave propagation. L'union internationale de télécommunications. (<http://www.itu.int>).
- [29] Arun K. Majumdar et Jennifer C. Ricklin. "Free-Space Laser Communications Principles and Advances". Springer.2008.
- [30] Sheldon Kay Friedlander, "Smoke, Dust, and Haze: Fundamentals of Aerosol Dynamics", Second Edition, 2000 Oxford University Press, Inc.
- [31] 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, April 2004.
- [32] Maher Al Naboulsi, Hervé Sizun et Frédérique de Fornel, "Fog attenuation prediction for optical and infrared waves". Opt. Eng. 43(2) 319–329, February 2004.
- [33] Vishal Sharma et Gurimandeep 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, October 2012.
- [34] X. Zhu et J. Kahn, "Free-space optical communication through atmospheric turbulence channels," IEEE Trans. on Communications, no. 2, pp. 1293–1300, 2003.
- [35] Sabi S. et Vijayakumar N, "Simulation of a Modem using Digital Pulse Interval Modulation for Wireless Optical Links" 10th National Conference on Technological Trends (NCTT09) 6-7 Nov 2009.
- [36] R.Tripathi, Joseph 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.
- [37] M.Ijaz, O. Adebajo, S. Ansari, Z. Ghassemlooy, 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.
- [38] 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.
- [39] 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.

- [40] 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.
- [41] <http://www.planetmath.org>
- [42] 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.
- [43] <http://soe.northumbria.ac.uk/ocr/>
- [44] Zabih Ghassemlooy, Wasii Popoola et Sujana Rajbhandari. "Optical Wireless Communications: System and Channel Modelling", *Taylor & Francis*.2012
- [45] 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
- [46] Pesek, J, Ijaz, M. ; Ghassemlooy, Z. ; Fiser, O. et Rajbhandari, S. "Measuring the fog attenuation in an indoor free space optical laboratory chamber", International Conference on Applied Electronics (AE), 5-7 Sept. 2012.
- [47] 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
- [48] Mark 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>
- [49] Yu Zeng, Roger Green, et Mark Leeson, "Multiple Pulse Amplitude and Position Modulation for the Optical Wireless Channel", IEEE Transl 2008.
- [50] M. Rouissat, A.R Borsali, et M. Chick-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.
- [51] B. Wilson, et Z. Ghassemlooy, "Pulse time modulation techniques for Optical communications". IEE proceedings-J, vol. 140, no. 6, pp. 346–357. 1993.
- [52] Fan, Yangyu et Green, Roger J, "Comparison of pulse position modulation and pulse width modulation for application in optical communications", Optical Engineering 466, 065001, June 2007.
- [53] M. Rouissat, A.R Borsali, et M. Chick-Bled, "A New Modified MPPM Modulation for High Speed Wireless Optical Communication Systems", Accepté par ETRI journal, (p-ISSN 1225-6463, e-ISSN 2233-7326) (FI 0.9), prévu pour être publié le 1.04.2013.
- [54] Z. Ghassemlooy, A. R. Hayes, N. L. Seed, et E. D. Kaluarachchi, "Digital Pulse Interval Modulation for Optical Communications, " IEEE Commun. Magaz, pp. 95–99. Dec. 1998.
- [55] Mehdi Rouissat, Riad .A Borsali et Mohammed Chick-Bled. "Dual Amplitude-Width Digital Pulse Interval Modulation for Optical Wireless Communications". International Journal of Computer Science Issues. (IJCSI), Mai 2012.
- [56] S. Sheikh Muhammad, P. Köhldorfer et E. Leitgeb, "Channel Modeling for Terrestrial Free Space Optical Links", 7th International Conference on Transparent Optical Networks, 2005, Proceedings of 2005, pp 407 – 410
- [57] O. BouchetII ; T. Marquis ; M. Chabane ; M. Alnaboulsi et H. Sizun "FSO and quality of service software prediction", Proc. SPIE 5892, Free-Space Laser Communications V, 589204 (August 31, 2005);

- [58] M. Chabane, M. Alnaboulsi, H. Sizun, O. Bouchet, "A new quality of service FSO software, SPIE, STRASBOURG", France, 2004.
- [59] 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.
- [60] Heinz Willebrand, Ghuman Baksheesh, "Free-Space Optics: Enabling Optical Connectivity in Today's Networks", Sams Publishing Indianapolis, Indiana, 2002.
- [61] Stamatiou V. Kartalopoulos, R. Hart, "Free Space Optical Networks for Ultra-broad Band Services For Ultra-Broadband Communication Services". John Wiley & Sons Inc, August 2011.
- [62] 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).
- [63] Antonios K. Varelas, "An Investigation of Wireless Solutions for the "Last Mile" . Thèse de doctorat ., Naval Postgraduate School Monterey, California, March 2004
- [64] Carbonneau, T. H . & Wisely, D. R, "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
- [65] Jaybeer Kaur et . M. L Singh , "Comparing the Effect of Fog and Snow Induced Attenuation on Free Space Optics (FSO) and RF Links", IJCST Vol. 3, issue 1, Jan. - Mars 2012
- [66] F. Nadeem, E. Leitgeb , M. S. Awan, "Comparing The Snow Effects on Hybrid Network Using Optical Wireless and GHz Links", IEEE 2009
- [67] Olivier Bouchet, Hervé Sizun, Christian Boisrobert, "Free-Space Optics: Propagation and Communication". John Wiley & Sons, 2006.
- [68] "The Physics of Free-Space Optics" Scott Bloom, PhD Chief Technical Officer AirFiber, Inc. May 2002
- [69] Aleš PROKEŠ, "Modeling of Atmospheric Turbulence Effect on Terrestrial FSO Link", RADIOENGINEERING, VOL. 18, NO. 1, APRIL 2009
- [70] P.S.Ray, "Broadband complex Refractive Indices of Ice and Water", Applied Optics, vol. 11, 1972.
- [71] Mohammad Abtahi, et Leslie A. Ruschn " Mitigating of Scintillation Noise in FSO Communication Links Using Saturated Optical Amplifiers", IEEE Military Communications Conference, 2006. MILCOM 2006.
- [72] A. Prokes, "Atmospheric effects on availability of free space optics systems, ". Optical Engineering, vol. 48, no. 6, 066001, 2009.
- [73] Mohd Supa'at, Abu Bakar Mohammad, "Advances in free space optical technology". First Edition 2007, Published in Malaysia by l'Université de Technologie, Malaysia. 2007.
- [74] Roberto Ramirez-Iniguez, Sevia M. Idrus et Ziran Sun, "Optical Wireless communications". Auerbach Publications. 2008.
- [75] Fixed service applications using Free-Space Optical Links Report ITU-R F.2106-1, (11/2010), international telecommunication union, ITU.2010.
- [76] Eric C. Eisenberg, Jeff C. Adams et Carrie Sjaarda Cornish. "Measurement by Reflection Analysis of Optical Attenuation Through Windows". Optical Wireless Communications IV. Proceedings of SPIE Vol. 4530 (2001).

- [77] 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.
- [78] <http://www.idsa.org/content/content1/terabeam-window-attenuation-meter-wam>
- [79] <http://www.skyfiber.com>.
- [80] I. I. Kim and E. Korevaar, “Availability of free space optics FSO and hybrid FSO/RF systems,” Proc. SPIE 4530, 84–95 2001.
- [81] Nadeem Farukh et Erich Leitgeb, “Simulation Methods for Reliability and Availability of Complex Systems”, Chapter 13 Availability Estimation via Simulation for Optical Wireless Communication. Springer 2010.

## Résumé :

Les liaisons optiques sans fil atmosphériques constituent une technologie complémentaire aux faisceaux hertziens et aux fibres optiques afin de faire face aux besoins croissants en matière de télécommunication à haut débit. 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. Dans notre thèse, on a présenté et analysé expérimentalement les performances des modulations de bases utilisées dans les systèmes FSO; OOK PPM et MPPM sous un brouillard contrôlé, et on a aussi présenté de nouveaux concepts de modulation hybrides (*AH-MPPM*, *AH-MPDWM*, *MPDAWM*) pour les différents systèmes de communications FSO. D'autre part, on a présenté un logiciel «*WOCL-Predi*» développé pour déterminer la qualité de service des liaisons FSO sous différentes conditions atmosphériques.

**Mot Clés :** *liaison optique sans fil, modulation hybride, WOCL-Predi, AH-MPPM, AH-MPDWM.*

## Abstract:

Wireless Optical Communications or Free Space Optic (FSO) is a complementary technology to microwave and optical fiber to meet the growing needs in telecommunications at high data rates. In 2008, the first FSO link with 10 Gbps was introduced on the market, making it the fastest wireless technology available in the market. In this thesis, we have presented and experimentally analyzed the performance of the basic modulations used in the FSO systems; OOK PPM and MPPM in a controlled fog, and also introduced new concepts of hybrid modulation (*AH-MPPM*, *AH-MPDWM*, *MPDAWM*) for FSO communications systems. On the other hand, we have presented software «*WOCL-Predi*» developed to determine the quality of service of FSO links under different atmospheric conditions.

**Key-Words:** *Free space optic, hybrid modulation, WOCL-Predi, AH-MPPM, AH-MPDWM*

## ملخص:

تكنولوجيا الوصلات البصرية في الفضاء الحر "FSO" هي تقنية مكملة لكل من تكنولوجيا الألياف البصرية و تكنولوجيا الراديو لتلبية الاحتياجات المتزايدة في مجال الاتصالات ذات التدفق العالي. في عام 2008، طرحت الوصلة الأولى FSO بـ 10 جيجابايت في الثانية في السوق، مما يجعلها أسرع التقنيات اللاسلكية المتاحة تجارياً.

في هذه الأطروحة، قدمنا و حللنا عملياً أداء تقنيات التضمين OOK, PPM و MPPM، و قدمنا تقنيات جديدة و بديلة لمختلف الأنظمة. من ناحية أخرى، طورنا و قدمنا برنامجاً لتحديد جودة الخدمة في الشبكات الضوئية اللاسلكية تحت مختلف الظروف الجوية.

**كلمات مفتاحية:** الوصلات البصرية في الفضاء الحر , تضمين *AH-* , *AH-MPDWM* , *WOCL-Predi* ,

*MPPM*