

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
Université DJILLALI LIABES de Sidi- Bel-Abbes  
Faculté de Génie Electrique  
Département de Télécommunications  
Laboratoire des Télécommunications et de Traitement Numérique du Signal

## THESE DE DOCTORAT

Pour l'obtention du Diplôme de Doctorat en Sciences  
Spécialité : Télécommunications  
Option : Systèmes des Télécommunications

Présentée par

MESRI Lamia

---

### Etude et analyse des performances du système FSO- SAC-OCDMA sous l'effet de mauvaises conditions météorologiques

---

Soutenue le : 20 / 06 / 2019

Devant le jury composé de :

M. NAOUM Rafah	Pr.	Président	UDL-SBA
M. DJEBBARI Ali	Pr.	Rapporteur	UDL-SBA
M. BENADDA Belkacem	Pr.	Examineur	Univ-Tlemcen
M. BENAÏSSA Mohammed	MCA	Examineur	CU-Ain Témouchent

Année Universitaire 2018-2019

# Remerciements

Cette thèse est le résultat des travaux de recherche menés au sein du Laboratoire des Télécommunications et Traitement Numérique du Signal (LTTNS).

J'exprime ma profonde gratitude à mon directeur de thèse Monsieur DJEBBARI Ali, Professeur à l'Université DJILLALI LIABES de Sidi Bel Abbas, de l'honneur qu'il m'a fait en me proposant ce riche sujet. Ses qualités d'écoute, ses conseils avisés, son expérience en recherche et son soutien permanent ont largement contribué à l'aboutissement de cette étude.

Je tiens à remercier également monsieur NAOUM Rafah, Professeur à l'université DJILLALI LIABES de Sidi-Bel Abbas, pour avoir accepté de présider le Jury de ma thèse ainsi que les membres du Jury : monsieur BENADDA Belkacem, Professeur à l'université de Tlemcen et le monsieur BENAÏSSA Mohammed, Maître de conférences au centre universitaire de Ain-Témouchent, pour avoir accepté de rapporter mon manuscrit de thèse.

Enfin, et sans cité des noms, un remerciement particulier envers ceux et celles qui ont le plus partagé mon quotidien au laboratoire de recherche et ailleurs et qui ont toujours été à mes côtés pour m'aider et m'encourager.

# Résumé

Contrairement aux transmissions radio ou les faisceaux hertziens, les liaisons optiques sans-fil (FSO : Free Space Optics en anglais) transmettent la lumière sur des longueurs d'ondes dans le visible et proche de l'infrarouge ; ils conviennent pour une transmission très haut débit pour des distances de connexion de dizaines de mètres à cinq kilomètres. La gêne la plus importante de la transmission d'un faisceau lumineux, dans l'atmosphère comme canal de transmission, vient des conditions météorologiques. L'objectif de cette thèse est de déterminer la portée maximale du système FSO-SAC-OCDMA, dont la puissance de sortie est sans danger pour l'œil humain, en tenant compte des précipitations et de la densité du brouillard, de la neige, de la pluie et la scintillation. Dans le but d'effectuer une simulation réelle, une modélisation du système FSO-SAC-OCDMA a été faite sous le logiciel Optisystem 9.0 en tenant compte des différentes pertes dues au canal et d'insertion des composants constituant la chaîne de transmission. Les résultats obtenus montrent que la neige, la pluie et la scintillation ont peu d'impact sur les performances du système, contrairement au brouillard qui altère le faisceau lumineux grâce aux très fines gouttelettes qui le constituent.

## Mots-clés :

FSO, SAC-OCDAM, code ZCC, brouillard, pluie, neige, scintillation.

# Abstract

Unlike radio transmissions or radio-relay systems, wireless optical links (FSO) transmit light over wavelengths in the visible and near infrared range; they are suitable for very high-speed transmission for connecting distances of tens of meters to five kilometers. The most important hindrance to the transmission of a light beam, in the atmosphere as a transmission channel, comes from the meteorological conditions. The objective of this thesis is to determine the maximum range of the FSO-SAC-OCDMA system, whose power output is safe for the human eye, taking into account precipitation and density of fog, snow, rain and scintillation. In order to perform a real simulation, a modelization of the FSO-SAC-OCDMA system was made under the Optisystem 9.0 software taking into account the various losses due to the channel and insertion of the components constituting the transmission chain. The results show that snow, rain and scintillation have little impact on the performance of the system, unlike fog that alters the light beam thanks to the very small droplets that constitute it.

## **Keywords:**

FSO, SAC-OCDAM, code ZCC, fog, rain, snow, scintillation.

## ملخص

بعكس أنظمة الإرسال الراديوي أو المرحلات الراديوية، تنقل الوصلات البصرية اللاسلكية (FSO) الضوء على طول الموجات في مدى الرؤية المرئي والقريب من الأشعة تحت الحمراء؛ وهي مناسبة لنقل السرعة العالية جدًا لربط مسافات من عشرات الأمتار إلى خمس كيلومترات. إن أهم عائق أمام نقل حزمة الضوء، في الجو كقناة إرسال، يأتي من ظروف الأرصاد الجوية. الهدف من هذه الرسالة هو تحديد المدى الأقصى لنظام FSO-SAC-OCDMA، الذي يكون خرج الطاقة الخاص به آمنًا للعين البشرية، مع مراعاة هطول الأمطار وكثافة الضباب والثلوج، المطر والتلألؤ. من أجل إجراء محاكاة حقيقية، تم وضع نموذج لنظام FSO-SAC-OCDMA تحت برنامج Optisystem 9.0 مع الأخذ بعين الاعتبار مختلف الخسائر الناجمة عن القناة وإدخال المكونات التي تشكل سلسلة الإرسال. أظهرت النتائج أن الثلج والمطر والتلألؤ ليس لهما تأثير كبير على أداء النظام، على عكس الضباب الذي يغير شعاع الضوء بفضل القطيرات الصغيرة جدًا التي تشكله.

# Table des matières

Résumé.....	i
Abstract .....	ii
ملخص.....	iii
Table des matières .....	iv
Liste des figures.....	vii
Liste des tableaux.....	x
Liste des abréviations.....	xi
Introduction générale.....	1
Chapitre 1.....	3
Présentation et principe de fonctionnement des liaisons optiques atmosphériques.....	3
1.1 Introduction.....	3
1.2 Présentation de la technologie FSO .....	3
1.3 Principe de fonctionnement des liaisons FSO .....	4
1.3.1 Emetteur.....	5
1.3.2 Canal de propagation .....	7
1.3.3 Récepteur .....	8
1.4 Caractéristiques des équipements FSO .....	9
1.5 Les avantages et les inconvénients des liaisons FSO.....	11
1.6 Applications des systèmes FSO.....	12
1.7 Modèles de canaux en transmission FSO .....	12
1.7.1 Atténuation atmosphérique.....	15
1.7.2 Scintillation.....	24
1.8 La sécurité oculaire.....	26
1.9 Conclusion .....	26
Chapitre 2.....	28
Présentation de la technique d'accès multiple par répartition de codes dans le domaine spectral (SAC-OCDMA) .....	28

2.1	Introduction .....	28
2.2	Définition de la technique SAC-OCDMA.....	28
2.3	Encodage et décodage SAC-OCDMA .....	31
2.3.1	Encodage .....	31
2.3.2	Décodage.....	31
2.3.3	Détection directe.....	33
2.4	Bruit en SAC-OCDMA incohérent .....	34
2.4.1	Bruit thermique .....	35
2.4.2	Bruit de grenaille (shot noise) .....	36
2.4.3	Bruit d'intensité.....	36
2.5	Codes utilisés dans la technique SAC-OCDMA .....	36
2.5.1	Les paramètres définissant les codes optiques.....	36
2.5.2	Les Codes optiques.....	37
2.6	Conclusion .....	39
Chapitre 3 .....		40
Evaluation analytique des performances du système FSO-SAC-OCDMA sous l'effet de mauvaises conditions météorologiques .....		40
3.1	Introduction .....	40
3.2	Analyse des performances du système .....	40
3.2.1	Modèle du système étudié.....	40
3.2.2	Calcul du SNR du système SAC-OCDMA-FSO .....	41
3.2.3	Evaluation des performances du système FSO-SAC-OCDMA .....	45
3.3	Conclusion .....	59
Chapitre 4 .....		60
Modélisation et évaluation des performances du système FSO-SAC-OCDMA sous l'effet de mauvaises conditions météorologique à l'aide du logiciel Optisystem.....		60
4.1	Introduction .....	60
4.2	Modélisation sous Optisystem .....	60
4.3	Simulation du système FSO-SAC-OCDMA sous Optisystem.....	67
4.3.1	Paramètres de simulation .....	68
4.3.2	Évaluation des performances.....	70
4.4	Conclusion .....	108

Conclusion générale et perspectives .....	109
Annexe A : Détection DSO, cas des pertes d'insertion .....	111
A.1    Cas de la pluie .....	111
A.2    Cas de la neige .....	112
A.3    Cas de la scintillation .....	113
Annexe B : Détection DTO, cas sans pertes d'insertion .....	114
B.1    Evaluation analytique des performances du système FSO-SAC-OCDMA sous Matlab    114	
B.2    Modélisation sous Optisystem .....	120
Bibliographie .....	122



# Liste des figures

<b>Figure 1. 1</b> - Le spectre de fréquence électromagnétique montrant le spectre optique [5]. ...	3
<b>Figure 1. 2</b> - Liaison FSO utilisée pour élargir une infrastructure mobile [4].....	4
<b>Figure 1. 3</b> - Système de communication FSO en visibilité directe [5]. .....	4
<b>Figure 1. 4</b> - Schéma synoptique du bloc émetteur FSO.....	5
<b>Figure 1. 5</b> - Principe de base d'une modulation directe. ....	5
<b>Figure 1. 6</b> - Principe de base d'une modulation externe.....	6
<b>Figure 1. 7</b> - Les phénomènes qui affectent le faisceau optique [7].....	7
<b>Figure 1. 8</b> – Schéma bloc du récepteur optique.....	8
<b>Figure 1. 9</b> - Sensibilité de photodiode en silicium en fonction de la longueur d'onde [8].....	9
<b>Figure 1. 10</b> - Différentes couches atmosphériques avec altitudes correspondantes [9].....	13
<b>Figure 1. 11</b> - Atténuation atmosphérique en fonction de la longueur d'onde en temps clair [15]. .....	14
<b>Figure 1. 12</b> - Atténuation atmosphérique en fonction des conditions météorologiques [3].	15
<b>Figure 1. 13</b> - Transmission à travers l'atmosphère terrestre en fonction de la longueur d'onde [2], [3], [10].....	16
<b>Figure 1. 14</b> - Modèle de diffusion : a) de Rayleigh, b) de Mie et c) non sélective [17]. .....	17
<b>Figure 1. 15</b> - Atténuation en espace libre en fonction de la portée.....	19
<b>Figure 1. 16</b> - Mise en évidence de perte due à la divergence du faisceau [9]. .....	20
<b>Figure 1. 17</b> - Atténuation géométrique en fonction de la portée. ....	21
<b>Figure 1. 18</b> - Déviation du faisceau sous l'influence de cellules de turbulence (a) cellules plus grandes que le diamètre du faisceau (déviation du faisceau), (b) cellules plus petites que le diamètre du faisceau (élargissement du faisceau) (c) cellules de turbulence de différentes tailles (scintillation) [26]......	25
<b>Figure 2. 1</b> – Encodage SAC-OCDMA.....	28
<b>Figure 2. 2</b> - Technologie d'encodage OCDMA spectral : a) Masque d'amplitude, b) AWG, c) Réseaux de Bragg, d) Démultiplexeurs et multiplexeurs optiques [29], [30]. .....	30
<b>Figure 2. 3</b> - Principe de l'encodage spectrale SAC-OCDMA par Démultiplexeur/Multiplexeurs. ....	31
<b>Figure 2. 4</b> - Principe du décodage pour l'utilisateur désiré. ....	32
<b>Figure 2. 5</b> - Principe du décodage pour l'utilisateur interférent. ....	33
<b>Figure 2. 6</b> – Principe de la détection directe, cas d'une seule longueur d'onde.....	34
<b>Figure 2. 7</b> - Principe de la détection directe, cas de toutes les longueurs d'onde d'un code. ....	34
<b>Figure 2. 8</b> - Conversion d'une puissance optique $P_{opt}$ en une tension électrique $V$ [27]. ...	35

<b>Figure 3. 1</b> - Schéma bloc du système FSO-SAC-OCDMA.....	41
<b>Figure 3. 2</b> - BER en fonction de la portée, cas de brouillard, Détection DSO : a) $Db = 622 Mbps$ , b) $Db = 1 Gbps$ . .....	48
<b>Figure 3. 3</b> - BER en fonction de la portée, cas de la pluie, Détection DSO : a) $Db = 622 Mbps$ , b) $Db = 1 Gbps$ .....	50
<b>Figure 3. 4</b> - BER en fonction de la portée, cas de la neige sèche, Détection DSO : a) $Db = 622 Mbps$ , b) $Db = 1 Gbps$ . .....	52
<b>Figure 3. 5</b> - BER en fonction de la portée, cas de la neige humide, Détection DSO : a) $Db = 622 Mbps$ , b) $Db = 1 Gbps$ . .....	53
<b>Figure 3. 6</b> - BER en fonction de la portée, cas de la scintillation, Détection DSO : a) $Db = 622 Mbps$ , b) $Db = 1 Gbps$ . .....	56
<b>Figure 3. 7</b> - BER en fonction de la portée, cas de brouillard, Détection DTO : a) $Db = 622 Mbps$ , b) $Db = 1 Gbps$ . .....	58
<b>Figure 4. 1</b> - Schéma bloc du système FSO-SAC-OCDMA, détection DSO sous Optisystem....	61
<b>Figure 4. 2</b> – Puissance de la LED utilisée en fonction de la longueur d’onde.....	62
<b>Figure 4. 3</b> - Répartition des longueurs d'ondes. ....	63
<b>Figure 4. 4</b> - Génération du code optique $C1$ sous Optisystem.....	64
<b>Figure 4. 5</b> - Configuration du générateur de séquence PRBS.....	65
<b>Figure 4. 6</b> - Configuration du canal FSO.....	66
<b>Figure 4. 7</b> - Atténuation du signal transmis via le canal FSO.....	67
<b>Figure 4. 8</b> - Représentation temporelle et spectrale d'une séquence à 16 échantillons [45]. .....	68
<b>Figure 4. 9</b> - Paramètres globaux utilisés sous l'Optisystem.....	68
<b>Figure 4. 10</b> - Diagramme de l'œil, cas de brouillard, détection DSO, sans pertes d’insertion, $Db = 622 Mbps$ : a) brouillard dense, b) brouillard modéré, c) brume, d) temps clair. ....	73
<b>Figure 4. 11</b> - Diagramme de l'œil, cas le brouillard, détection DSO, sans pertes d’insertion, $Db = 1 Gbps$ : a) brouillard dense, b) brouillard modéré, c) brume, d) temps clair. ....	75
<b>Figure 4. 12</b> - Diagramme de l'œil, cas de la pluie, détection DSO, sans pertes d’insertion, $Db = 622 Mbps$ : a) pluie d’orage, b) forte pluie, c) pluie légère, d) bruine pluie. ....	78
<b>Figure 4. 13</b> - Diagramme de l'œil, cas de brouillard, détection DSO, sans pertes d’insertion, $Db = 1 Gbps$ : a) pluie d’orage, b) forte pluie, c) pluie légère, d) bruine pluie. ....	80
<b>Figure 4. 14</b> - Diagramme de l'œil, cas de la neige sèche, détection DSO, sans pertes d’insertion, $Db = 622 Mbps$ : a) $2 mm/h$ , b) $4 mm/h$ , c) $6 mm/h$ , d) $8 mm/h$ .....	83
<b>Figure 4. 15</b> - Diagramme de l'œil, cas de la neige humide, détection DSO, sans pertes d’insertion, $Db = 622 Mbps$ : a) $2 mm/h$ , b) $4 mm/h$ , c) $6 mm/h$ , d) $8 mm/h$ .....	85

**Figure 4. 16** - Diagramme de l'œil, cas de la neige sèche, détection DSO, sans pertes d'insertion,  $Db = 1\text{ Gbps}$  : a)  $2\text{ mm/h}$ , b)  $4\text{ mm/h}$ , c)  $6\text{ mm/h}$ , d)  $8\text{ mm/h}$ . ..... 87

**Figure 4. 17**- Diagramme de l'œil, cas de la neige humide, détection DSO, sans pertes d'insertion,  $Db = 1\text{ Gbps}$  : a)  $2\text{ mm/h}$ , b)  $4\text{ mm/h}$ , c)  $6\text{ mm/h}$ , d)  $8\text{ mm/h}$ . ..... 89

**Figure 4. 18** - Diagramme de l'œil, cas de la scintillation, détection DSO, sans pertes d'insertion,  $Db = 622\text{ Mbps}$  : a) forte turbulence, b) turbulence modérée, c) faible turbulence. .... 91

**Figure 4. 19** - Diagramme de l'œil, cas de la scintillation, détection DSO, sans pertes d'insertion,  $Db = 1\text{ Gbps}$  : a) forte turbulence, b) turbulence modérée, c) faible turbulence. .... 92

**Figure 4. 20** - Diagramme de l'œil, cas de brouillard, détection DSO, avec pertes d'insertion,  $Db = 622\text{ Mbps}$  : a) brouillard dense, b) brouillard modéré, c) brume, d) temps clair. .... 95

**Figure 4. 21** - Diagramme de l'œil, cas de brouillard, détection DSO, avec pertes d'insertion,  $Db = 1\text{ Gbps}$  : a) brouillard dense, b) brouillard modéré, c) brume d) temps clair. .... 97

**Figure 4. 22** - Diagramme de l'œil, cas de brouillard, détection DTO, sans pertes d'insertion,  $Db = 622\text{ Mbps}$  : a) brouillard dense, b) brouillard modéré, c) brume, d) temps clair. .... 100

**Figure 4. 23** - Diagramme de l'œil, cas de brouillard, détection DTO, sans pertes d'insertion,  $Db = 1\text{ Gbps}$  : a) brouillard dense, b) brouillard modéré, c) brume, d) temps clair. .... 102

**Figure 4. 24** - Diagramme de l'œil, cas de brouillard, détection DTO, avec pertes d'insertion,  $Db = 622\text{ Mbps}$  : a) brouillard dense, b) brouillard modéré, c) brume, d) temps clair. .... 105

**Figure 4. 25** - Diagramme de l'œil, cas de brouillard, détection DTO, avec pertes d'insertion,  $Db = 1\text{ Gbps}$  : a) brouillard dense, b) brouillard modéré, c) brume, d) temps clair. .... 107

**Figure B. 1** - BER en fonction de la portée, cas de la pluie, détection DTO : a)  $Db = 622\text{ Mbps}$ , b)  $Db = 1\text{ Gbps}$ . .... 115

**Figure B. 2** - BER en fonction de la portée, cas de la neige sèche, détection DTO : a)  $Db = 622\text{ Mbps}$ , b)  $Db = 1\text{ Gbps}$ . .... 116

**Figure B. 3** - BER en fonction de la portée, cas de la neige humide, détection DTO : a)  $Db = 622\text{ Mbps}$ , b)  $Db = 1\text{ Gbps}$ . .... 117

**Figure B. 4** - BER en fonction de la portée, cas de la scintillation, détection DTO : a)  $Db = 622\text{ Mbps}$ , b)  $Db = 1\text{ Gbps}$ . .... 119

**Figure B. 5** - Schéma bloc du système FSO-SAC-OCDMA pour une détection DTO sous Optisystem. .... 120

# Liste des tableaux

<b>Tableau 1. 1</b> - Catégorie laser [9], [10], [11]. .....	10
<b>Tableau 1. 2</b> - Type de liaison FSO disponible dans le marché [13], [14] .....	11
<b>Tableau 3. 1</b> - Paramètres utilisés dans l'analyse numérique par Matlab. ....	46
<b>Tableau 3. 2</b> - Atténuation des différents types du brouillard. ....	47
<b>Tableau 3. 3</b> - Portées maximales, cas de brouillard, Détection DOS. ....	49
<b>Tableau 3. 4</b> - Atténuation des différents types de la pluie. ....	49
<b>Tableau 3. 5</b> - Portées maximales, cas de la pluie, Détection DSO.....	51
<b>Tableau 3. 6</b> - Atténuation des différents types de la neige.....	51
<b>Tableau 3. 7</b> - Portée maximale, cas de la neige, Détection DSO.....	54
<b>Tableau 3. 8</b> - Atténuation des différents types de la scintillation.....	55
<b>Tableau 3. 9</b> - Portées maximales, cas de la scintillation, Détection DSO.....	56
<b>Tableau 3. 10</b> - Portées maximales, cas de brouillard, détection DTO.....	59
<b>Tableau 4. 1</b> - Longueurs d'ondes associées aux codes optiques $C_i$ . ....	63
<b>Tableau 4. 2</b> - Pertes d'insertion considérées.....	69
<b>Tableau 4. 3</b> - Portée maximale, cas de brouillard, détection DSO, sans pertes d'insertion. .	71
<b>Tableau 4. 4</b> - Portée maximale, cas de la pluie, détection DSO, sans pertes d'insertion. ....	76
<b>Tableau 4. 5</b> - Portée maximale, cas de la neige, détection DSO, sans pertes d'insertion. ....	81
<b>Tableau 4. 6</b> - Portée maximale, cas de la scintillation, détection DSO, sans pertes d'insertion. .....	89
<b>Tableau 4. 7</b> - Portée maximale, cas de brouillard, détection DSO, avec pertes d'insertion. .	93
<b>Tableau 4. 8</b> - Portée maximale, cas de brouillard, détection DTO, sans pertes d'insertion. .	98
<b>Tableau 4. 9</b> - Portée maximale, cas de brouillard, détection DTO, avec pertes d'insertion.	103
<b>Tableau A. 1</b> - Portée maximale, cas de la pluie, une détection DSO et avec pertes d'insertion. .....	111
<b>Tableau A. 2</b> - Portée maximale, cas de la neige, détection DSO et avec pertes d'insertion. .....	112
<b>Tableau A. 3</b> - Portée maximale, cas de la scintillation, détection DSO et avec pertes d'insertion. ....	113
<b>Tableau B. 1</b> - Portées maximales, cas de la pluie, détection DTO.....	115
<b>Tableau B. 2</b> - Portée maximale, dans le cas de la neige, détection DTO. ....	118
<b>Tableau B. 3</b> - Portées maximales, cas de la scintillation, détection DTO.....	120

## Liste des abréviations

<b>APD</b>	Avalanche Photodiode
<b>AWG</b>	Arrayed Waveguide Grating
<b>BER</b>	Bit Error Rate
<b>BPF</b>	Band Pass Filter
<b>CDEC</b>	Complementary Decoder
<b>CDMA</b>	Code Division Multiple Acces
<b>DEC</b>	Decoder
<b>DSO</b>	Directe d'une seule longueur d'onde
<b>DTO</b>	Directe de toutes les longueurs d'onde
<b>E/O</b>	Electrique / Optique
<b>EHF</b>	Extremely High Frequencies
<b>ELF</b>	Extremely Low Frequencies
<b>EOM</b>	Electro-Optic Modulator
<b>FDMA</b>	Time Division Multiple Access
<b>FSO</b>	Free Space Optics
<b>FSO-SAC- OCDMA</b>	Free Space Optics Spectral Amplitude Coding Optical Code Division Multiple Access
<b>Gbps</b>	Giga bits par seconde $1Gbps = 10^9$ bits par seconde
<b>HF</b>	High Frequencies

<b>IEC</b>	International Electrotechnical
<b>IM</b>	Intensity Modulation
<b>LED</b>	Light-Emitting Diode
<b>LF</b>	Low Frequencies
<b>LOA</b>	Liaison Optique Atmosphérique
<b>LOS</b>	Line Of Sight
<b>LPF</b>	Low Pass Filter
<b>MDW</b>	Modified Double Weight
<b>MF</b>	Meduim Frequencies
<b>Mux</b>	Multiplexer
<b>MZM</b>	Mach-Zehnder Modulator
<b>OCDMA</b>	Optical Code Division Multiple Access
<b>OSE</b>	Optical Spectral Encoder
<b>PD</b>	Photodetector
<b>PIIN</b>	Phase Induced Intensity Noise
<b>PIN</b>	Positive Intrinsic Negative
<b>PPM</b>	Pulse Position Modulation
<b>PRBS</b>	Pseudo Random Bit Sequence
<b>SAC</b>	Spectral Amplitude Coding
<b>SAC-OCDMA</b>	Spectral Amplitude Coding Optical Code Division Multiple Access

<b>SCM SAC- OCDMA</b>	SubCarrier Multiplexing Spectral Amplitude Coding Optical Code Division Multiple Access
<b>SHF</b>	Super High Frequencies
<b>SNR</b>	Signal-to-Noise Ratio
<b>TDMA</b>	Time Division Multiple Access
<b>UHF</b>	Ultra High Frequencies
<b>UTI</b>	Union Telecommunication International
<b>UV</b>	Ultraviolet
<b>VF</b>	Voice Frequencies
<b>VHF</b>	Very High Frequencies
<b>VLF</b>	Very Low Frequencies
<b>WOC</b>	Wireless Optical Communication
<b>ZCC</b>	Zero Cross Correlation

# Introduction générale

Les communications optiques atmosphériques sont utilisées sous diverses formes depuis la plus haute antiquité. En 1880, Alexander Graham Bell créait le Photophone. Ce dispositif permettait de transmettre sons et conversation par le biais d'un faisceau lumineux. Le 03 juin 1880, Bell mena la première transmission téléphonique mondiale sans fil entre deux immeubles séparés de 213 mètres. Son invention ne trouva néanmoins pas des applications pratiques que plusieurs années après dans le domaine des télécommunications militaires. Dans les années 80, plusieurs systèmes de communication laser en espace libre sont développés afin d'assurer des liaisons sécurisées.

Les liaisons optiques atmosphériques sont aujourd'hui une technologie bien établie capable de transmettre des informations à très grande largeur de bande en utilisant un faisceau lumineux d'un point à un autre dans l'atmosphère. Cependant, les liaisons optiques atmosphériques sont affectées par les conditions atmosphériques comme le brouillard, la pluie, la neige et la turbulence qui contribuent à une atténuation importante de la puissance des faisceaux lumineux.

Les liaisons optiques atmosphériques sont utilisées presque dans toutes les configurations de réseaux et couvrent un grand nombre d'applications avec un débit comparable à celui de la fibre optique.

L'évolution des réseaux de télécommunications vers le transport des données impose de rechercher des systèmes offrant une grande bande passante et un accès multiple aux ressources. Le partage des ressources optiques en bande passante obéit à trois schémas hérités des techniques radiofréquences dans lesquels le partage se fait :

En fréquence (FDMA : Frequency Division Multiple Access en anglais) ;

En temps (TDMA : Time Division Multiple Access en anglais) ;

Par code (CDMA : Code Division Multiple Access en anglais).

Dans cette thèse, nous nous intéressons à l'accès multiple par code (CDMA) dont les avantages dans le domaine des radiofréquences ont incité les chercheurs des télécommunications à envisager l'importance du CDMA dans le domaine optique d'où l'apparition de l'OCDMA (Optical Code Division Multiple Access en anglais).

La principale caractéristique qui distingue l'OCDMA des autres techniques d'accès multiple est l'utilisation des codes orthogonaux pour permettre à plusieurs utilisateurs d'utiliser la même bande spectrale sans chevauchement et sans interférences. Notre travail dans cette thèse consistera à : 1) Etudier le cas d'une transmission FSO-OCDMA à encodage spectrale (FSO-SAC-OCDMA : Free Space Optics Spectral Amplitude Coding Optical Division Multiple Access en anglais) à détection directe. 2) évaluer ces performances en termes de BER sous l'effet de mauvaises conditions météorologiques et 3) Valider par simulation (sous Optisystem) les résultats obtenus analytiquement en 2) en vue de déterminer la portée maximale entre l'émetteur et le récepteur pour une puissance maximale tolérée.



Cette thèse est organisée comme suit :

Le chapitre 1 est un chapitre introductif. Il présente la technologie FSO et décrit son principe de fonctionnement. Nous faisons un rappel sur les phénomènes qui affectent les ondes optiques lors de leurs propagations, suivi d'une brève description sur la sécurité oculaire.

Le chapitre 2 introduit le principe de la technique d'accès multiple par répartition de code dans le domaine spectrale (SAC-OCDMA) et les procédures pour effectuer l'encodage et le décodage spectral. Ensuite nous allons décrire les différents types de bruit qui limitent les performances du système ainsi que les codes optiques utilisés dans cette technique.

Le chapitre 3 présente le système FSO-SAC-OCDMA étudié. En effet, l'évaluation du SNR du système FSO-SAC-OCDMA à montrer qu'il dépend entre autres des différents types de bruit, la portée, paramètres du code utilisée et la puissance reçue au niveau du récepteur, cette dernière dépend principalement des paramètres d'atténuation des différentes conditions météorologiques tels que : le brouillard, la pluie, la neige et la scintillation. Par la suite, nous avons évalué les performances du système FSO-SAC-OCDMA en termes de BER pour deux modes de détection (détection d'une seule longueur d'onde et détection de toutes les longueurs d'ondes du code) et on a déterminé la portée maximale pour différents canaux FSO de transmission pour une valeur de BER acceptable ( $10^{-9}$ ).

Le chapitre 4 présente la modélisation de la chaîne de transmission FSO-SAC-OCDMA, sous Optisystem, et l'évaluation de ses performances par simulation dans deux contextes (sans et avec considération des pertes d'insertion) pour différentes conditions météorologiques (le brouillard, la pluie, la neige et la scintillation). L'objectif principal est la détermination la portée maximale entre l'émetteur et le récepteur pour un BER acceptable ( $10^{-9}$ ). Les résultats obtenus sont, à chaque fois, comparés à ceux déterminés analytiquement.

Nous concluons cette thèse en présentant un certain nombre de perspectives des recherches que nous jugeons utile à entreprendre.

# Chapitre 1

## Présentation et principe de fonctionnement des liaisons optiques atmosphériques

### 1.1 Introduction

Les Liaisons Optiques Atmosphériques (LOA), dénomination française de Free Space Optic (FSO), appelées aussi Wireless Optical Communications (WOC), constituent une technologie optique de communications qui fait appel à la propagation de la lumière (spectre visible et/ou proche infrarouge [1] [2]) en espace libre, afin de transmettre des données entre deux points distants. Cette technologie présente un intérêt lorsqu'une connexion physique par le biais de câble ou de fibre optique est inadaptée, en particulier pour des raisons de coûts.

Dans ce chapitre après avoir présenté la technologie FSO, nous décrivons le principe de base de cette technologie, les caractéristiques des équipements FSO. Nous explicitons les différents modèles de canaux de transmission FSO.

### 1.2 Présentation de la technologie FSO

La liaison FSO, est une technologie optique qui permet la propagation de la lumière (en général situées dans le spectre optique, figure (1.1)) en espace libre (sans fil) avec un débit égal à celui de la fibre optique tout en ayant les avantages du sans-fil [3], [4].

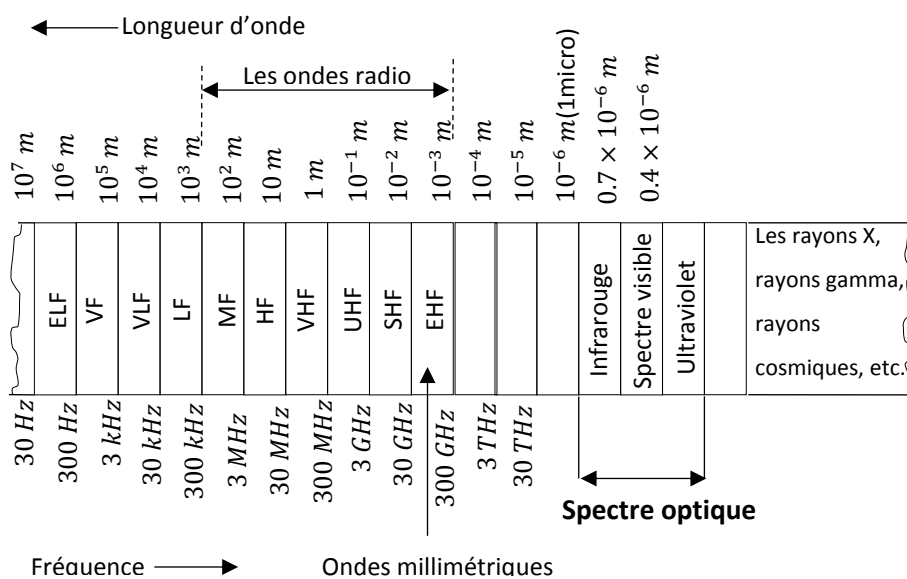


Figure 1. 1 - Le spectre de fréquence électromagnétique montrant le spectre optique [5].

Une liaison optique sans fil exige une visibilité directe (LOS : Line Of Sight en anglais) entre l'émetteur et le récepteur. Comme toute technologie de communication, une liaison FSO nécessite un émetteur, un canal de propagation et un récepteur [2], [3], [4]. La figure (1.2) représente une liaison FSO utilisée pour élargir une infrastructure mobile.

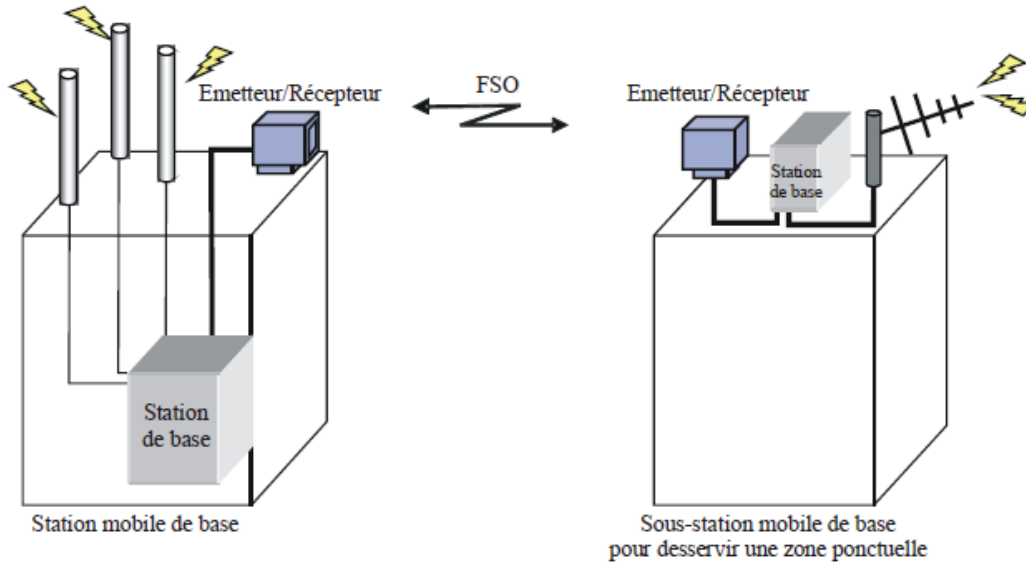


Figure 1. 2 - Liaison FSO utilisée pour élargir une infrastructure mobile [4].

### 1.3 Principe de fonctionnement des liaisons FSO

Le principe de fonctionnement d'une liaison FSO est montré sur la figure (1.3). Comme tous les systèmes de communication, le système FSO comprend trois parties : émetteur, canal de propagation et récepteur. Chacun de ces blocs est présenté comme suit :

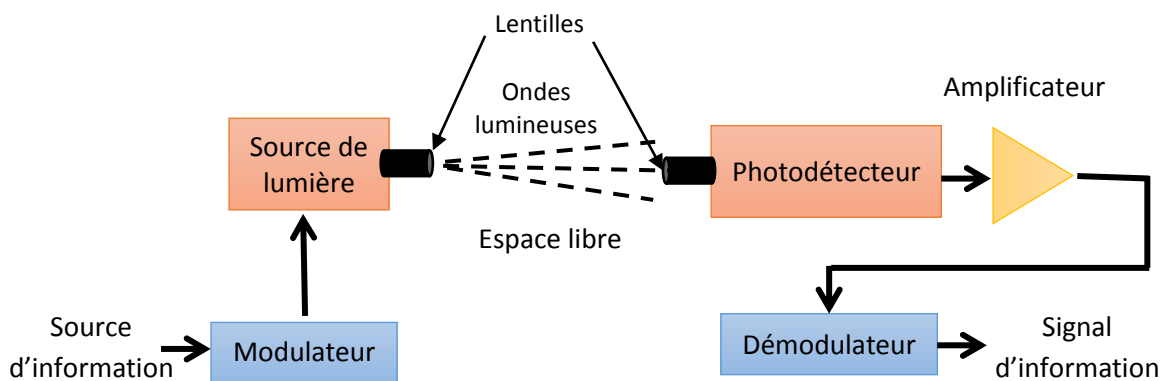
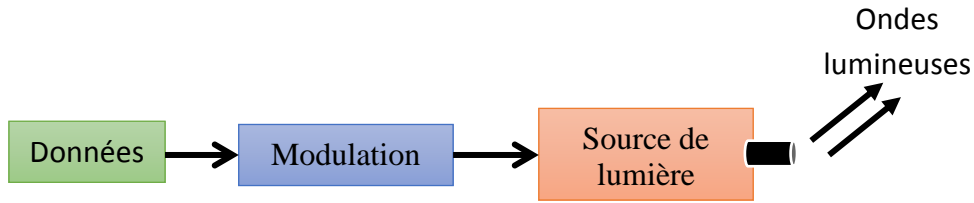


Figure 1. 3 - Système de communication FSO en visibilité directe [5].

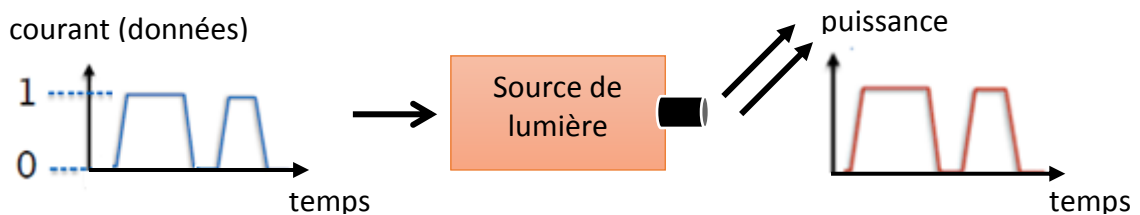
### 1.3.1 Emetteur

Ce bloc assure la modulation des données sur la porteuse optique. Le schéma bloc émetteur FSO est donné par la figure (1.4). Les types de modulation les plus utilisés sont :



**Figure 1. 4** - Schéma synoptique du bloc émetteur FSO.

- La modulation d'intensité (IM : Intensity Modulation en anglais) : L'idée de cette modulation réside dans la transmission des informations sur une puissance instantanée du signal porteur. Ce qu'on peut l'avoir en faisant varier le courant de conduite de la source optique directement en correspondance avec les données à transmettre. Le principe de base d'une transmission à modulation directe est présenté par la figure (1.5).



**Figure 1. 5** - Principe de base d'une modulation directe.

- La modulation externe (figure (1.6)) : Dans ce type de modulation, la source optique n'est pas modulée mais elle reçoit une puissance électrique continue puis suivie d'un dispositif qui réalise lui-même la modulation de l'intensité [2], [3], [4], [5], [6].

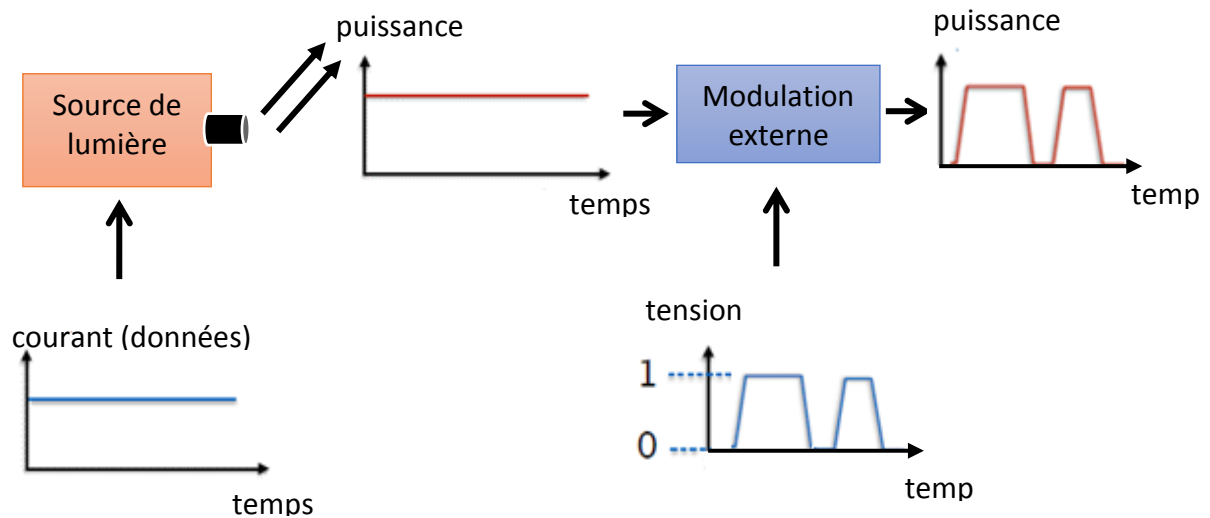


Figure 1. 6 - Principe de base d'une modulation externe.

Une des principales clés dans tout système de communication optique est la source optique qui peut être facilement modulée avec un débit très élevé. Les sources optiques se basent sur les semiconducteurs qui sont les sources les plus utilisées dans les communications optiques sans fil. On distingue :

- Les diodes électroluminescentes (LED : Light-Emitting Diode en anglais) : sont des composants optoélectroniques qui émettent la lumière. Parmi les caractéristiques d'une LED, sa puissance d'émission qui est relativement faible. Les LED sont généralement utilisées dans des applications sur des courtes distances. L'avantage majeur des LED est leur vie extrêmement longue et de faible coût [2], [3], [6].
- Les diodes laser : présentent des avantages significatifs pour les applications de longue distance comparées aux diodes DEL. Les diodes lasers se basent sur trois processus fondamentaux pour effectuer la génération de la lumière : l'absorption, l'émission spontanée et l'émission stimulée. Un laser est une source de lumière cohérente, c'est-à-dire une onde électromagnétique sinusoïdale dans le temps. La sélection d'une source laser pour des applications FSO dépend de divers facteurs. Le facteur le plus important est que la longueur d'onde de transmission doit appartenir à des fenêtres atmosphériques (des bonnes fenêtres atmosphériques sont autour de 850 nm et 1550 nm).

Les facteurs qui influent sur l'utilisation d'une source lumineuse sont [2], [3], [4], [6] :

- Le prix et la disponibilité des composants ;
- La puissance de transmission ;
- La durée de vie ;
- La capacité de modulation ;
- La sécurité oculaire ;
- Les dimensions physiques ;

- La compatibilité avec d'autres supports de transmission telle que la fibre.  
La fonction d'émission comporte les éléments suivants [2], [3], [4], [6] :
- Module émission optique : une diode laser ou une diode électroluminescente ;
- Module de conversion électrique/optique (E/O), en cas d'interface optique ;
- Filtrage et amplification du signal numérique électrique ;
- Interface de connexion : optique ou électrique pour recevoir les données à transmettre.

### 1.3.2 Canal de propagation

Le canal de propagation constitue le milieu atmosphérique. Le canal atmosphérique est un milieu complexe pouvant affecter les caractéristiques du faisceau lumineux émis. Les liaisons FSO sont soumises à des contraintes pénalisantes imposées par le milieu de propagation atmosphérique. Ces contraintes entraînent une atténuation ou extinction du signal optique au cours de la propagation et donc une limitation de la portée entre l'émetteur et le récepteur. L'extinction atmosphérique est causée par plusieurs phénomènes sélectifs en longueurs d'ondes, ces derniers sont montrés dans la figure (1.7) [3]:

- L'absorption moléculaire ( $N_2$ ,  $O_2$ ,  $H_2$ ,  $HO$ ,  $CO_2$ ,  $O_3$ , ...);
- La diffusion moléculaire (diffusion de Rayleigh);
- L'extinction par les particules en suspension (aérosols, glace, poussière, fumées, ...);
- Précipitation (pluie, neige, ...);
- La turbulence (scintillation).

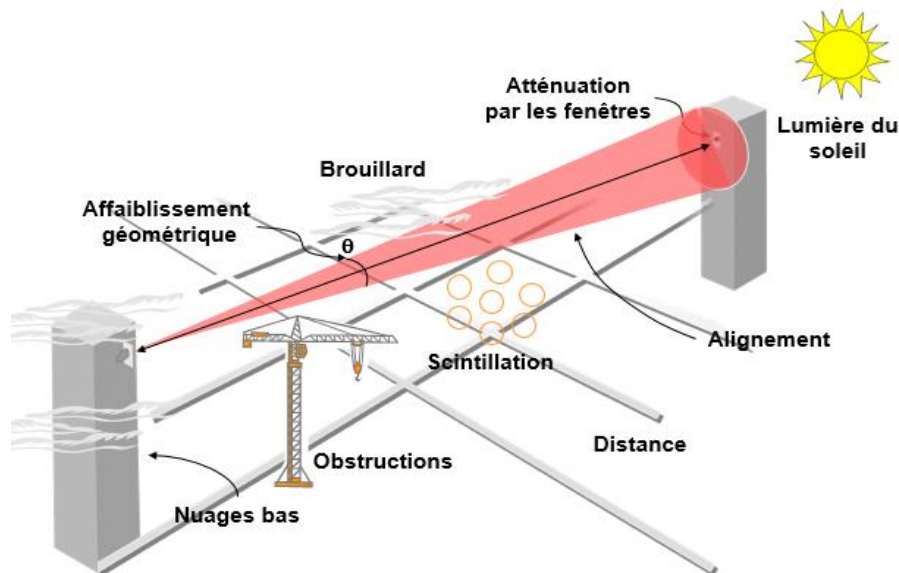


Figure 1. 7 - Les phénomènes qui affectent le faisceau optique [7].

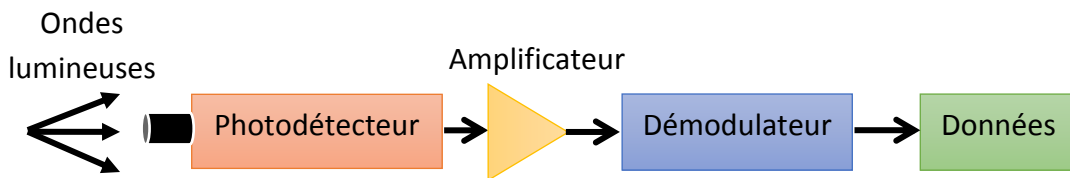
### 1.3.3 Récepteur

Ce bloc permet de récupérer et d'extraire les données transmises du champ optique incident. La surface de réception (téléscope et filtre optique) concentre le rayonnement filtré sur la surface photodéetectrice dans le plan focal. La photodétection a pour rôle de conversion du rayonnement optique en un signal électrique dans le but de récupérer les informations transmises à travers le canal.

Les propriétés requises par la photodiode sont :

- La sensibilité à la longueur d'onde utilisée ;
- La rapidité ;
- L'apport minimum de bruit.

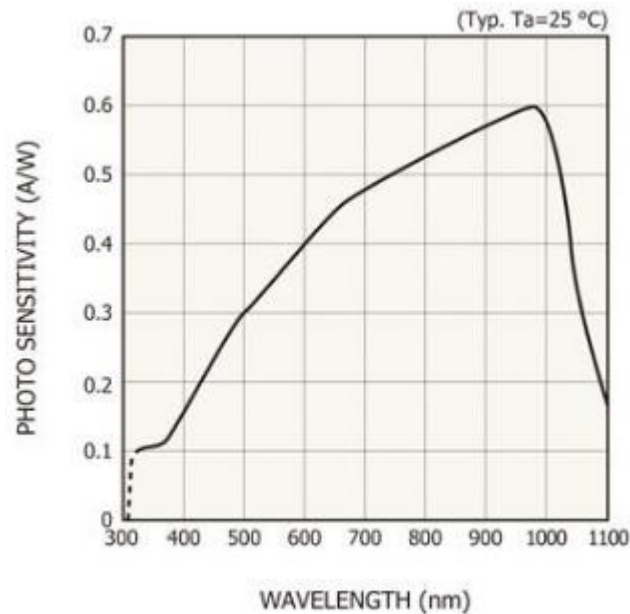
La figure (1.8) représente le schéma bloc du récepteur optique.



**Figure 1. 8** – Schéma bloc du récepteur optique.

Les photodiodes les plus utilisées dans les systèmes de communications FSO sont des photodiodes semiconducteurs à cause de leurs tailles très petites, sensibles et peuvent fonctionner dans des gammes de longueurs d'onde différentes.

Comme dans le cas des sources optiques, le choix de photodéetecteur dépend de l'application utilisée. La caractéristique de sensibilité doit correspondre à la longueur d'onde de transmission utilisée (figure (1.9) : la sensibilité maximale ( $0,6 A/W$ ) est obtenue pour une longueur d'onde égale à  $975 nm$ ). Les applications sur de longues distances exigent les photodiodes à avalanches (APD : Avalanche PhotoDiode en anglais) vu sa grande sensibilité qui fournit une marge supplémentaire au lien qui nécessitent une tension stable de haute polarisation mais présentent un coût plus cher que les photodéetecteurs à diode PIN (PIN : Positive Intrinsic Negative en anglais).



**Figure 1. 9** - Sensibilité de photodiode en silicium en fonction de la longueur d'onde [8].

Deux modes de détection sont envisagés pour capter le rayonnement électromagnétique [2], [6] :

- Détection directe (incohérente) : Dans laquelle on n'utilise pas un oscillateur local dans le processus de détection. Pour récupérer les informations, on les associe à la variation de l'intensité du champ transmis.
- Détection hétérodyne (cohérente) : elle repose sur le mélange du rayonnement à détecter et l'onde de référence, ou « oscillateur local », créé au niveau du capteur. C'est le mode le plus utilisé dans les radars et la radio. Elle exige des montages interférométriques plus difficiles à réaliser en optique qu'en radar à cause de l'utilisation des petites longueurs d'ondes.

La détection directe est préférée par rapport à la détection cohérente, pour raison de simplicité et de coût.

La fonction de réception comporte les éléments suivants [2], [3], [4], [6] :

- Module de réception optique : une photodiode ;
- Module de conversion électrique/optique (E/O), en cas d'interface optique ;
- Filtrage et amplification du signal numérique électrique ;
- Interface de connexion : optique ou électrique pour envoyer les données numériques.

#### 1.4 Caractéristiques des équipements FSO

Pour définir une liaison FSO, il faut prendre en considération les paramètres suivants [2], [3], [4], [6] :



- La portée : La portée de liaison FSO varie entre quelques dizaines de mètres à quelques kilomètres. Certains fabricants recommandent une portée maximale, d'autres proposent une portée typique pour différentes conditions météorologiques alors que d'autres indiquent une portée recommandée intégrant une marge par rapport à la valeur maximale.
- La sécurité : Représente la catégorie laser de l'équipement, elle conditionne les modalités plus ou moins aisées pour l'installation et la maintenance de la liaison FSO. Les facteurs à prendre en compte pour définir la classe laser sont : la longueur d'onde du signal, la puissance et la forme du faisceau. Il est conseillé de choisir un terminal de catégorie 1 ou 1M (dispositif représentant moins de risque), comme indiqué sur le tableau (1.1), selon la norme CEI 60825-1 [9].

Classification de laser	Puissance (mW)	Taille d'ouverture (mm)	Distance (m)	Densité de puissance (mW/cm <sup>2</sup> )
<b>Longueur d'onde 850 nm</b>				
Classe 1	0.78	7	14	2.03
		50	2000	0.04
Classe 1M	0.78	7	100	2.03
	500	7	14	1299.88
			50	2000
<b>Longueur d'onde 1550 nm</b>				
Classe 1	10	7	14	26.00
		25	2000	2.04
Classe 1M	10	3.5	100	103.99
	500	7	14	1299.88
		25	20.00	101.91

**Tableau 1. 1-** Catégorie laser [9], [10], [11].

Pour les longueurs d'ondes supérieures à 1400 nm, cas de notre étude, la cornée devient opaque vis-à-vis du rayonnement, ce qui évite tout risque oculaire [12].

- Le débit et l'application préconisée : de nombreux systèmes FSO acceptent différents débits et différents protocoles pour un intervalle de débits importants, le tableau (1.2) décrit les différentes liaisons FSO commerciaux avec leurs débits et leurs portées maximales proposés par certains fabricants.

Laser 2000 [13]		
Type liaison FSO	Débit	La portée
Liaison Laser FSO	100 Mbps	500 m
	1000 Mbps	1000 m
Liaison Laser Gigabit	1 Gbps	500 m
Liaison Laser AirBridge SX WideBeam Light Point	1 Gbps	200 m
Liaison Laser AirBridge SX WideBeam Light Point 500 m	1 Gbps	500 m
Liaison Laser AirBridge SX WideBeam Light Point 1500 m	1 Gbps	1500 m
Trimble FSO [14]		
PXAT3000FT/ PXAT3000FTH	100Mb Ethernet	200-3000m
PXATW3000GT/ PXATW3000GTH	Gigabit TX/FX Ethernet	200-3000m
PXAF500FT/ PXAF500FTH	100Mb TX Ethernet	100-500m
PXAF1000FT/ PXAF1000FTH	100Mb TX Ethernet	500-1000m
PXAFW500GT/ PXAFW500GTH	Gigabit TX/FX Ethernet	100-500m
PXMFW400GT/ PXMFW400GTH	Gigabit TX/FX Ethernet	20-400m
PXMF400GT/ PXMF400GTH	Gigabit TX/FX Ethernet	20-400m
PXW3500GT/ PXW3500GTH	Gigabit Ethernet	650-3500m
PX200FT/ PX200FTH	100Mb TX Ethernet	20-200m
PX350FT/ PX350FTH	100Mb TX Ethernet	20-0350m
PXMF650FT/ PXMF650FTH	100Mb TX Ethernet	350-650m
PX1800FT/ PX1800FTH	100Mb TX Ethernet	650-1800m
PX3000FT/ PX3000FTH	100Mb TX Ethernet	1800-3000m
PX5000FT/ PX5000FTH	100Mb TX Ethernet	3000-5000m

**Tableau 1. 2-** Type de liaison FSO disponible dans le marché [13], [14] .

### 1.5 Les avantages et les inconvénients des liaisons FSO

Les avantages de la technique FSO dans le monde des télécommunications sont [3], [4] :

- Une bande passante supérieure à celle des faisceaux hertziens et celle des micro-ondes ;
- Coût avantageux par rapport aux autres systèmes optiques ;
- Flexibilité et la rapidité d'installation et de déploiement ;
- Protocoles de communication dans les systèmes FSO sont transparents ;
- Fonctionne sans licence ;
- Niveau de sécurité élevé.

Les liaisons FSO présentent les inconvénients suivants [3] :

- Conditions météorologiques sont limitées par la portée (en cas de pluie, brouillard, neige, chaleur ambiante) ;
- Dispersion du faisceau ;
- L’alignement du faisceau : visibilité directe ;
- L’atténuation atmosphérique, relié à la composition de l’atmosphère, aux effets de scintillations et la présence d’aérosols (polluant, ...) ;
- Le rayonnement solaire ;
- Présence des obstructions physique entre l’émetteur et le récepteur.

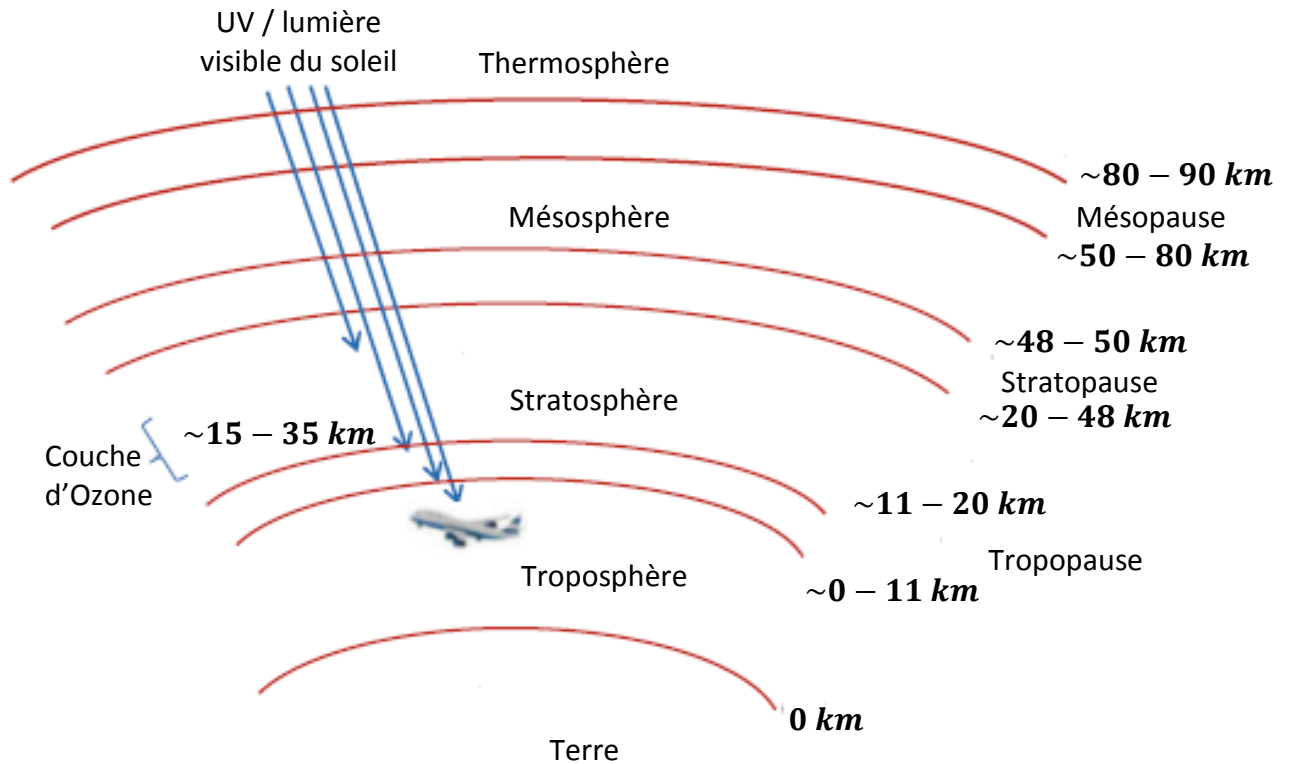
### 1.6 Applications des systèmes FSO

Les systèmes FSO sont utilisés dans les applications suivantes [4] :

- Transmission optique satellitaire dans l’espace
- LAN (Local Area Network) pour les connexions LAN dans un réseau métropolitain ;
- Installation des liaisons temporaires ;
- Etablissement une connexion haute vitesse rapidement ;
- Communication entre vaisseaux spatiaux ;
- Installation d’une liaison d’urgence en cas de panne de liaison

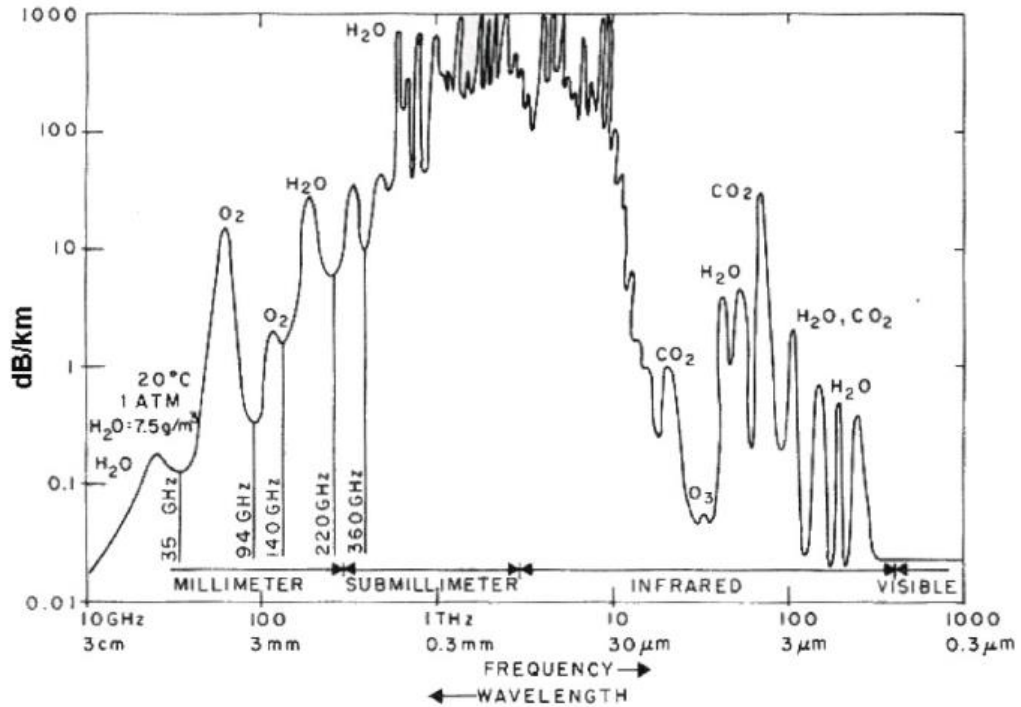
### 1.7 Modèles de canaux en transmission FSO

Le canal atmosphérique est formé d’une série de couches concentriques autour de la surface de la terre, ces dernières sont généralement classées en deux régions : homosphère et hétérosphère. L’homosphère couvre les couches inférieures, allant de 0 à 90 km d’altitude. L’hétérosphère se situe au-dessus de l’homosphère au-dessus de 90 km d’altitude. L’homosphère est constituée de trois couches : la troposphère, la stratosphère et la mésosphère. La région homosphère est formée de divers gaz, vapeur d’eau, polluants et autres produits chimiques. La concentration maximale de ces particules sont proches de la surface de la terre dans la troposphère qui s’étend jusqu’à 20 km [6], [9]. La figure (1.10) illustre les couches atmosphériques avec leurs altitudes.



**Figure 1. 10-** Différentes couches atmosphériques avec altitudes correspondantes [9].

Les particules atmosphériques interagissent avec tous les signaux qui se propagent dans l'espace libre et entraînent une détérioration du signal reçu en raison de son absorption et de sa diffusion. L'absorption est le phénomène dans lequel l'énergie du signal est absorbée par les particules présentes dans l'atmosphère, entraînant une perte d'énergie du signal. En diffusion, il n'y a pas de perte d'énergie du signal comme en absorption, mais l'énergie du signal est redistribuée (ou diffusée) dans des directions arbitraires [2], [3], [6], [9]. L'absorption et la diffusion dépendent toutes deux fortement de la longueur d'onde de fonctionnement et conduiront à une diminution du niveau de puissance reçu. La figure (1.11) illustre les effets de l'atténuation en fonction de la longueur d'onde jusqu'à  $0.3\mu m$  en temps clair. Il est montré que les pics d'atténuation à des longueurs d'onde spécifiques sont dus à l'absorption par les particules atmosphériques et par conséquent le choix de la longueur d'onde qui doit être effectuée dans la bande à haute transmission pour les liaisons de FSO.



**Figure 1. 11** - Atténuation atmosphérique en fonction de la longueur d'onde en temps clair [15].

Les conditions atmosphériques dans le canal FSO peuvent être classées en trois grandes catégories :

- Temps clair : il est caractérisé par une longue visibilité et une atténuation relativement faible ;
- Temps nuageux : il est caractérisé par une faible visibilité, il va du brouillard ou du brouillard aux gros nuages
- Temps pluvieux : il se caractérise par la présence de gouttelettes de différentes tailles et peut y avoir des effets graves en fonction du taux de précipitations.

Figure (1.12) illustre les atténuations apportées par les phénomènes atmosphériques tels que le brouillard et la pluie sur la propagation des ondes lumineuses. On constate que la pluie et le brouillard, dans la fenêtre proche l'infrarouge et visible, ont un effet prépondérant en termes d'atténuation en comparaison avec temps clair.

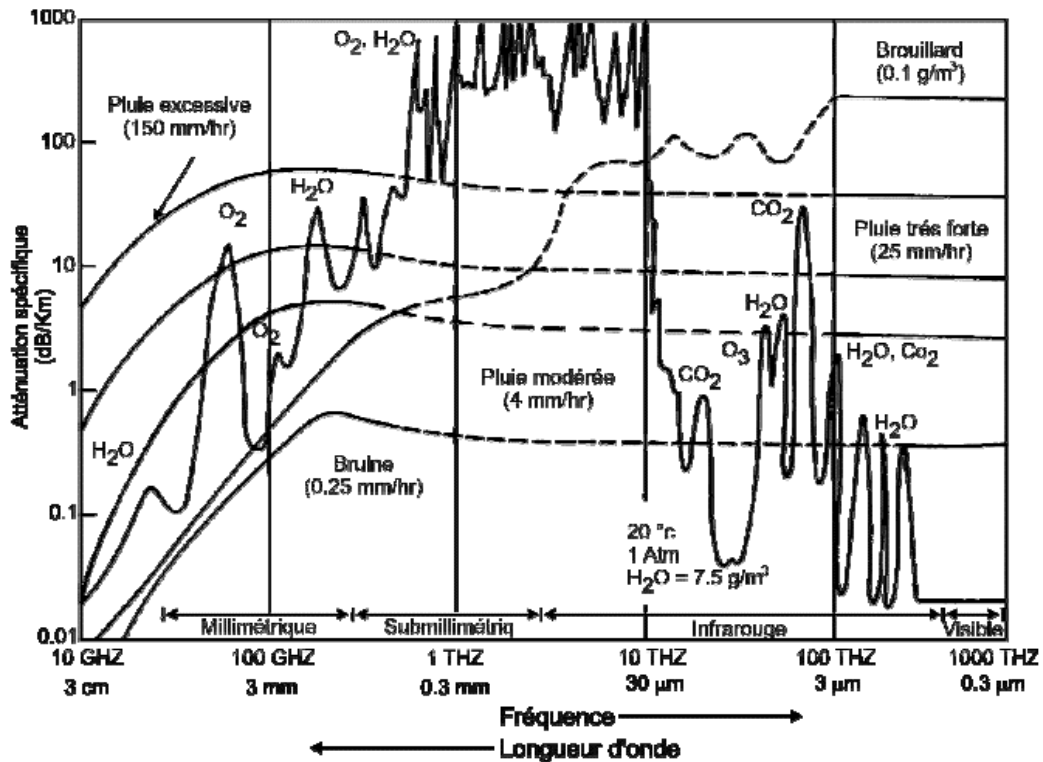


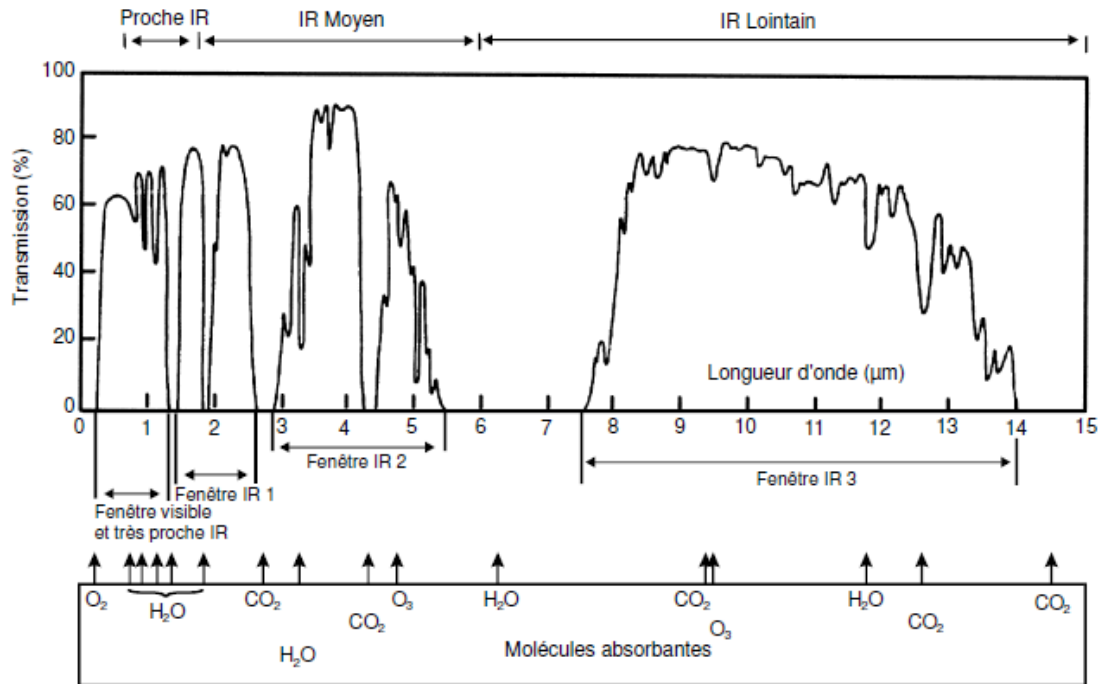
Figure 1. 12 - Atténuation atmosphérique en fonction des conditions météorologiques [3].

### 1.7.1 Atténuation atmosphérique

Le canal atmosphérique est constitué de divers gaz et autres particules minuscules telles que des aérosols, la poussière, la fumée, etc., en suspension dans l'atmosphère. Outre ces phénomènes, des précipitations importantes dues à la pluie, à la neige et au brouillard sont également présentes dans l'atmosphère. Chacun de ces constituants atmosphériques entraîne la réduction de puissance, c'est-à-dire une atténuation du signal optique due à plusieurs facteurs, notamment l'absorption de la lumière par des molécules de gaz, la diffusion de Rayleigh ou Mie [3], [9]. Cette section décrit différents types de pertes rencontrées par le faisceau optique lors de sa propagation dans le canal optique atmosphérique. Dans le système de communication FSO, lorsque le signal optique se propage dans l'atmosphère, il subit une perte de puissance due à plusieurs facteurs, comme indiqué dans les sections suivantes.

#### 1.7.1.1 Atténuation due à l'absorption et à la diffusion

L'absorption atmosphérique est un phénomène qui dépend de la longueur d'onde, de la nature et du type des molécules absorbants ainsi de leur concentration. Les longueurs d'onde du système FSO sont choisies pour une absorption minimale, comme il est indiqué dans figure (1.13), les zones transparentes sont dites fenêtres de transmission atmosphérique et les zones opaques ou fenêtre de blocage atmosphérique [2].



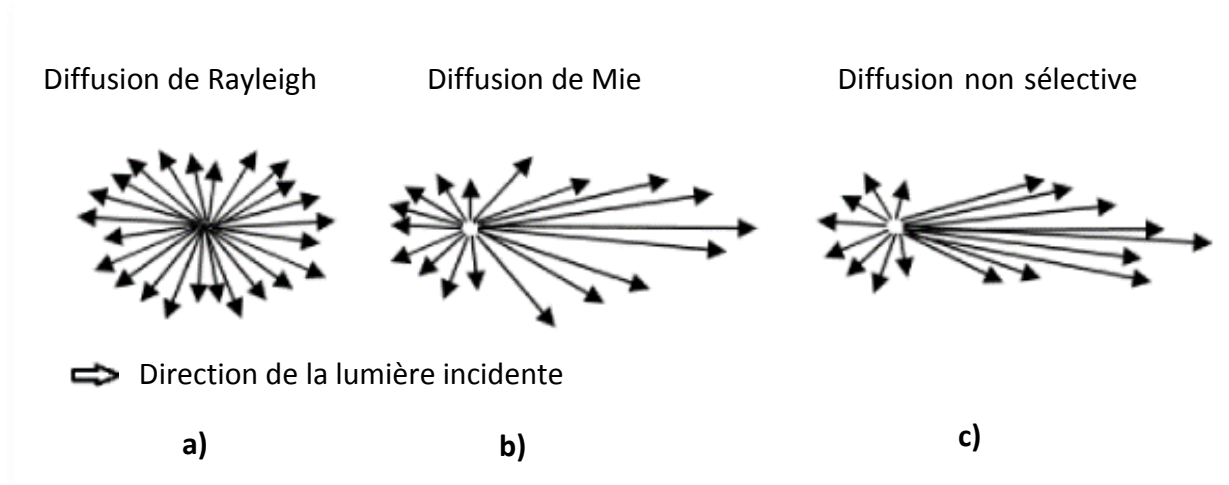
**Figure 1. 13** - Transmission à travers l’atmosphère terrestre en fonction de la longueur d’onde [2], [3], [10].

Les molécules responsables de chaque bande d’absorption sont indiquées au bas de la figure (1.13). Il apparaît que, les molécules d’eau ( $H_2O$ ) et de dioxyde de carbone ( $CO_2$ ) sont les molécules les plus absorbantes [2], [3].

La diffusion entraîne la redistribution angulaire de l’énergie optique sans changement de longueur d’onde, la diffusion 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 et sa taille [10]. On distingue trois types de diffusion en fonction du rapport entre la longueur d’onde du rayonnement et la taille de la particule : diffusion de Rayleigh, diffusion de Mie et la diffusion non sélective ou géométrique [3], [6], [16], comme il est illustré à la figure (1.14).

- Quand la taille de la particule diffusante est relativement petite par rapport à la longueur d’onde du rayonnement incident ( $r < \lambda/10$ ) ( $r$  était le rayon de la particule), l’intensité du rayonnement diffusée est la même dans les deux directions à savoir ; la rétrodiffusion et la diffusion avant (diffusion symétrique, voir figure (1.14 a)). Ce type de diffusion est connu sous le nom de la diffusion de Rayleigh.
- Quand la taille des particules devient plus grande telle que ( $\lambda/100 \leq r \leq 10\lambda$ ), 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 (figure (1.14 b)).

- 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 (figure (1.14 c)).



**Figure 1. 14** - Modèle de diffusion : a) de Rayleigh, b) de Mie et c) non sélective [17].

L'atténuation atmosphérique du rayonnement résulte d'un effet additif d'absorption et de la diffusion de la lumière visible ou infrarouge par [4] :

- Les particules d'aérosols présents dans l'atmosphère (petites particules en suspension d'une taille variable de 0.01 à 100  $\mu m$ ) ;
- Les molécules de gaz constituant l'atmosphère terrestre (localisée au-dessus de 5 km d'altitude).

La transmittance de rayonnement en fonction de la distance est donnée par la loi de Beer-Lambert [3], [4], [10], [17] :

$$\tau(\lambda, l) = \frac{P(\lambda, l)}{P(\lambda, 0)} = \exp[-\gamma(\lambda) \times l] \quad (1.1)$$

où :

$\tau(\lambda, l)$  est la transmittance de l'atmosphère pour une longueur d'onde  $\lambda$  et à distance  $l$  de l'émetteur ;

$P(\lambda, l)$  est la puissance reçue à une distance  $l$  de l'émetteur ;

$P(\lambda, 0)$  est la puissance émise ;

$\gamma(\lambda)$  est l'atténuation linéique ou coefficient d'extinction par unité de longueur parcourue.

L'atténuation atmosphérique (en dB) est donnée par la relation suivante [4] :

$$Att_{atm} = 10 \times \log_{10} \left( \frac{1}{\tau(\lambda, l)} \right) \quad (1.2)$$

Comme l'atmosphère affecte la lumière par absorption et diffusion, le coefficient d'extinction  $\gamma(\lambda)$  est la somme des coefficients d'absorption et de diffusion des aérosols et des constituants moléculaires de l'atmosphère [3], [4], [9], [10] :



$$\gamma(\lambda) = \alpha_m(\lambda) + \alpha_a(\lambda) + \beta_m(\lambda) + \beta_a(\lambda) \quad (1.3)$$

où :

$\alpha_m(\lambda)$  est le coefficient d'absorption par les molécules ( $N_2$ ,  $O_2$ ,  $H_2$ ,  $HO$ ,  $CO_2$ ,  $O_3$ ,...);

$\alpha_a(\lambda)$  est le coefficient d'absorption par les aérosols (fine particules solides ou liquides présentes dans l'atmosphère (glace, poussière, fumées,...) ;

$\beta_m(\lambda)$  est le coefficient de Rayleigh résultant de l'interaction de l'onde avec des particules de tailles plus petite que la longueur d'onde ;

$\beta_a(\lambda)$  est le coefficient de Mie. Cette diffusion apparaît lorsque les particules sont du même ordre de grandeur que la longueur d'onde émise.

### 1.7.1.2 Atténuation en espace libre

Dans un système de communication FSO en temps très clair, l'atténuation la plus importante est généralement due à une "perte en espace libre", c'est-à-dire à la perte d'énergie du signal lors de sa propagation dans l'espace libre. Le facteur d'atténuation est donné par [2], [9] :

$$L_s = \left( \frac{\lambda}{4\pi l} \right)^2 \quad (1.4)$$

où :  $l$  est la portée séparant l'émetteur et le récepteur.

L'atténuation en espace libre en temps très clair (en  $dB$ ) est donnée par la relation suivante :

$$Att_{L_s} = 10 \times \log_{10} \left( \left( \frac{4\pi l}{\lambda} \right)^2 \right) \quad (1.5)$$

La figure (1.15) illustre la variation de l'atténuation en espace libre en fonction de la portée pour trois longueurs d'onde différentes ( $\lambda = 850 \text{ nm}$ ,  $\lambda = 1000 \text{ nm}$ ,  $\lambda = 1550 \text{ nm}$ ). On constate bien que l'atténuation augmente lorsque la portée entre l'émetteur et le récepteur augmente. Nous remarquons aussi que la longueur d'onde  $\lambda = 1550 \text{ nm}$  donne des valeurs d'atténuation faible par rapport aux longueurs d'ondes  $\lambda = 1000 \text{ nm}$  et  $\lambda = 850 \text{ nm}$ .

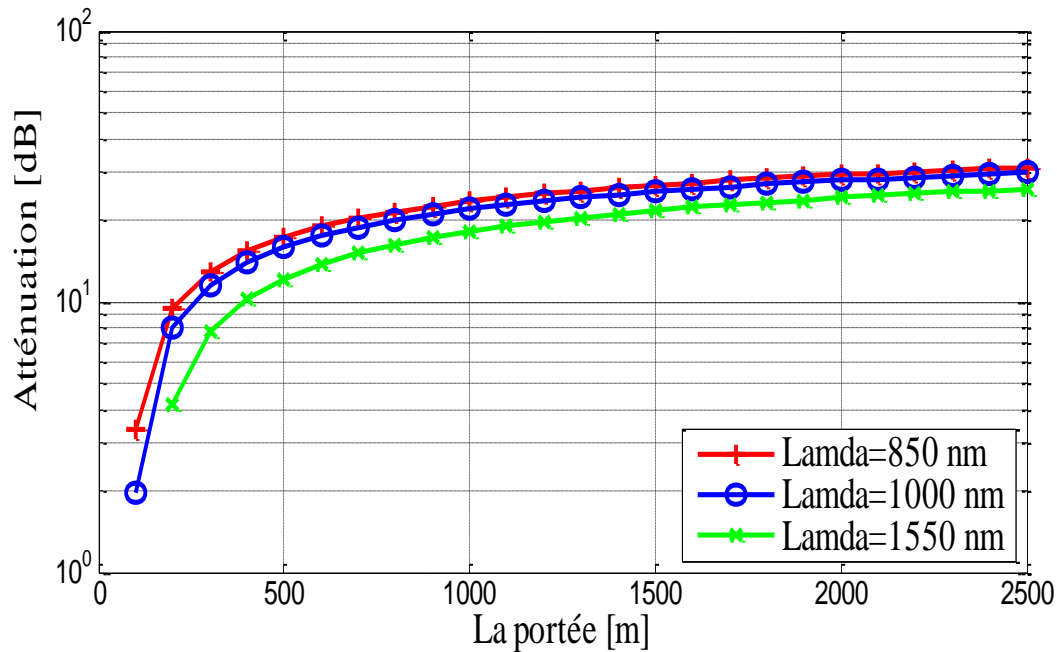


Figure 1. 15 - Atténuation en espace libre en fonction de la portée.

### 1.7.1.3 Atténuation géométrique

Lorsque la taille de faisceau optique émis dans l'atmosphère est beaucoup plus grande par rapport à l'entrée du récepteur que la surface de capture, il en résulte une atténuation de divergence du faisceau, comme illustré à la figure (1.16). Par conséquent une partie de la lumière est perdue au cours de la transmission. Un système FSO typique émet un faisceau optique de 5 à 10 cm de diamètre [9], [18], [19], [20], [21], [22] au niveau de l'émetteur, la taille de ce faisceau au niveau de récepteur peut être de plusieurs mètres de diamètre, alors que le diamètre du télescope en réception est de 8 à 30 cm [9], [18], [22], donc le récepteur n'est pas capable de collecter toute la puissance transmise, ce qui entraîne une perte d'énergie. Ce phénomène est appelé perte de trajet géométrique. La perte est en fonction de la divergence de faisceau, de la distance de la liaison et de la surface de capture du récepteur, qu'elle que soit la longueur d'onde et la puissance de l'émetteur. La figure (1.16) montre la perte due à la divergence du faisceau lorsque le récepteur ne peut collecter qu'une petite partie du faisceau transmis.

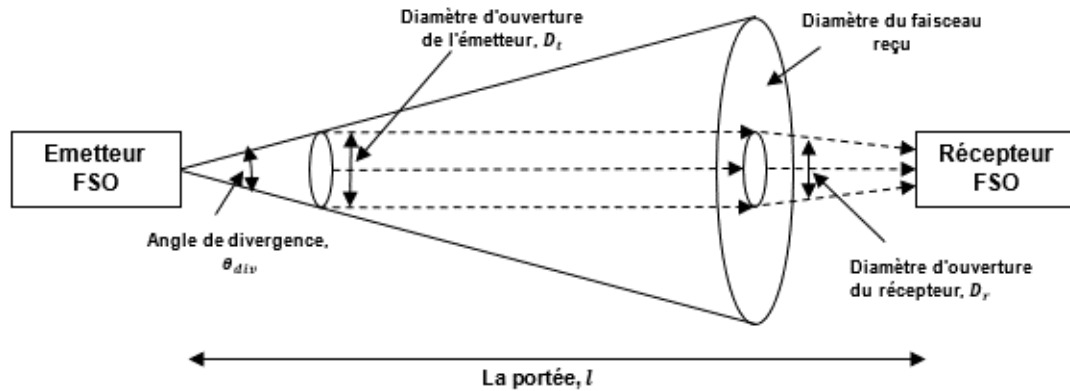


Figure 1. 16 - Mise en évidence de perte due à la divergence du faisceau [9].

La puissance optique reçu par le récepteur est donnée par [11], [23] :

$$P_r = P_t G_t G_r L_s 10^{-\gamma \times l / 10} \tau_t \tau_r \quad (1.6)$$

où  $P_t$  est la puissance transmise,  $L_s$  l'atténuation en espace libre,  $Att_{atm}$  est l'atténuation atmosphérique (on considère l'atténuation atmosphérique  $\gamma = 0$ , transmission de la lumière en temps très clair),  $G_t$  et  $G_r$  représentent respectivement le gain d'antenne effectif de l'émetteur et du récepteur,  $\tau_t$  et  $\tau_r$  représentent respectivement l'efficacité optique de l'émetteur et du récepteur (pour un maximum d'efficacité  $\tau_t = \tau_r = 1$ ). En substituant les valeurs de  $L_s \left[ = \left( \frac{\lambda}{4\pi l} \right)^2 \right]$ ,  $G_t \left[ \approx \left( \frac{4D_t}{\lambda} \right)^2 \right]$ , et  $G_r \left[ \approx \left( \frac{4D_r}{\lambda} \right)^2 \right]$  ; la puissance optique reçue s'obtient :

$$P_r \approx P_t \left( \frac{4}{\pi} \right)^2 \left( \frac{D_t^2 D_r^2}{\lambda^2 l^2} \right) \quad (1.7)$$

Par conséquent, l'atténuation de divergence du faisceau en dB par rapport à l'atténuation géométrique est définie pour deux cas :

1<sup>er</sup> cas : Pas diffraction du faisceau :

$$Att_{Geo} = 10 \times \log_{10} \left( \frac{P_r}{P_t} \right) = 10 \times \left[ 2 \times \log_{10} \left( \frac{4}{\pi} \right) + \log_{10} \left( \frac{D_t^2 D_r^2}{\lambda^2 l^2} \right) \right] \quad (1.8)$$

2<sup>eme</sup> cas : Avec diffraction du faisceau : une source d'angle de divergence  $\theta_{div}$  et de diamètre  $D_t$  rendra la taille de faisceau de  $(D_t + \theta_{div}l)$  pour une distance  $l$ . Dans ce cas, la fraction de la puissance reçue  $P_r$  par rapport à la puissance transmise  $P_t$  est donnée par [9], [10], [17] :

$$\frac{P_r}{P_t} = \frac{D_r^2}{(D_t + \theta_{div}l)^2} \quad (1.9)$$

L'atténuation géométrique en  $dB$  sera :

$$Att_{Geo} = 10 \times \log_{10} \left( \frac{D_r^2}{(D_t + \theta_{div} \times l)^2} \right) = 20 \times \log_{10} \left( \frac{D_r}{D_t + \theta_{div} \times l} \right) \quad (1.10)$$

En général, une source optique avec une divergence étroite du faisceau est préférable par rapport à une divergence étendue du faisceau. Mais une divergence étroite du faisceau provoque la rupture du lien en cas de léger mal-alignement entre les émetteurs-récepteurs.

La figure (1.17) représente la variation de l'atténuation géométrique (équation (1.10)) d'un faisceau optique en fonction de la portée pour trois angles de divergence (1  $mrad$ , 2  $mrad$  et 3  $mrad$ ). On constate que l'atténuation géométrique augmente avec l'augmentation de la portée entre l'émetteur et le récepteur, on constate aussi une augmentation de l'angle de divergence entraîne une augmentation de l'atténuation géométrique.

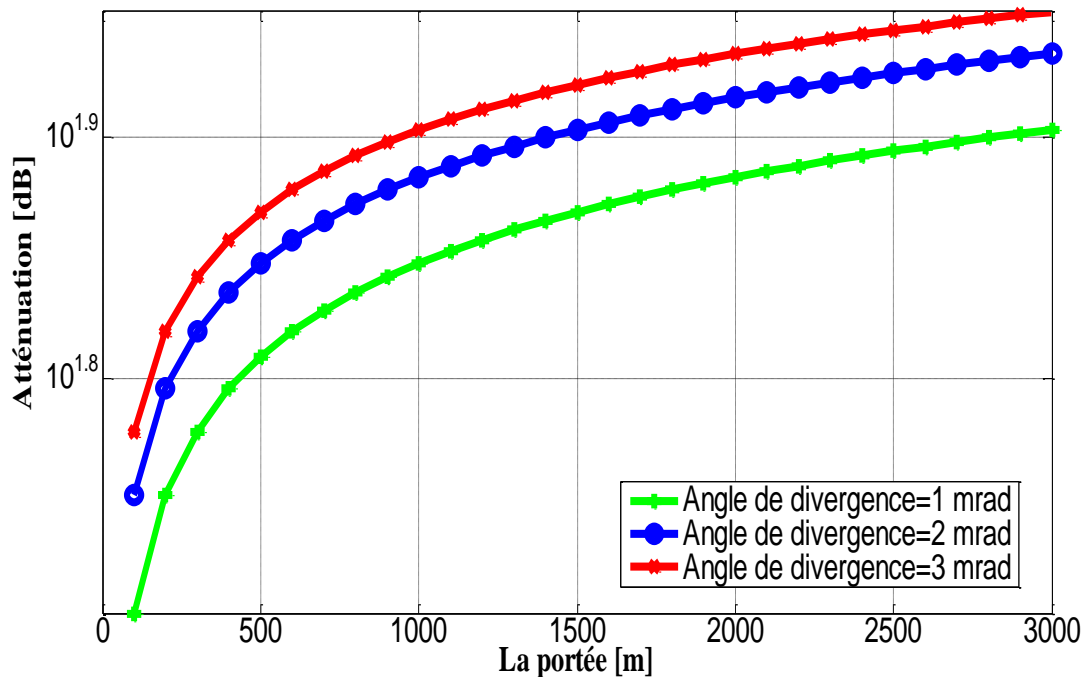


Figure 1. 17 - Atténuation géométrique en fonction de la portée.

#### 1.7.1.4 Atténuation due aux conditions météorologiques

Les performances de la liaison FSO est soumise à divers facteurs environnementaux tels que le brouillard, la neige et la pluie, etc., qui entraînent une diminution de la puissance du signal reçu. Parmi ces facteurs environnementaux, l'atténuation atmosphérique qui est généralement dominée par le brouillard, étant donné que la taille des particules du brouillard est comparable à la longueur d'onde d'intérêt dans le système FSO. Cela peut modifier les caractéristiques du signal optique ou entraver complètement le passage de la lumière en

raison de l'absorption, de la diffusion et de la réflexion. La visibilité atmosphérique est la mesure utile pour prédire les conditions environnementales atmosphériques. La visibilité est définie comme la distance parcourue par un faisceau lumineux parallèle dans l'atmosphère jusqu'à ce que son intensité chute de 2% de sa valeur d'origine. Afin de prédire les statistiques d'atténuation optique à partir des statistiques de visibilité pour estimer la disponibilité du système FSO, il faut connaître la relation entre visibilité et atténuation. Plusieurs modèles décrivant la relation entre visibilité et atténuation optique sont donnés dans [3]. Pour caractériser l'atténuation d'un signal optique se propageant à travers un milieu, on utilise ce que l'on appelle « atténuation spécifique » qui désigne l'atténuation par unité de longueur exprimée en  $(dB/km)$  [9] :

$$\beta(\lambda) = \frac{1}{l} \times 10 \log_{10} \left( \frac{P_t}{P_r} \right) = \frac{1}{l} \times 10 \log_{10} (e^{\gamma(\lambda) \times l}) \quad (1.11)$$

où  $l$  est la portée entre l'émetteur et le récepteur,  $P_t$  la puissance optique émise par l'émetteur,  $P_r$  la puissance optique reçue à la distance  $l$  et  $\gamma(\lambda)$  représente le coefficient d'atténuation atmosphérique. L'atténuation spécifique due au brouillard, à la neige et à la pluie est décrite ci-dessous.

- Atténuation spécifique due au brouillard : On peut prévoir l'atténuation due au brouillard en appliquant la théorie de la diffusion de Mie. Cependant, cela implique des calculs complexes et nécessite des informations détaillées sur les paramètres de brouillard. Une autre approche est basée sur les informations de plage de visibilité, dans lesquelles l'atténuation due au brouillard est prédite à l'aide de modèles empiriques courants. La longueur d'onde de 550 nm est généralement considérée comme la longueur d'onde de référence de la plage de visibilité [2], [3]. L'équation (1.12) définit l'atténuation spécifique du brouillard donnée par un modèle empirique commun pour la diffusion de Mie [3], [10], [20].

$$\gamma_{brouillard}(\lambda) = \frac{3.912}{v} \left( \frac{\lambda}{550} \right)^{-q} \quad (1.12)$$

où  $v(km)$  représente la visibilité,  $\lambda(nm)$  la longueur d'onde et  $q$  le coefficient de distribution de la taille de la diffusion.

Selon le modèle de Kruse [24],  $q$  est donné par :

$$q = \begin{cases} 1.6 & \text{Si } v > 50 \text{ km} \\ 1.3 & \text{Si } 6 \text{ km} < v < 50 \text{ km} \\ 0.585v^{1/3} & \text{Si } v < 6 \text{ km} \end{cases} \quad (1.13)$$

Selon le modèle de Kim [25],  $q$  est donné par :

$$q = \begin{cases} 1.6 & \text{Si } v > 50 \text{ km} \\ 1.3 & \text{Si } 6 \text{ km} < v < 50 \text{ km} \\ 0.16v + 0.34 & \text{Si } 1 \text{ km} < v < 6 \text{ km} \\ v - 0.5 & \text{Si } 0.5 \text{ km} < v < 1 \text{ km} \\ 0 & \text{Si } v < 0.5 \text{ km} \end{cases} \quad (1.14)$$

Dans les conditions météorologiques de faible visibilité, c'est-à-dire par temps de brouillard et de nuages épais, la longueur d'onde de fonctionnement a un effet négligeable sur l'atténuation spécifique, tandis que pour un brouillard léger et une brume lorsque la plage de visibilité est élevée (6 km), l'atténuation est faible, à 1550 nm par rapport à 850 et 950 nm. À mesure que la visibilité augmente au-delà de 20 km (temps clair), la dépendance de l'atténuation sur la longueur d'onde diminue à nouveau [3], [9]. Al Naboulsi a développé à partir de méthode Fascode deux relations pour deux types de brouillard : le brouillard d'advection et le brouillard de convection. L'atténuation par un brouillard d'advection et de convection s'exprime par les relations suivantes [3] :

$$\sigma_{advection} = \frac{0.11478\lambda + 3.8367}{v} \quad (1.15)$$

$$\sigma_{convection} = \frac{0.18126\lambda^2 + 0.13709\lambda + 3.7502}{v} \quad (1.16)$$

- Atténuation spécifique due à la neige : l'atténuation due à la neige peut varier en fonction de la taille du flocon de neige et du taux de chute de neige. Étant donné que les flocons de neige sont plus gros que les gouttes de pluie, ils produisent des évanouissements plus profonds dans le signal que les gouttes de pluie. La taille des flocons de neige peut atteindre 20 mm, ce qui peut bloquer complètement le trajet du signal optique en fonction de la largeur du faisceau du signal. Pour la neige, l'atténuation peut être classée en atténuation de neige sèche et de neige humide. L'atténuation spécifique ( $dB/km$ ) du taux de neige  $S$  en ( $mm/h$ ) est donnée par l'équation suivante [9], [21] :

$$\gamma_{neige} = aS^b \quad (1.17)$$

où les valeurs des paramètres  $a$  et  $b$  dans la neige sèche et humide sont [9], [21] :

$$\text{Neige sèche :} \quad a = 5.42 \times 10^{-5} + 5.4958776, \quad b = 1.38 \quad (1.18)$$

$$\text{Neige humide :} \quad a = 1.023 \times 10^{-4} + 3.7855466, \quad b = 0.72 \quad (1.19)$$

- Atténuation spécifique due à la pluie : les grosses gouttelettes de pluie peuvent provoquer une diffusion indépendante de la longueur d'onde, et l'atténuation

produite par la pluie augmente de façon linéaire avec le taux de précipitation. L'atténuation spécifique du taux de pluie  $R(mm/h)$  est donnée par [9]:

$$\gamma_{pluie} = 1.076 \times R^{0.67} \quad (1.20)$$

### 1.7.1.5 Atténuation de Pointage

L'atténuation de pointage est les erreurs dus au mal-alignement entre l'émetteur et le récepteur dans le cas d'une liaison optique en espace libre. Le mal-alignement est le résultat des vibrations de la terre [9].

L'atténuation de mal-alignement peut entraîner une dégradation importante des performances du système. La puissance transmise affectée au pointage du faisceau optique n'est pas utilisée pour la communication. Par conséquent, il est hautement souhaitable de maintenir l'atténuation de mal-alignement du faisceau laser étroit aussi petite que possible, afin de disposer de la puissance suffisante pour la communication. L'atténuation de mal-alignement du faisceau à prendre en compte pour l'analyse du bilan de liaison est donnée en tant que [9]:

$$L_p = \exp\left(\frac{-8\theta_{gigue}^2}{\theta_{div}^2}\right) \quad (1.21)$$

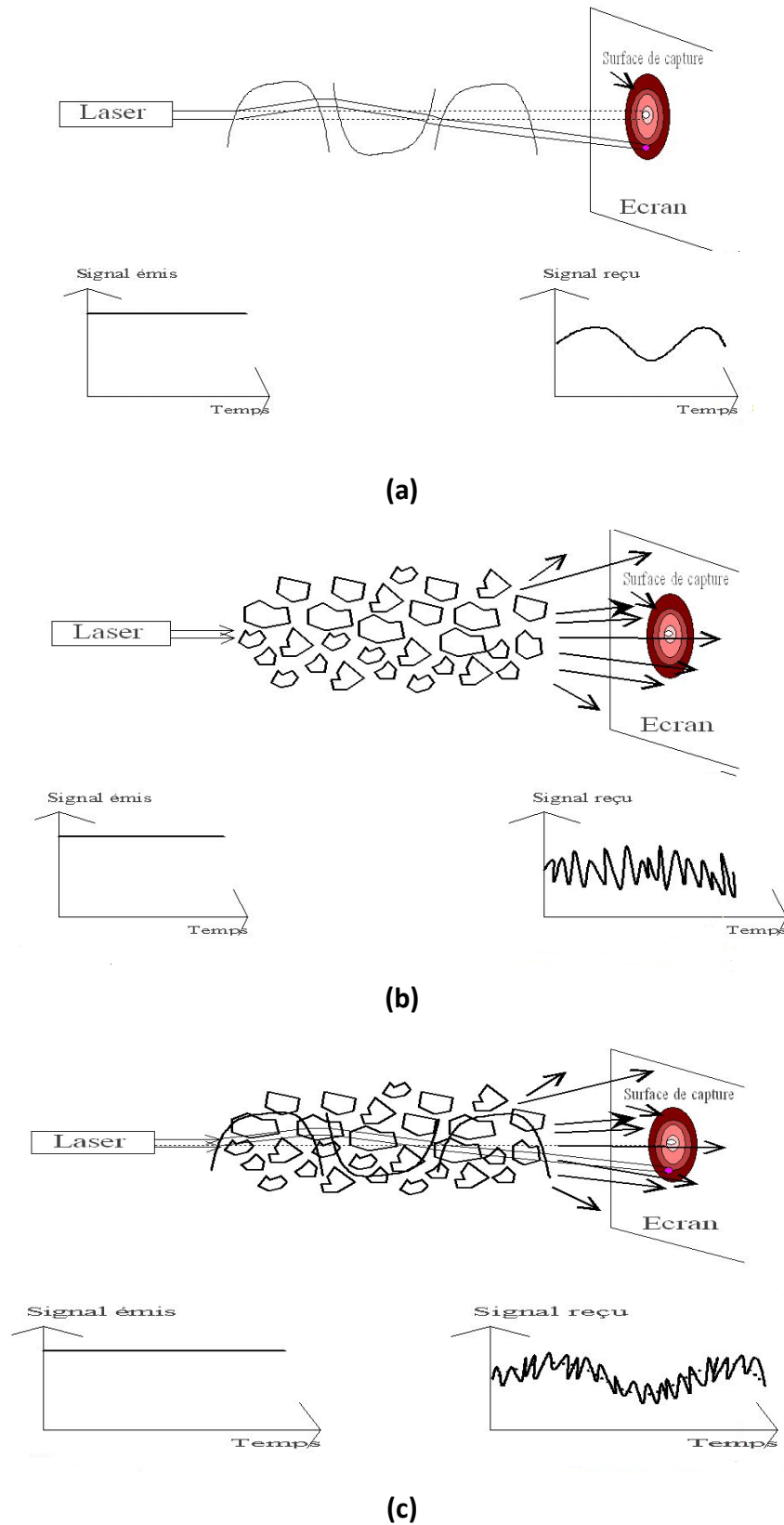
où  $\theta_{gigue}$  est l'angle de gigue du faisceau et  $\theta_{div}$  l'angle de divergence du faisceau de l'émetteur, comme indiqué à la Figure (1.16).

### 1.7.2 Scintillation

La propagation d'un faisceau lumineux en espace libre sous l'effet de la turbulence thermique provoque une formation de cellules aléatoirement réparties de taille variable (10 cm – 1 km) et de température différentes [26]. Ces différentes cellules possèdent des indices de réfraction différents provoquant ainsi :

- La diffusion;
- Les multiples;
- La variation des angles d'arrivée.

Le signal reçu fluctue rapidement à des fréquences comprises entre 0.01 et 200 Hz. Le front d'onde varie de façon similaire provoquant focalisation et défocalisation du faisceau. De telles fluctuations spatiales et temporelles du faisceau sont appelées scintillations [26]. La figure (1.18) schématise cet effet ainsi que les variations (amplitude, fréquence) sur le signal reçu. Lorsque les cellules de turbulence sont plus grandes par rapport au diamètre du faisceau, ce dernier est dévié (figure (1.18 a)) ; lorsqu'elles sont petites, le faisceau est élargi (figure (1.18 b)). Lorsque les hétérogénéités ont des tailles différentes, on est en présence de scintillations (figure (1.18 c)).



**Figure 1. 18** - Déviation du faisceau sous l'influence de cellules de turbulence (a) cellules plus grandes que le diamètre du faisceau (déviation du faisceau), (b) cellules plus petites que le diamètre du faisceau (élargissement du faisceau) (c) cellules de turbulence de différentes tailles (scintillation) [26].



L'effet de la scintillation est généralement étudié à partir du logarithme de l'amplitude  $\chi[dB]$  du signal observé (« log-amplitude »), définie comme le rapport en décibels de son amplitude instantanée à sa valeur moyenne [4], [26]. L'intensité et la rapidité des fluctuations (fréquence des scintillations) augmentent avec la fréquence de l'onde. Pour une onde plane, une turbulence faible et un récepteur ponctuel, la variation de « log-amplitude » de scintillation  $\sigma_\chi^2[dB^2]$  peut s'exprimer par la relation suivante [3], [4], [26] :

$$\sigma_\chi^2 = 23.17 \times k^{7/6} \times C_n^2 \times l^{11/6} \quad (1.22)$$

où :

$k [m^{-1}]$  est le nombre d'onde ( $2\pi/\lambda$ ) ;

$l [m]$  est la portée ;

$C_n^2 [m^{-2/3}]$  est le paramètre de structure de l'indice de réfraction, représentant l'intensité de la turbulence.

L'amplitude crête à crête de scintillation vaut ( $4\sigma_\chi$ ), et l'atténuation liée à la scintillation est :

$$\gamma_{scintillation} = 2 \times \sigma_\chi = 2 \times \sqrt{23.17 \times k^{7/6} \times C_n^2 \times l^{11/6}} \quad (1.23)$$

En optique, la valeur de  $C_n^2$  est de l'ordre de  $2 \times 10^{-15} m^{-2/3}$ , ce qui est une turbulence faible (en général nous avons  $10^{-16} < C_n^2 < 10^{-13}$ ) [3], [4], [26].

### 1.8 La sécurité oculaire

Dans les communications en espace libre ou dans le cas de l'utilisation d'un faisceau laser, la sécurité oculaire est très primordiale. Elle est liée généralement au choix de la longueur d'onde d'émission de la diode laser. Les faisceaux dont la bande spectrale est comprise entre 1.5 et 1.55  $\mu m$  sont dite à sécurité oculaire car le rayonnement est absorbé à 80% par la cornée et préserve ainsi la rétine [9], [10].

Les standards pour la sécurité oculaire sont établis par l'IEC (IEC : International Electrotechnical Commission en anglais), et connu sous le nom IEC 60825. Les standards sont classés par catégorie, allant de classe 1 pour les dispositifs présentant le moins de risques, jusqu'à la classe 4, pour les dispositifs présentent plus de risques.

### 1.9 Conclusion

La propagation d'un rayonnement optique dépend de la composition chimique de l'atmosphère terrestre et de la présence de différents types de particules en suspension dans l'air. Aussi, les différentes conditions météorologiques telles que : le brouillard, la pluie, la neige et la scintillation peuvent réduire la puissance du faisceau lumineux en espace libre.

Nous avons vu, dans ce chapitre, la présentation et le principe de fonctionnement des liaisons FSO, en définissant sa chaîne de transmission ; en explicitant les types de modulation à l'émission et les modes de détection à la réception. Nous avons décrit aussi, les caractéristiques des équipements FSO, leurs avantages, leurs inconvénients et leurs applications.

L'ensemble des atténuations affectant la propagation de faisceau en termes d'énergie ou de puissance optique sont détaillés dans ce chapitre notamment les atténuations dues aux conditions météorologiques. Enfin la dernière partie de ce chapitre décrit les standards pour la sécurité oculaire et les classes, selon les risques, des dispositifs utilisés.

Nous envisagerons, dans le chapitre suivant, de présenter la technique d'accès multiple par répartition de code dans le domaine spectrale SAC-OCDMA.

## Chapitre 2

# Présentation de la technique d'accès multiple par répartition de codes dans le domaine spectral (SAC-OCDMA)

### 2.1 Introduction

Dans ce chapitre nous limitons l'analyse à un seul type d'OCDMA (OCDMA : Optical Code Division Multiplexing Access, en anglais). Il s'agit de l'encodage spectral d'amplitude (SAC : Spectral Amplitude Coding, en anglais) dont les sources optiques sont des sources incohérentes souvent considérées dû à leurs grandes largeurs de bande optique favorisant le découpage du spectre pour réaliser l'encodage. Toutefois, le bruit d'intensité relié à cette source limite les performances du système [27].

Nous verrons dans un premier temps les principes de base de la technique d'accès multiple par répartition de codes dans le domaine spectral (SAC-OCDMA) : l'encodage et le décodage du signal. Ensuite, nous allons analyser les différents types de bruit présents dans ce genre de système.

### 2.2 Définition de la technique SAC-OCDMA

Dans la technique d'accès SAC-OCDMA chaque utilisateur a son propre code spectral (qui constitue sa signature ou son empreinte). Comme l'illustre la figure (2.1), à chaque utilisateur, est associé un code constitué à partir d'une combinaison de plusieurs longueurs d'onde bien spécifique [28] est différent à celui des codes des autres utilisateurs.

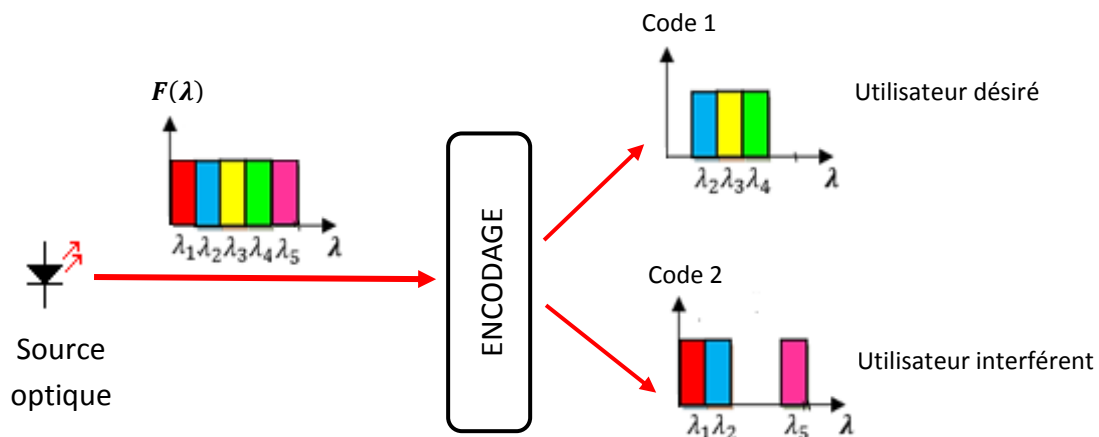


Figure 2. 1 – Encodage SAC-OCDMA.

A partir d'un spectre d'une source large bande, l'encodeur a pour rôle d'affecter un code spectral unique à chaque utilisateur comme l'illustre la figure (2.1) : Le code 1 de l'utilisateur désirée est « 01110 » et le code 2 : « 11001 » pour l'utilisateur 2 (interférent). Ils existent plusieurs technologies utilisées pour l'encodage. Parmi les techniques d'encodage SAC-OCDMA, on trouve :

- Encodage par masque d'amplitude (figure (2.2 a)) ;
- Encodage par AWG (AWG: Arrayed Waveguide Grating en anglais) (figure (2.2 b));
- Encodage par l'utilisation des réseaux de Bragg (figure (2.2 c)) ;
- Encodage par démultiplexeur et multiplexeur optique (figure (2.2 d)).

Ces composants vont permettre de générer des codes spectraux comme l'illustre la figure (2.2).

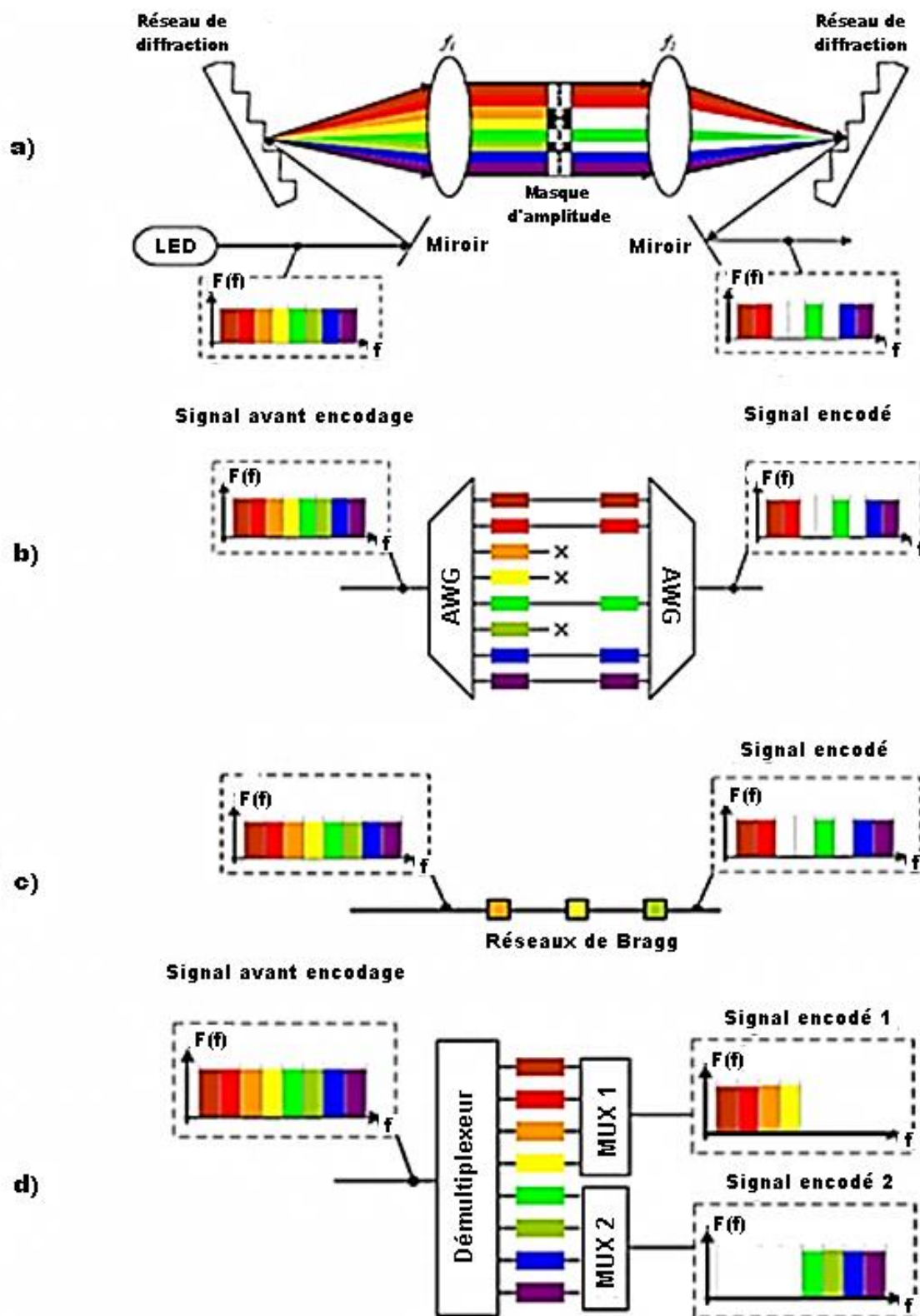


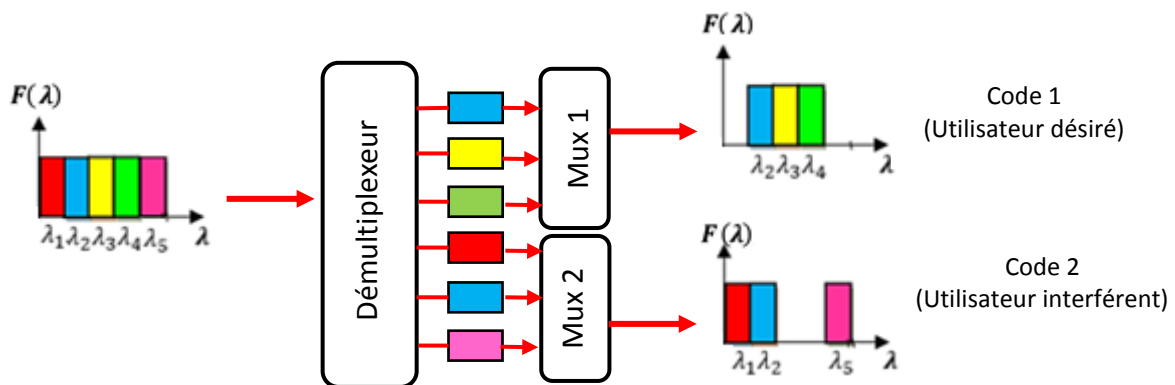
Figure 2. 2 - Technologie d'encodage OCDMA spectral : a) Masque d'amplitude, b) AWG, c) Réseaux de Bragg, d) Démultiplexeurs et multiplexeurs optiques [29], [30].

### 2.3 Encodage et décodage SAC-OCDMA

Le processus d'encodage affecte un code spectral unique aux données de chaque utilisateur en partageant la bande optique disponible. Les différents codes ne sont pas forcément orthogonaux entre eux ; ainsi le but de l'opération de décodage est la séparation d'un signal parmi tous les signaux reçus en exploitant les propriétés des codes utilisés.

#### 2.3.1 Encodage

A partir d'une source de lumière, large bande incohérente, on obtient  $L$  bandes fréquentielles en subdivisant son spectre en  $L$  tranches spectrales où  $L$  représente la longueur du code spectral. L'encodage spectral est obtenu par combinaison de  $w$  ( $w$  désigne le poids) tranches, selon une règle donnée, parmi  $L$  tranches fréquentielles disponible. L'encodeur considéré dans cette thèse est composé d'un démultiplexeur et un nombre déterminé de multiplexeur (selon la cardinalité offerte par la famille de code choisie). Lors du partage du spectre de la source, il peut y avoir un certain nombre de tranches fréquentielles communes entre les deux codes. Cette redondance est indiquée par le symbole  $\lambda_c$  qui désigne la corrélation croisée. A la figure (2.3), le code spectral « 01110 » est choisi pour le code de l'utilisateur 1, (désigné comme utilisateur désiré), le code « 11001 » correspond à l'utilisateur interférent. Nous avons choisi pour cette exemple,  $L = 5$ ,  $w = 3$  et  $\lambda_c = 1$ .

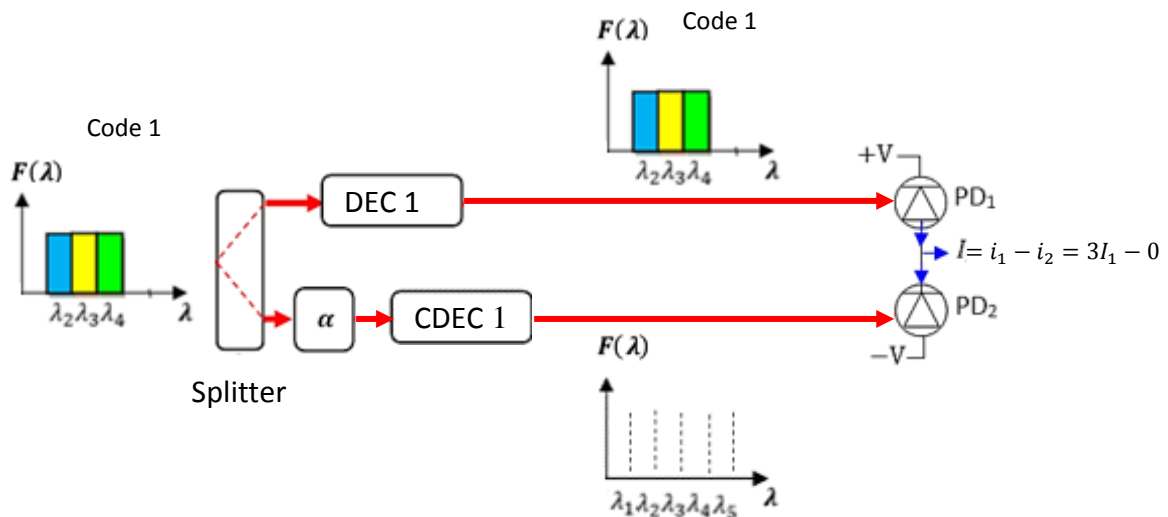


**Figure 2. 3** - Principe de l'encodage spectral SAC-OCDMA par Démultiplexeur/Multiplexeurs.

#### 2.3.2 Décodage

Le rôle du décodeur est non seulement la détection des données qui lui sont destinées mais de rejeter les signaux des autres utilisateurs considérés comme interférents. La figure (2.4) illustre la structure d'un décodeur SAC-OCDMA. Dans cette structure, le récepteur est constitué d'un splitter ( $1 \times 2$ ) où la branche supérieure comporte le décodeur de l'utilisateur

désiré (DEC 1) ayant le même spectre que celui du code de l'utilisateur désiré. La branche inférieure comporte un décodeur dont le spectre est complémentaire (CDEC 2) à celui du code de l'utilisateur désiré. Le code spectral du CDEC 1 est simplement le complément binaire du code de DEC 1.



$I_1$  : courant résultant de la détection d'une longueur d'onde

Figure 2. 4 - Principe du décodage pour l'utilisateur désiré.

Le code spectral du DEC 1 est « 01110 » alors que le code spectral du CDEC 1 est « 10001 ». Le facteur d'atténuation est donné par [28], [30] :

$$\alpha = \frac{\lambda_c}{w - \lambda_c} \quad (2.1)$$

où :  $\lambda_c$  représente la corrélation croisée entre les codes d'une même famille.

Dans la branche supérieure et inférieure, le résultat du filtrage effectué par le codeur DEC 1 et son complément CDEC 1 peut être expliqué en effectuant l'opération logique AND entre le code spectral du code 1 avec le code spectral du DEC 1 et son complément CDEC 1 comme suit :

$$\underbrace{01110}_{code\ 1} \otimes \underbrace{01110}_{DEC1} = 01110 \quad (2.2)$$

$$\underbrace{01110}_{code\ 1} \otimes \underbrace{10001}_{CDEC1} = 00000 \quad (2.3)$$

On constate que la totalité du signal est détecté par la photodiode PD1, par contre aucun signal n'est détecté par la photodiode PD2. Ce type de récepteur permet d'annuler le signal d'un utilisateur interférent. La figure (2.5) illustre le fonctionnement du récepteur dans le cas où le signal reçu est émis avec le code 2 (utilisateur interférent).

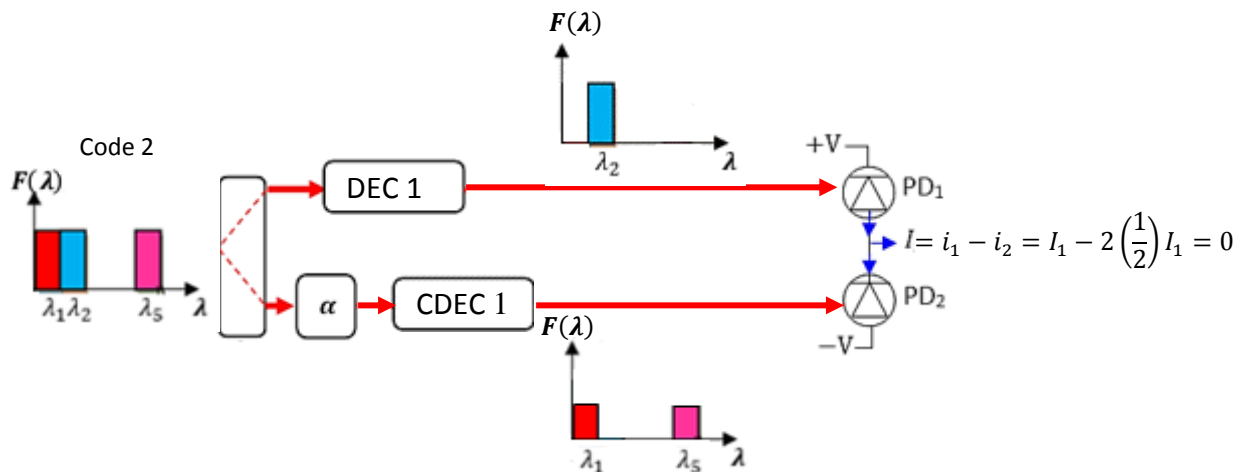


Figure 2. 5 - Principe du décodage pour l'utilisateur interférent.

On constate que la photodiode PD1 détecte une seule onde ( $\lambda_2$ ) puisqu'il y'a qu'une fréquence commune ( $\lambda_c = 1$ ) entre le code 1 de l'utilisateur désiré et le code 2 de l'utilisateur interférent. Dans la branche inférieure, à la sortie du décodeur CDEC 1, on trouve seulement ( $w - \lambda_c = 3 - 1 = 2$ ) tranches fréquentielles, ces dernières sont atténuées d'un facteur  $\alpha = \frac{\lambda_c}{w - \lambda_c} = 1/2$ , et détectées par la photodiode PD2. Ainsi le courant résultant du signal interférent est :  $\lambda_c - \left(\frac{\lambda_c}{w - \lambda_c}\right) \times (w - \lambda_c) = I_1 - 2 \left(\frac{1}{2}\right) I_1 = 0$ . On conclut, qu'un récepteur basé sur une photodiode équilibrée permet de détecter un signal désiré sans interférences à condition que  $L$ ,  $w$  et  $\lambda_c$  soient constantes pour tous les utilisateurs.

### 2.3.3 Détection directe

Dans le cas où les codes utilisés n'ont aucune tranche fréquentielle commune entre eux ( $\lambda_c = 0$ ), la technique de détection utilisée est la technique dite directe, c'est un cas particulier de la détection équilibrée avec  $\alpha = 0$  [28] [30]. Dans ce cas une seule branche du décodeur est nécessaire. La figure (2.6) montre le principe de fonctionnement dans le cas d'une détection directe d'une seule longueur d'onde appartenant au code de l'utilisateur désiré ou dans le cas de toutes les longueurs d'ondes (figure (2.6)).



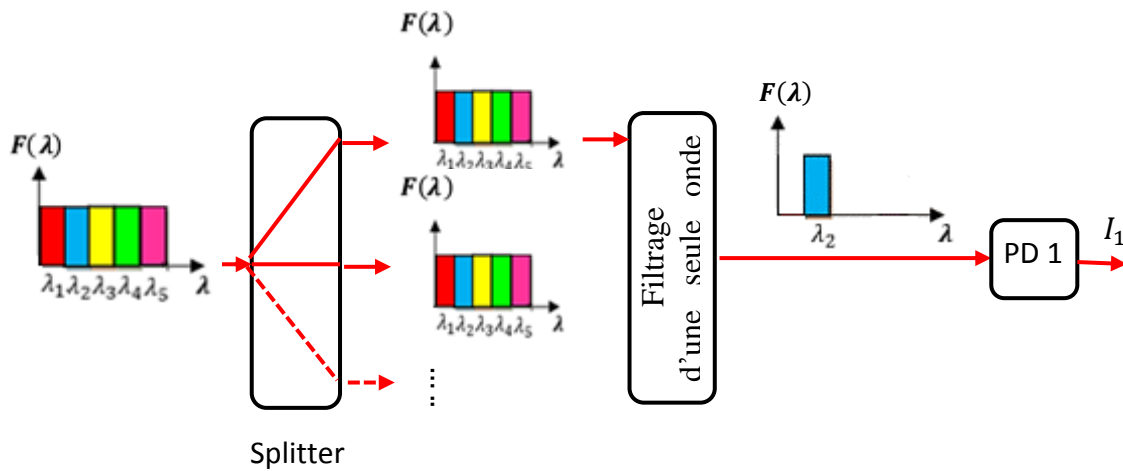


Figure 2. 6 – Principe de la détection directe, cas d'une seule longueur d'onde.

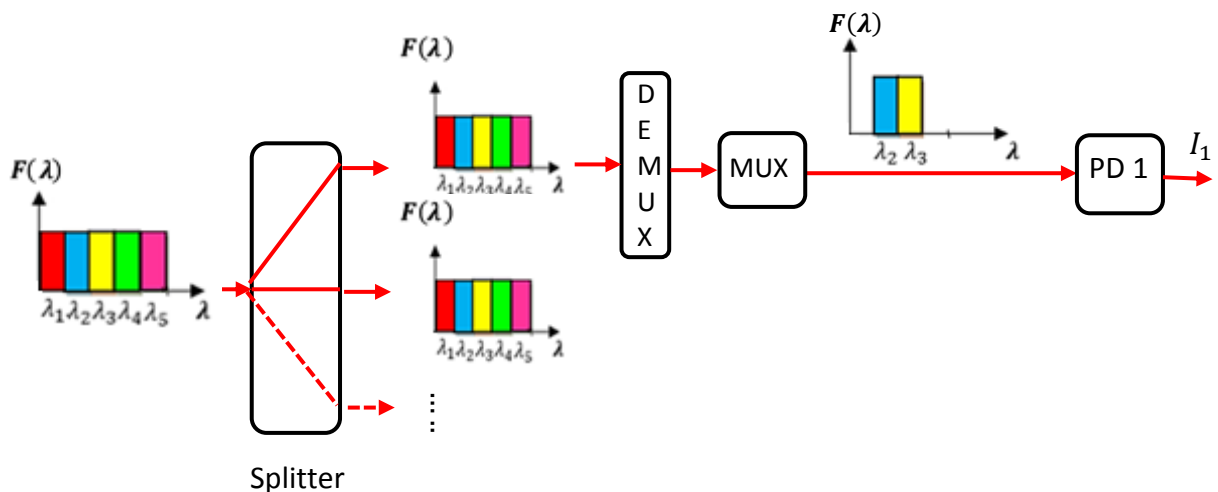


Figure 2. 7 - Principe de la détection directe, cas de toutes les longueurs d'onde d'un code.

Après avoir présenté le principe de fonctionnement général de l'encodage et de décodage de la technique SAC-OCDMA, nous allons présenter les différents types de bruits qui affectent les performances d'un système optique utilisant des sources à large bande.

#### 2.4 Bruit en SAC-OCDMA incohérent

Cette partie est consacrée à la présentation des bruits que l'on observe lors de la détection d'un signal incohérent. Les trois bruits principalement observés dans les systèmes utilisant des sources incohérentes sont : le bruit thermique, le bruit de grenaille et le bruit d'intensité qui limite les performances du système.

On rappelle la formule donnant le photocourant  $I$  généré par un signal optique de puissance  $P$  après photodétection [27] :

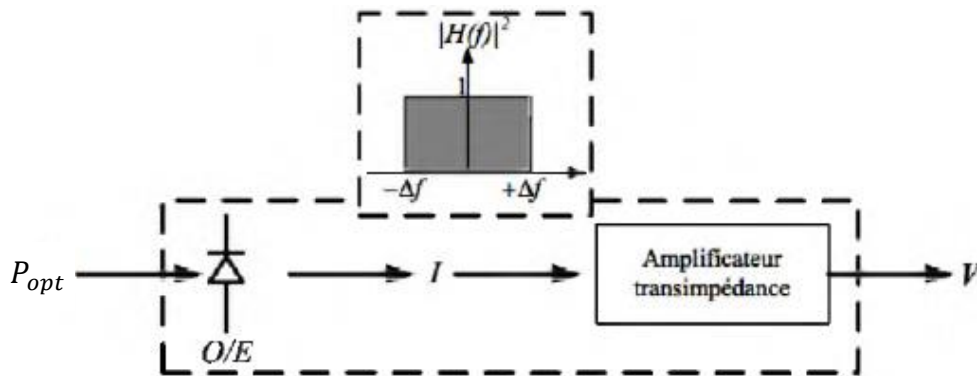
$$I = \mathfrak{R} \times P_{opt} = \frac{\eta e}{h\nu} \times P_{opt} \quad (2.4)$$

où  $\mathfrak{R}$  est la responsivité du photodétecteur (ou le rendement de la photodiode) exprimé en [A/W],  $\eta$  le rendement quantique,  $e$  la charge de l'électron en [C],  $h$  la constante de Planck [J.S] et  $\nu$  la fréquence optique du signal en [Hz]..

La photodiode intègre souvent un amplificateur transimpédance dont le but est de convertir le photocourant  $I$  généré en une tension  $V$  telle que [27]:

$$V = G_{PD} \times I \quad (2.5)$$

Avec  $G_{PD}$  le gain de l'amplificateur transimpédance en [V/A]. Le processus de transformation d'une puissance lumineuse en une tension est décrit sur la figure (2.8). Toutes ces transformations sont considérées comme linéaires. Cela implique que toutes les variations de la puissance optique  $P_{opt}$  seront répercutées linéairement sur le photocourant  $I$  et la tension  $V$ .



**Figure 2. 8** - Conversion d'une puissance optique  $P_{opt}$  en une tension électrique  $V$  [27].

Avec  $P_{opt}$  la puissance optique, O/E conversion optique électrique à l'aide d'une photodiode,  $I$  est le photocourant généré par la photodiode,  $V$  la tension à la sortie de la photodiode et  $|H(f)|^2$  est la réponse en fréquence normalisée du détecteur.

#### 2.4.1 Bruit thermique

Ce bruit est dû à l'agitation thermique des porteurs de charges dans la jonction de la photodiode. Il suit une statistique gaussienne, ce bruit introduit une variance  $\sigma_{Th}^2$  sur la tension à la sortie du photodétecteur [27], [29] :

$$\sigma_{Th}^2 = 4K_B T \frac{\Delta f}{R_c} \times G_{PD}^2 \quad (2.6)$$

Avec  $K_B$  la constante de Boltzmann en [J.K<sup>-1</sup>],  $T$  la température en [°K],  $\Delta f$  la bande passante du récepteur en [Hz] et  $R_c$  la résistance de charge du système de photodétection en [ $\Omega$ ].

#### 2.4.2 Bruit de grenaille (shot noise)

Ce bruit est dû au caractère aléatoire de la création de paires électron-trou dans la photodiode. Il obéit à une statistique de Poisson. La variance  $\sigma_{Sh}^2$  de ce bruit est définie par la relation [27], [29]:

$$\sigma_{Sh}^2 = e \cdot \Delta f \cdot \bar{V} \times G_{PD} \quad (2.7)$$

La puissance de ce bruit est proportionnelle à la tension moyenne  $V$ .

#### 2.4.3 Bruit d'intensité

Ce bruit est dû à la nature quadratique de la détection. Le signal émis par une source thermique large bande est la somme d'une infinité de champs électriques dont l'amplitude et la phase sont aléatoires. Cela engendre des fluctuations aléatoires sur la valeur de la tension  $V$  suite à la création de de battement entre les différentes composantes fréquentielles. Le bruit d'intensité est proportionnel à la tension moyenne  $\bar{V}^2$ , il augmente aussi rapidement que la puissance du signal utile [27].

### 2.5 Codes utilisés dans la technique SAC-OCDMA

Dans cette partie nous allons présenter les différents paramètres nécessaires pour définir un code, pour passer ensuite à la présentation de codes dits codes à corrélation nulle (ZCC : Zero Cross Correlation en anglais). Dans la suite de cette thèse, les codes spectraux seront générés à base des codes ZCC.

#### 2.5.1 Les paramètres définissant les codes optiques

Les différents paramètres utilisés lorsque l'on parle d'un code sont :

- La longueur du code ( $L$ ).
- Le poids du code ( $w$ ).
- La corrélation croisée ( $\lambda_c$ ).
- La cardinalité ( $K$ ).

Nous ferons souvent référence à une famille de codes en la désignant par son nom et l'ensemble  $(L, w, \lambda_c)$  ou de manière plus générale  $(L, w, \lambda_c, K)$ . La longueur du code est notée  $L$ . Il s'agit du nombre de « 1 » et de « 0 » dans le code. Le poids du code, noté  $w$ , est

simplement le nombre de « 1 » contenu dans ce code. La corrélation croisée désignée par  $\lambda_c$ , est la somme du résultat d'une opération logique AND entre deux codes différents pris parmi une famille de codes. Avec une détection balancée on doit utiliser une famille de code ayant une corrélation croisée  $\lambda_c$  constante.

Il y a trois conditions nécessaires qu'une famille de code doit respecter pour pouvoir être utilisée dans la technique SAC-OCDMA : Avoir une longueur  $L$  constante pour tous les codes de la famille ; avoir un poids  $w$  constant et avoir une corrélation croisée  $\lambda_c$  constante pour tous les codes de la famille.

### 2.5.2 Les Codes optiques

Il existe plusieurs familles de codes qui peuvent être utilisés dans la technique SAC-OCDMA, celle choisi dans cette étude est la famille de code ZCC unipolaires [31], [32], [33], [34], [35], [36].

Inspirés des codes MDW (MDW : Modified Double Weight en anglais) [37], les codes ZCC ont été conçus pour remédier aux problèmes d'interférences d'accès multiple MAI (interférences résultantes de la transmission simultanée de tous les utilisateurs) constituant la principale cause de la limitation du rapport signal à bruit de l'ensemble du système. Ils ont la particularité d'avoir une corrélation croisée nulle ( $\lambda_c = 0$ ) ce qui implique qu'aucune longueur d'onde n'est commune entre les différents utilisateurs, évitant ainsi tout chevauchement.

Dans le but d'augmenter le nombre d'utilisateurs indépendamment du poids (afin d'augmenter le rapport signal sur bruit), les auteurs dans [31], [32], [33], [34], [35], [36], proposent d'utiliser le mapping suivant et en se basant sur le principe suivant :

$$ZCC_m = \begin{bmatrix} 0 & ZCC_{m-1} \\ ZCC_{m-1} & 0 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

avec :  $m$  est le mapping ;  $K$  est le nombre d'utilisateurs =  $2^m$  ;  $w$  est le poids du code et  $L$  est la longueur du code tel que :  $L = K \times w$ .

En utilisant la matrice de base  $ZCC_{m=1}(K = 2, w = 1)$  :

$$ZCC_{m=1} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Le passage à la matrice  $ZCC_{m=2}(K = 4, w = 1)$  se fera comme suit :

$$ZCC_{m=2} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & ZCC_{m-1} \\ ZCC_{m-1} & \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Le nombre d'utilisateurs a donc augmenté (quatre utilisateurs) sans pour autant avoir un effet sur le poids du code. Pour augmenter le poids du code de  $w = 1$  à  $w = 3$  tout en gardant un nombre d'utilisateurs fixe ( $K = 4$ ).

La matrice des codes est la répétition de  $w$  fois (soit 3 fois) la matrice  $ZCC_{m=2}$  ( $w = 1$ ):

$$ZCC_{m=2, w=3} = \left[ \begin{array}{cc|cc|cc} \mathbf{0} & ZCC_{m=1} & \mathbf{0} & ZCC_{m=1} & \mathbf{0} & ZCC_{m=1} \\ ZCC_{m=1} & \mathbf{0} & ZCC_{m=1} & \mathbf{0} & ZCC_{m=1} & \mathbf{0} \end{array} \right] \quad (2.11)$$

$$ZCC_{m=2, w=3} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

### 2.5.2.1 Critères de construction des codes ZCC

Toute construction de code ZCC doit satisfaire aux critères suivants [28] :

- Dans un code CDMA, le code doit être unique pour chaque utilisateur ;
- Le code doit avoir une inter-corrélation nulle, c'est-à-dire pas de superposition des « 1 » entre les différents utilisateurs ;
- Le code doit être aléatoire et imprédictible, c'est délibérément pour la sécurité ;
- Le nombre d'utilisateur doit être flexible ;
- Le poids doit être flexible et peut être aussi facilement augmenté ;
- Le code doit être pratique et peut être mis en œuvre en utilisant des dispositifs optiques.

### 2.5.2.2 Codes ZCC utilisés

La méthode de construction adoptée est celle qui a été proposée dans [31]. Cette méthode a permis de résoudre le problème de la limitation du poids qui était dépendant du nombre d'utilisateurs (cardinalité du code) [33], [34], [35], [36], [37]. La méthode de construction consiste à représenter la matrice des codes, de dimension  $[K, L]$ , où  $K$  représente le nombre d'utilisateur et  $L$  représente la longueur du code sous la forme suivante :

$$ZCC_w = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

où :  $ZCC_{w=1} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$

avec :

$A$  : est une matrice de  $[2, 2 \times w]$ , elle consiste de  $w$  réplique de la matrice de base  $ZCC_{w=1}$ .

$B$  : est une matrice de  $[2, w \times (K - 2)]$  de zéro.

$C$  : est une matrice de  $[(K - 2), w \times 2]$  de zéro.

$D$  : est une matrice de  $[(K - 2), w \times (K - 2)]$  ; est obtenue à partir de la matrice diagonale  $[(K - 2), (K - 2)]$  avec une rotation de  $90^\circ$  et chaque colonne de cette dernière est répété  $w$  fois, excepté pour  $K = 3$ , la matrice  $D$  consiste de  $[1, w]$  matrice de « 1 ».

Exemple : Pour  $K = 5$  et poids  $w = 3$ , la matrice des codes est :

$$ZCC_{w=3} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

La matrice des codes obtenue ne contient aucune superposition de « 1 », la relation entre la longueur du code  $L$ , le nombre d'utilisateur  $K$  et le poids  $w$  est donnée par l'expression (2.15).

$$L = K \times w \quad (2.15)$$

Chaque ligne de cette matrice représentera donc le code d'un utilisateur et chaque donnée (chaque « 1 ») se verra attribuer une longueur d'onde (voir chapitre 4, tableau 4.1).

## 2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés par la technique d'accès multiple par répartition de codes OCDMA et plus particulièrement à celle utilisant le codage d'amplitude spectral. Dans ce contexte différentes technologies de codage (masque d'amplitude, réseau AWG, réseaux de Bragg et des démultiplexeurs / multiplexeurs) et techniques de détection (directe, cas d'une seule onde et de toutes longueurs d'ondes contenues dans un code) ont été présentée. Les différents bruits ainsi que les codes optiques utilisés en SAC-OCDMA notamment les codes dits ZCC ont été décrits.

Le chapitre suivant vise à analyser les performances analytiques de système FSO-SAC-OCDMA en termes de BER (BER : Bit Error Rate en anglais). L'objectif visé est la détermination la portée maximale entre l'émetteur et le récepteur pour une valeur de BER acceptable ( $10^{-9}$ ) sous l'effet des différentes conditions météorologiques.

## Chapitre 3

# Evaluation analytique des performances du système FSO-SAC-OCDMA sous l'effet de mauvaises conditions météorologiques

### 3.1 Introduction

Dans ce chapitre, une évaluation analytique et une analyse numérique des performances du système FSO-SAC-OCDMA en utilisant les codes optiques ZCC en termes de SNR (SNR : Signal-to-Noise Ratio en anglais) et BER seront présentées. Le système est analysé pour les différentes conditions météorologiques telles que : le brouillard, la pluie, la neige et la scintillation. La puissance émise par l'émetteur a été prise égale à  $10 \text{ dBm}$ , selon les recommandations UTI [4] (UTI : Union Telecommunication International en anglais). L'étude consiste à déterminer la portée maximale entre l'émetteur et le récepteur FSO pour une valeur de BER acceptable ( $10^{-9}$ ) sous l'effet des différentes conditions météorologiques.

### 3.2 Analyse des performances du système

#### 3.2.1 Modèle du système étudié

La figure (3.1) illustre le schéma bloc du système SAC-OCDMA dans une liaison de communication FSO, en utilisant les codes optiques ZCC présentés dans le chapitre 2. Comme toute autre technologie de communication, le système comporte trois parties suivantes : l'émetteur, le canal et le récepteur (figure (3.1)). Au niveau de l'émetteur, l'onde continue émise par la source optique est divisée en différentes longueurs d'ondes à l'aide d'un multiplexeur tel que le nombre de longueurs d'ondes en sortie est égal à la longueur du code optique ZCC (dans notre étude  $L = 15$ ). Les longueurs d'ondes, ainsi obtenues sont ensuite regroupées et codées par le codeur optique spectral (OSE : Optical Spectral Encoder en anglais) afin de constituer le code optique spectral de chaque utilisateur, où  $w$  longueurs d'ondes sont regroupées pour donner un code (dans notre étude  $w = 3$ ). Le modulateur de Mach-Zehnder est utilisé comme modulateur optique externe (EOM : Electro-Optic Modulator en anglais) pour moduler le code optique spectral avec les données binaires. Les signaux modulés de tous les utilisateurs ( $K = 5$ ) sont ensuite additionnés et transmis via le canal FSO. Du côté récepteur, les signaux reçus sont décodés, puis transférés sur un Photodétecteur (PD :

Photo-Detector en anglais) afin d'avoir le signal original et filtrés par un filtre passe-bas (LPF : Low Pass Filter en anglais) afin de rejeter tous les signaux indésirables.

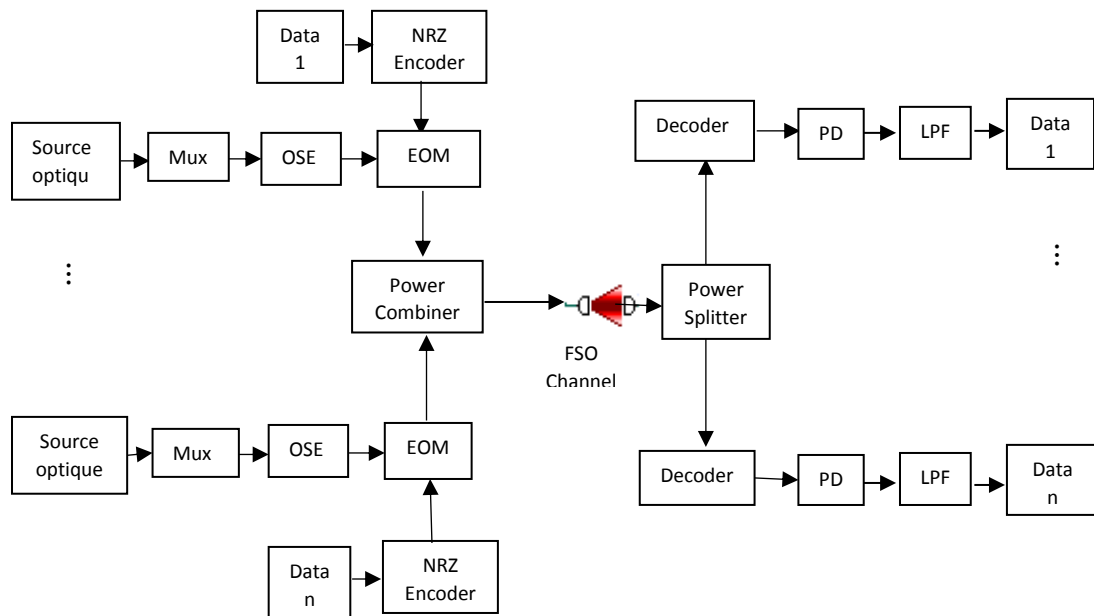


Figure 3. 1 - Schéma bloc du système FSO-SAC-OCDMA.

### 3.2.2 Calcul du SNR du système SAC-OCDMA-FSO

La restriction principale d'une liaison FSO est la disponibilité d'une ligne de visée dégagée sans aucun obstacle physique entre l'émetteur et le récepteur. La gêne la plus importante est les mauvaises conditions météorologiques qui affectent les performances du système FSO. Elles entraînent la diminution du SNR et augmenter le BER. Dans le but d'évaluer ses performances, le système FSO-SAC-OCDMA est analysé en prenant en compte la contribution du bruit de grenaille ( $\sigma_{sh}^2$ ) et le bruit thermique ( $\sigma_{th}^2$ ) dans le photodétecteur, ainsi que les atténuations ( $\gamma$ ) dues aux conditions météorologiques qui affectent la puissance de signal reçu ( $P_r$ ). Pour les codes optiques ZCC utilisés, il n'y a pas de chevauchement de spectres entre les différents utilisateurs, ainsi l'effet du bruit d'intensité induit par la phase PIIN (PIIN : Phase Induced Intensity Noise en anglais) est ignoré.

Nous nous intéressons dans cette section à la détermination du SNR du système FSO-SAC-OCDMA sous l'effet des différentes conditions météorologiques.

Pour calculer le SNR, nous proposons les hypothèses suivantes [28] [30] [38] :

- Chaque source de la lumière est supposée être non polarisée et son spectre est plat sur l'intervalle  $\left[v_0 - \frac{\Delta\nu}{2}, v_0 + \frac{\Delta\nu}{2}\right]$ , tel que  $v_0$  est la fréquence optique centrale et  $\Delta\nu$  est la bande de la source optique;



- Les différents utilisateurs ont la même puissance à la réception;
- Les composants spectraux ont les mêmes largeurs de bande;
- Les flux de bits de chaque utilisateur sont synchronisés.

Le rapport signal à bruit est le rapport entre la puissance du signal et la puissance du bruit est défini par [28] [30]:

$$\text{SNR} = \frac{(i_1 - i_0)^2}{\sigma^2} \quad (3.1)$$

$i_0$  représente le courant pour la transmission d'un bit « 0 » et  $i_1$ , pour la transmission d'un bit « 1 », tel que [30]:

$$i_0 = i_{MAI} + i_{Obs} \quad (3.2)$$

$$i_1 = i_{MAI} + i_{Obs} + i_k \quad (3.3)$$

où :  $i_{MAI}$  est le courant résultant des interférences d'accès multiples MAI, ils sont considérés nuls dû à l'utilisation des codes optiques ZCC ;  $i_{Obs}$  est le courant d'obscurité de la photodiode et  $i_k$  est le courant de  $k^{ième}$  utilisateur à la réception.

On suppose que  $i_{Obs}$  est très faible devant  $i_k$  ( $i_{Obs} \ll i_k$ ) [31].

$\sigma^2$  représente la variance du bruit total au niveau de photodétecteur, tel que [28], [30], [39] :

$$\sigma^2 = \sigma_{sh}^2 + \sigma_{th}^2 \quad (3.4)$$

où :  $\sigma_{sh}^2$  est la variance du bruit de grenaille (shot noise) et  $\sigma_{th}^2$  est la variance du bruit thermique (thermal noise).

La variance du bruit de grenaille est donnée par [28], [30], [31], [39] :

$$\sigma_{sh}^2 = 2 \times e \times B \times i_k \quad (3.5)$$

avec :  $e$  représente la charge de l'électron ( $e = 1.6 \times 10^{-19} C$ ) et  $B$  est la bande passante électrique en [Hz];

La variance du bruit thermique est donnée par [28] [30] [40] [41] [42]:

$$\sigma_{th}^2 = \frac{4 \times k_b \times T_n \times B}{R_l} \quad (3.6)$$

où :  $k_b$  est le constant de Boltzmann ( $k_b = 1.381 \times 10^{-23} J.K^{-1}$ );  $T_n$  est la température en [ $K^\circ$ ] et  $R_l$  est la résistance de charge du système de photodétecteur en [ $\Omega$ ].

A partir des équations (3.4), (3.5) et (3.6), la variance du bruit totale au niveau de la photodiode est :

$$\sigma^2 = (2 \times e \times B \times i_k) + \left( \frac{4 \times k_b \times T_n \times B}{R_l} \right) \quad (3.7)$$

Pour calculer le courant  $i_k$  du  $k^{ième}$  utilisateur au niveau de récepteur, il faut avoir la densité spectrale (DSP) des signaux optiques reçus. Selon [32], la densité spectrale est exprimée comme suit :

$$r(v) = \frac{P_r}{\Delta v} \sum_{k=1}^K d_k \sum_{i=1}^L C_k(i) \Pi(i) \quad (3.8)$$

où :  $P_r$  représente la puissance reçue au niveau du récepteur ;  $K$  est le nombre d'utilisateurs actifs ;  $d_k$  représente le bit de donnée du  $k^{ième}$  utilisateur et  $\Pi(i)$  est la fonction porte de la  $i^{ième}$  impulsion, de largeur  $\frac{\Delta v}{L}$  dans l'intervalle  $\left[ v_0 - \frac{\Delta v}{2}, v_0 + \frac{\Delta v}{2} \right]$ , est exprimé comme suit [25] :

$$\Pi(i) = u \left[ v - \left[ v_0 + \frac{\Delta v}{2L} (-L + 2i - 2) \right] \right] - u \left[ v - \left[ v_0 + \frac{\Delta v}{2L} (-L + 2i) \right] \right] \quad (3.9)$$

où :  $u(v)$  est la fonction d'échelon unité défini comme suit [28] :

$$u(v) = \begin{cases} 0 & v < 0 \\ 1 & v \geq 0 \end{cases} \quad (3.10)$$

et  $v_0$  est la fréquence centrale.

Le photocourant  $i_k$  du  $k^{ième}$  utilisateur au niveau du récepteur est défini par [28] [38] [39] [43] :

$$i_k = \Re \int_0^{+\infty} r(v) dv \quad (3.11)$$

où :  $\Re$  est le rendement de la photodiode.

$$\Re = \frac{\eta \cdot e}{h \cdot v_0} \quad (3.12)$$

où :  $\eta$  est l'efficacité quantique et  $h$  est constante de Plank ( $h = 6,626068 \cdot 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg/s}$ ).

La DSP du  $l^{ième}$  utilisateur durant un temps bit est [28] :

$$r(v) = \frac{P_r}{\Delta v} \sum_{k=1}^K d_k \sum_{i=1}^L C_k(i) C_l(i) \Pi(i) \quad (3.13)$$

En intégrant la DSP :

$$\int_0^{+\infty} r(v)dv = \frac{P_r}{\Delta v} \sum_{k=1}^K d_k \sum_{i=1}^L C_k(i)C_l(i) \int_0^{+\infty} \Pi(i)dv \quad (3.14)$$

$$\int_0^{+\infty} r(v)dv = \frac{P_r}{\Delta v} \sum_{k=1}^K d_k \sum_{i=1}^L C_k(i)C_l(i) \int_{v_0 + \frac{\Delta v}{2L}(-L+2i-2)}^{v_0 + \frac{\Delta v}{L}(-L+2i)} dv \quad (3.15)$$

$$\int_0^{+\infty} r(v)dv = \frac{P_r}{\Delta v} \sum_{k=1}^K d_k \sum_{i=1}^L C_k(i)C_l(i) \frac{\Delta v}{L} \quad (3.16)$$

$$\int_0^{+\infty} r(v)dv = \frac{P_r \Delta v}{\Delta v L} \left[ d_1 \sum_{i=1}^L C_1(i)C_l(i) + d_2 \sum_{i=1}^L C_2(i)C_l(i) + \dots + d_k \sum_{i=1}^L C_k(i)C_l(i) \right] \quad (3.17)$$

où :  $C_l(i)$  est le code de décodage du  $l^{ème}$  utilisateur (utilisateur désiré) :  
d'où :

$$\sum_{i=1}^L C_k(i)C_l(i) = \begin{cases} \omega & \text{pour } l = k \\ 0 & \text{pour } l \neq k \end{cases} \quad (3.18)$$

Lorsque tous les utilisateurs transmettent des bits « 1 », (cas défavorable), prenant l'exemple où  $l = k$  :

$$\int_0^{+\infty} r(v)dv = \frac{P_r \Delta v}{\Delta v L} \left[ 1 \sum_{i=1}^L C_l(i)C_l(i) \right] = P_r \frac{\omega}{L} \quad (3.19)$$

Dans le cas d'une détection directe d'une seule onde ( $w = 1$ ) on obtient :

$$\int_0^{+\infty} r(v)dv = \frac{P_r \Delta v}{\Delta v L} \left[ 1 \sum_{i=1}^L C_l(i)C_{ld}(i) \right] = \frac{P_r}{L} \quad (3.20)$$

Où  $C_{ld}$  est le code de décodage du  $l^{ème}$  utilisateur, obtenu à partir de  $C_l$ , contenant une seule onde.

En remplaçant l'équation (3.20) dans l'équation (3.11), on obtient le photocourant  $i_k$  :

$$i_k = \Re. \frac{P_r}{L} \quad (3.21)$$

Dans le cas de non diffraction du faisceau lumineux [9], la puissance du signal reçu  $P_r$  au niveau du récepteur dans la liaison FSO, peut être exprimée par [9] :

$$P_r = P_t \times \frac{D_r^2}{(D_t + \theta_{div} \times l)^2} \times 10^{-\gamma \times l/10} \times \tau_t \times \tau_r \quad (3.22)$$

où:

$P_t$ ,  $D_t$ ,  $D_r$  and  $\theta_{div}$  sont respectivement la puissance totale transmise par l'émetteur FSO, le diamètre d'ouverture de l'émetteur, le diamètre d'ouverture du récepteur et l'angle de divergence (voir la figure (1.16)).  $\gamma$  est le facteur d'atténuation ( $dB/km$ ) pour les différents canaux de transmission FSO,  $\tau_t$  et  $\tau_r$  représentent respectivement l'efficacité optique de l'émetteur et du récepteur. Dans cette étude, nous supposons que l'émetteur et le récepteur ont un rendement optique élevé ( $\tau_t = \tau_r = 1$ ) [9].

Le SNR du système FSO-SAC-OCDMA utilisant les codes optiques ZCC, en tenant compte les équations (3.1), (3.7) et (3.21), est donnée par [44]:

$$SNR = \frac{\left[ \mathfrak{R} \cdot \frac{P_r}{L} \right]^2}{2 \cdot e \cdot B \cdot \mathfrak{R} \cdot \frac{P_r}{L} + \frac{4k_b \cdot T_n \cdot B}{R_l}} \quad (3.23)$$

Dans le cas d'une détection de toutes les longueurs d'ondes, le SNR est :

$$SNR = \frac{\left[ \mathfrak{R} \cdot \frac{w \cdot P_r}{L} \right]^2}{2 \cdot e \cdot B \cdot \mathfrak{R} \cdot \frac{w \cdot P_r}{L} + \frac{4k_b \cdot T_n \cdot B}{R_l}} \quad (3.24)$$

En considérant une approximation gaussienne [28] [39], le BER du système FSO-SAC-OCDMA est :

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{SNR}{8}} \right) \quad (3.25)$$

### 3.2.3 Evaluation des performances du système FSO-SAC-OCDMA

Les performances de la chaîne FSO-SAC-OCDMA ont été évaluées sous l'effet du brouillard, la pluie, la neige et la scintillation, en utilisant l'outil de calcul et de simulation Matlab. Les paramètres utilisés sont indiqués dans le tableau (3.1). Il à noter que la puissance utilisée dans l'équation (3.22) doit être remplacée par la puissance électrique le recueillie aux bornes de la résistance de charge  $R_l$  est donnée par la relation :

$$P_e = R_l \times (\mathfrak{R} \times P_r)^2 \quad (3.26)$$

Symbole	Paramètre	Valeur
$R$	Débit binaire	622 Mbps / 1Gbps
$\eta$	Efficacité Quantique de Photodétecteur	0,6
$P_t$	Puissance transmise	10 dBm
$B$	Bande passante électrique	466.5 Mbps / 0.75GHz
$\lambda_0$	Longueur d'onde centrale	1555.6 nm
$T_n$	Température de bruit du récepteur	300 K
$R_l$	Résistance de charge du récepteur	1030 $\Omega$
$e$	Charge de l'électron	$1,6 \times 10^{-19}$ C
$h$	Constante de Planck	$6,63 \times 10^{-34}$ Js
$K_b$	Constante de Boltzmann	$1,38 \times 10^{-23}$ J/K
$\theta_{div}$	Angle de divergence de l'émetteur	1 mrad
$D_t$	Diamètre d'ouverture de l'émetteur	30 cm
$D_r$	Diamètre d'ouverture du récepteur	10 cm
$K$	Nombre d'utilisateur	05
$w$	Poids du code ZCC	03
BER	Taux d'erreur binaire	Fixé à $10^{-9}$

**Tableau 3. 1** - Paramètres utilisés dans l'analyse numérique par Matlab.

Dans ce qui suit, nous allons présenter les résultats de calcul numérique obtenus par Matlab, pour deux valeurs de débit binaire :  $D_b = 622 \text{ Mbps}$  et  $1 \text{ Gbps}$  pour deux configurations de détections :

- 1) détection directe d'une seule longueur d'onde (Détection DSO) du code d'un utilisateur donné ;
- 2) détection directe de toutes les longueurs d'onde (Détection DTO) contenues dans le code.

### 3.2.3.1 Détection DSO

Les performances du système FSO-SAC-OCDMA, pour une détection directe, en termes de BER sont présentées sur les figures et les tableaux suivants. Avec BER maximale acceptable ( $10^{-9}$ ) et une puissance, pour garantir une sécurité oculaire,  $P_t = 10 \text{ dBm}$  et pour deux valeurs de débit binaire :  $D_b = 622 \text{ Mbps}$  et  $1 \text{ Gbps}$ .

#### (a) Cas du brouillard

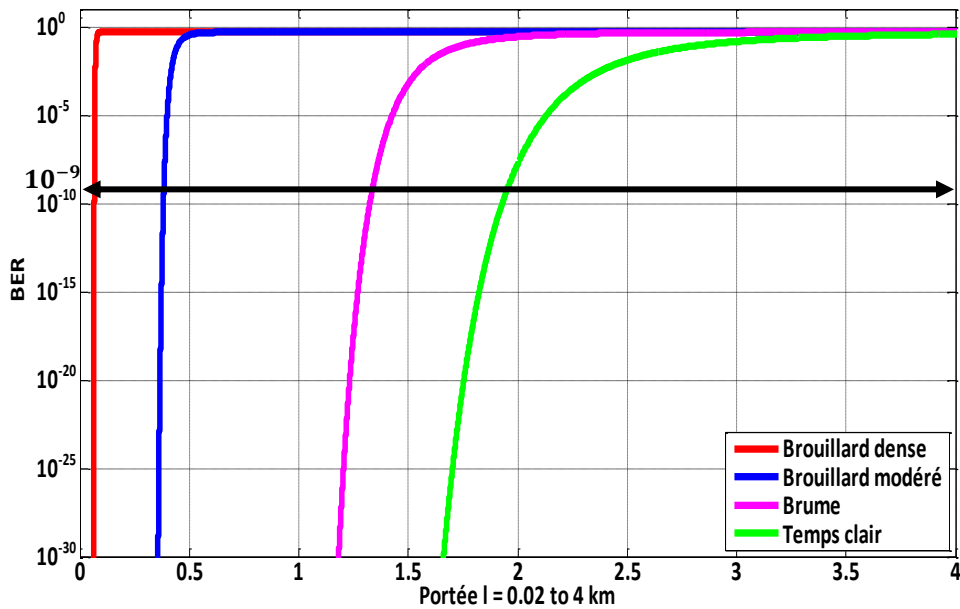
Le brouillard à un facteur d'atténuation le plus critique parmi tous les facteurs des autres phénomènes météorologiques. L'atténuation  $\gamma$  des différentes versions du brouillard dépend de la visibilité [10], est déterminée par les équations (1.11) et (1.12) données au chapitre 1. Le

tableau (3.2) donne les atténuations des différentes versions du brouillard en fonction de leur visibilité.

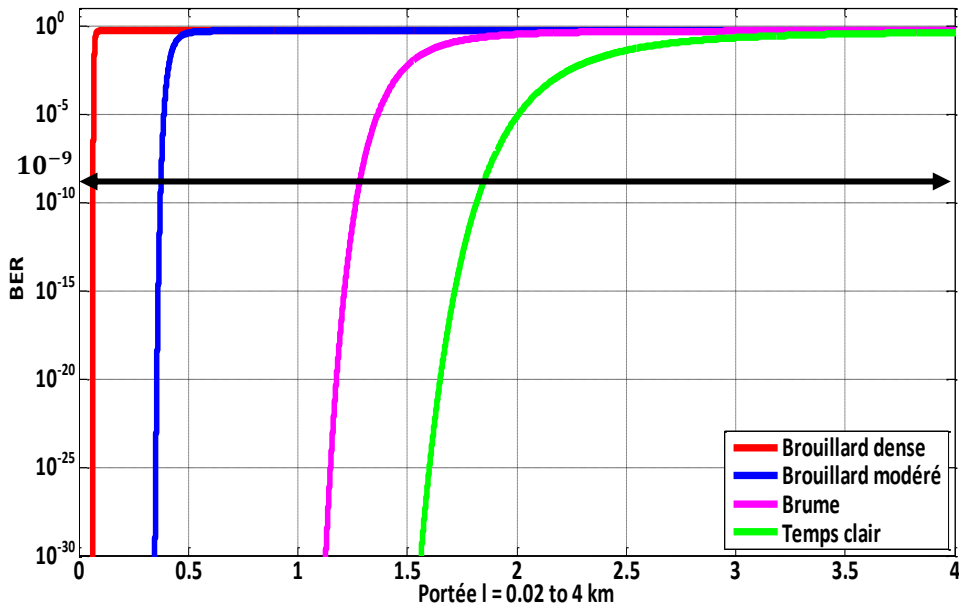
Phénomènes météorologiques	Visibilité (m)	Atténuation (dB/km)
Brouillard dense	50	339,7920
Brouillard modéré	500	33,9792
Brume	2800	2,6743
Temps clair	18100	0.2429

**Tableau 3. 2** - Atténuation des différents types du brouillard.

La figure (3.2) représente la variation du BER en fonction de la portée pour différents types de brouillard (brouillard dense, brouillard modéré, brume et en temps clair) avec deux valeurs de débit  $D_b = 622 Mbps$  (figure (3.2 a)) et  $D_b = 1 Gbps$  (figure (3.2 b)).



a)



b)

**Figure 3. 2** - BER en fonction de la portée, cas de brouillard, Détection DSO : a)  $D_b = 622 Mbps$ , b)  $D_b = 1 Gbps$ .

Il est clairement montré à partir de ces figures que lorsque la portée de la liaison augmente, les performances du système FSO-SAC-OCDMA sont détériorées, notamment pour un brouillard dense. Le tableau (3.3) donne les valeurs des portées maximales obtenues. D'autre part, quand le débit augmente (cas de  $1 Gbps$  par rapport à  $622 Mbps$ ) on remarque que la portée maximale diminue, ceci est dû au fait que l'expression du BER est inversement proportionnelle à la bande passante électrique de la photodiode qui dépend linéairement du débit binaire.

$D_b = 622 Mbps$			
Phénomènes météorologiques	Atténuation (dB/km)	Portée maximale (m)	BER
Brouillard dense	339,7920	65.79	$1 \times 10^{-9}$
Brouillard modéré	33,9792	384	$1 \times 10^{-9}$
Brume	2,6743	1339	$1 \times 10^{-9}$
Temps clair	0,2429	1958	$1 \times 10^{-9}$
$D_b = 1 Gbps$			
Phénomènes météorologiques	Atténuation (dB/km)	Portée maximale (m)	BER
Brouillard dense	339,7920	64.46	$1 \times 10^{-9}$
Brouillard modéré	33,9792	374	$1 \times 10^{-9}$
Brume	2,6743	1280	$1 \times 10^{-9}$
Temps clair	0,2429	1845	$1 \times 10^{-9}$

**Tableau 3. 3** - Portées maximales, cas de brouillard, Détection DOS.

### (b) Cas de la pluie

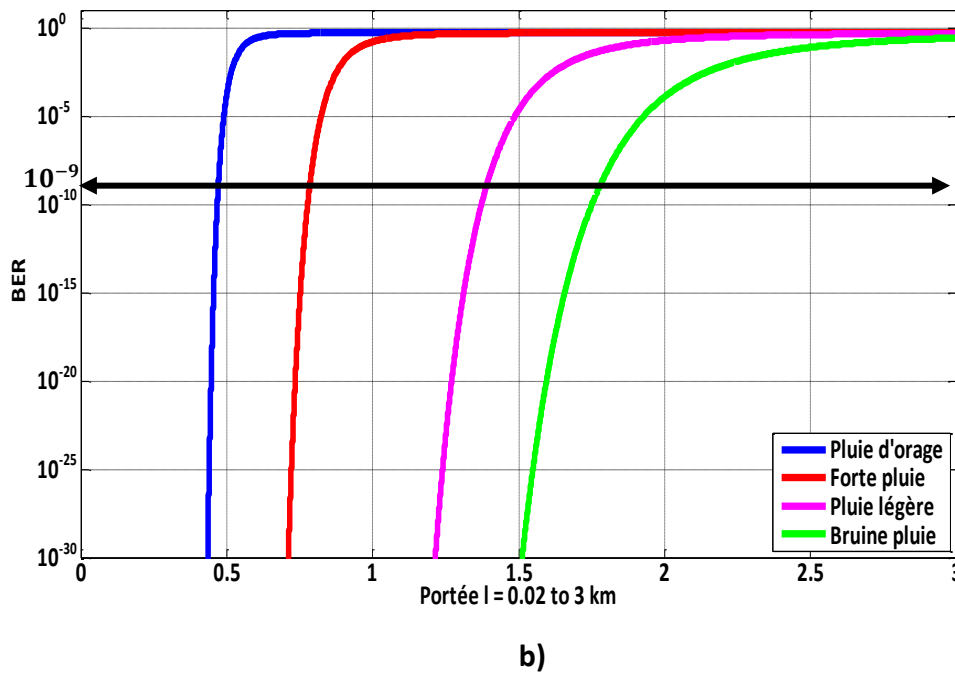
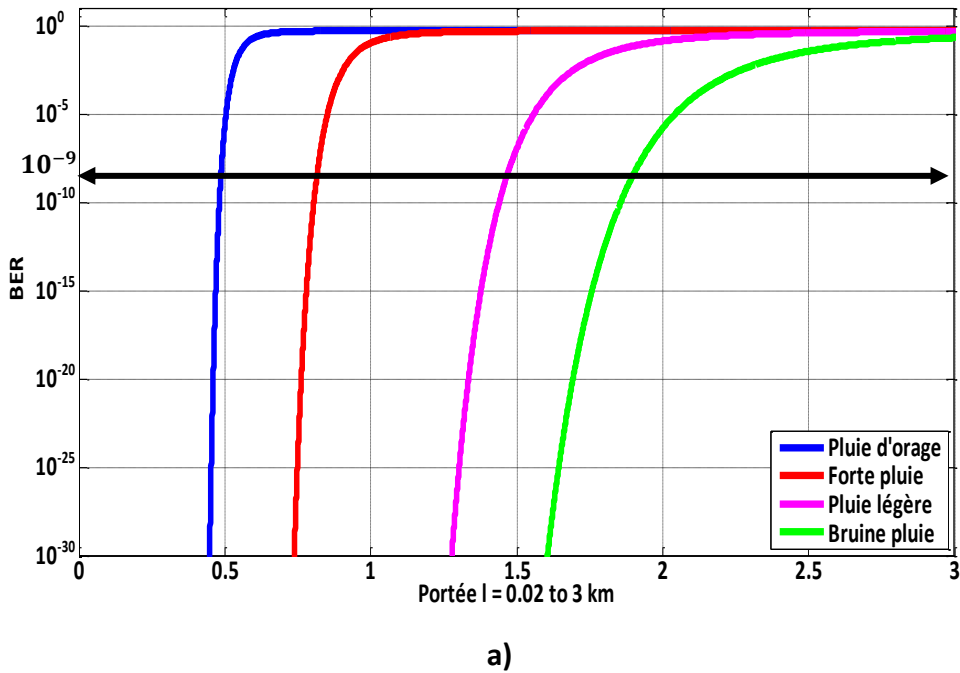
L'impact de la pluie sur les liaisons FSO est nettement inférieur à celui du brouillard parce que le rayon des gouttelettes de pluie (200-2000  $\mu\text{m}$ ) est significativement plus grand que les longueurs d'ondes typiques utilisées dans les systèmes FSO [3], [6]. L'atténuation due à la pluie est indépendante de la longueur d'onde utilisée. Elle est en fonction de l'intensité de la pluie (taux de précipitation  $R$  (mm/h) (équation (1.20)). Le tableau (3.4) donne les atténuations avec leur valeur de précipitations dans le cas de la pluie.

Phénomènes météorologiques	Précipitation $R$ (mm/h)	Atténuation (dB/km)
Pluie d'orage	100	23.5403
Forte pluie	25	9.2989
Pluie légère	2.5	1.9881
Bruine pluie	0.25	0.4250

**Tableau 3. 4** - Atténuation des différents types de la pluie.

La figure (3.3) représente la variation du BER en fonction de la portée pour différents types de pluie (pluie d'orage, forte pluie, pluie légère et bruine pluie) avec deux valeurs de débit binaire  $D_b = 622 Mbps$  (figure (3.3 a)) et  $D_b = 1 Gbps$  (figure (3.3 b)).





**Figure 3. 3** - BER en fonction de la portée, cas de la pluie, Détection DSO : a)  $D_b = 622 \text{ Mbps}$ , b)  $D_b = 1 \text{ Gbps}$ .

Il est clairement montré à partir de la figure (3.3) que lorsque la portée de la liaison augmente, les performances du système FSO-SAC-OCDMA sont détériorées, notamment pour la pluie d'orage. Le tableau (3.5) donne les valeurs des portées maximales obtenues. La même

remarque concernant la réduction de la portée maximale, quand le débit binaire augmente, reste valable.

<i>D<sub>b</sub> = 622 Mbps</i>				
Phénomènes météorologiques	Précipitation <i>R (mm/h)</i>	Atténuation ( <i>dB/km</i> )	Portée maximale ( <i>m</i> )	BER
Pluie d'orage	100	23.5403	484.6	$1 \times 10^{-9}$
Forte pluie	25	9.2989	811.8	$1 \times 10^{-9}$
Pluie légère	2.5	1.9881	1458	$1 \times 10^{-9}$
Bruine pluie	0.25	0.4250	1883	$1 \times 10^{-9}$
<i>D<sub>b</sub> = 1 Gbps</i>				
Conditions météorologiques	Précipitation <i>R (mm/h)</i>	Atténuation ( <i>dB/km</i> )	Portée maximale ( <i>m</i> )	BER
Pluie d'orage	100	23.5403	471.1	$1 \times 10^{-9}$
Forte pluie	25	9.2989	784.3	$1 \times 10^{-9}$
Pluie légère	2.5	1.9881	1390	$1 \times 10^{-9}$
Bruine pluie	0.25	0.4250	1777	$1 \times 10^{-9}$

**Tableau 3. 5** - Portées maximales, cas de la pluie, Détection DSO.

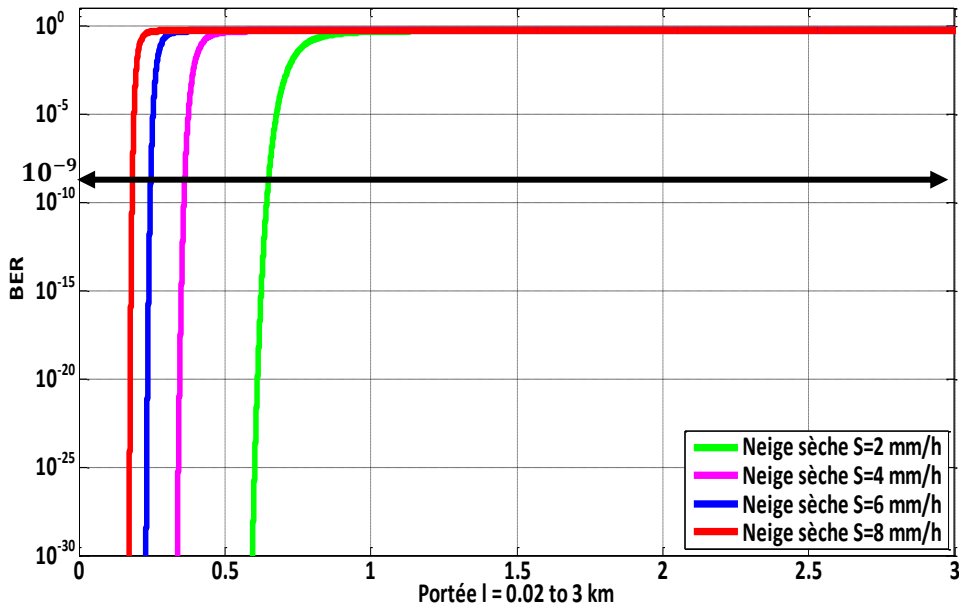
**(c) Cas de la neige**

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 [10]. L'atténuation due à la neige est en fonction de la longueur d'onde utilisée  $\lambda$  (*nm*) et de l'intensité de précipitation *S* (*mm/h*), elle est déterminée à partir des équations (1.17), (1.18) et (1.19) (voir chapitre 1). Le tableau (3.6) donne les atténuations avec leurs valeurs de précipitation pour la neige sèche et humide. L'intensité de précipitation de la neige est le paramètre fondamental employé pour décrire localement la neige.

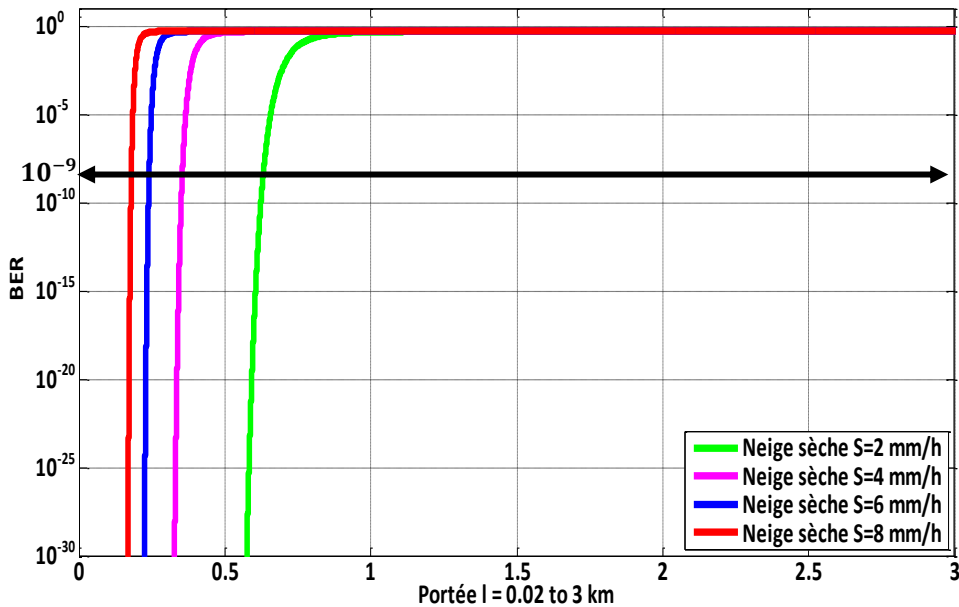
Phénomènes météorologiques	Précipitation <i>S (mm/h)</i>	Atténuation ( <i>dB/km</i> )
Neige sèche	2	14.2887
	4	37.1891
	6	65.0760
	8	96.7913
Neige humide	2	6.2263
	4	10.2559
	6	13.7329
	8	16.8934

**Tableau 3. 6** - Atténuation des différents types de la neige.

D'après le tableau (3.6), on remarque, d'une part, que l'atténuation due à la neige sèche est plus grande que celle due à la neige humide. Et d'autre part, lorsque la précipitation de la neige augmente, l'atténuation augmente. Les figures (3.4) et (3.5) représentent respectivement la variation du BER en fonction de la portée pour différents types de neige (neige sèche et neige humide) pour deux valeurs de débit binaire  $D_b = 622 Mbps$  (figure (3.3 a) et (3.4 a) et  $D_b = 1 Gbps$  (figure (3.3 b) et (3.4 b)).

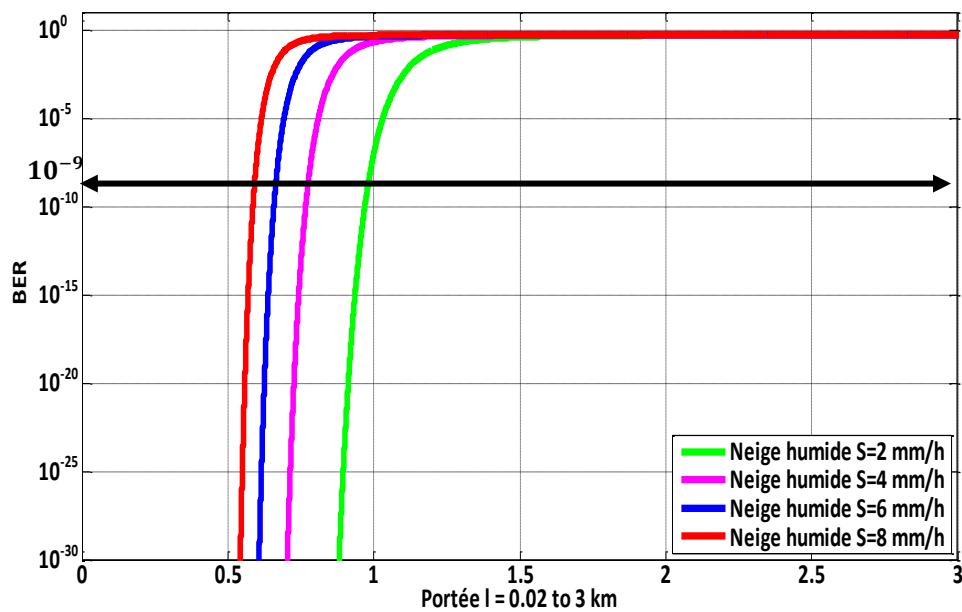


a)

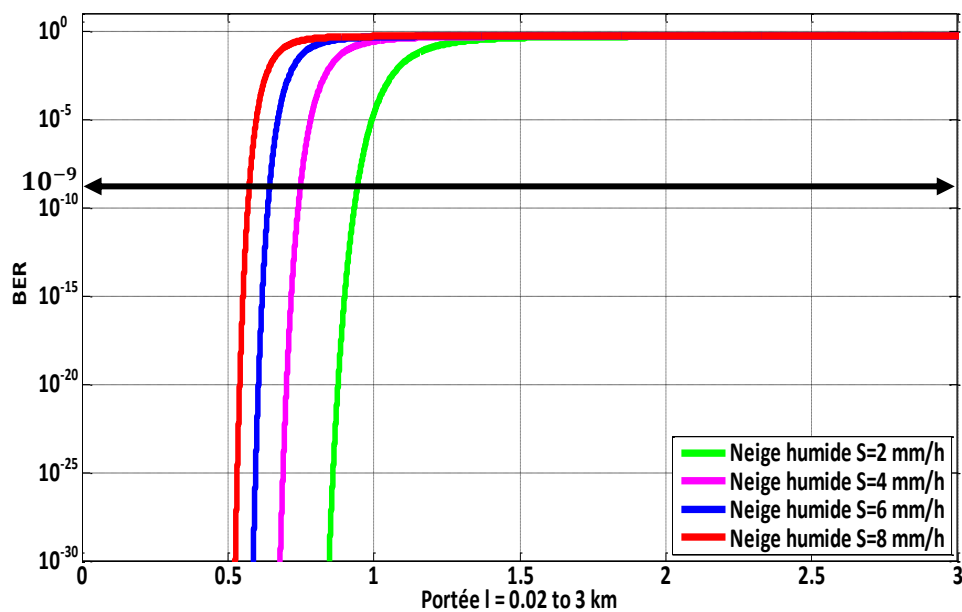


b)

Figure 3. 4 - BER en fonction de la portée, cas de la neige sèche, Détection DSO : a)  $D_b = 622 Mbps$ , b)  $D_b = 1 Gbps$ .



a)



b)

**Figure 3.5** - BER en fonction de la portée, cas de la neige humide, Détection DSO : a)  $D_b = 622$  Mbps, b)  $D_b = 1$  Gbps.

A partir des figures (3.4) et (3.5), on constate, que lorsque la portée de la liaison augmente, les performances du système FSO-SAC-OCDMA en termes de BER diminuent de façon progressive, notamment pour la neige sèche et humide avec une précipitation de  $8$  mm/h. Le tableau (3.7) donne les valeurs des portées maximales obtenues. La même

remarque concernant la réduction de la portée maximale, quand le débit binaire augmente, reste valable.

<b><math>D_b = 622 \text{ Mbps}</math></b>				
<b>Phénomènes météorologiques</b>	<b>Précipitation <math>S</math> (mm/h)</b>	<b>Atténuation (dB/km)</b>	<b>Portée maximale (m)</b>	<b>BER</b>
Neige sèche	2	14.2887	648.4	$1 \times 10^{-9}$
	4	37.1891	361.8	$1 \times 10^{-9}$
	6	65.0760	245.5	$1 \times 10^{-9}$
	8	96.7913	183	$1 \times 10^{-9}$
Neige humide	2	6.2263	978.3	$1 \times 10^{-9}$
	4	10.2559	772.9	$1 \times 10^{-9}$
	6	13.7329	662.6	$1 \times 10^{-9}$
	8	16.8934	590.1	$1 \times 10^{-9}$
<b><math>D_b = 1 \text{ Gbps}</math></b>				
<b>Phénomènes météorologiques</b>	<b>Précipitation <math>S</math> (mm/h)</b>	<b>Atténuation (dB/km)</b>	<b>Portée maximale (m)</b>	<b>BER</b>
Neige sèche	2	14.2887	628.3	$1 \times 10^{-9}$
	4	37.1891	352.6	$1 \times 10^{-9}$
	6	65.0760	239.8	$1 \times 10^{-9}$
	8	96.7913	178.9	$1 \times 10^{-9}$
Neige humide	2	6.2263	942.2	$1 \times 10^{-9}$
	4	10.2559	747.3	$1 \times 10^{-9}$
	6	13.7329	642	$1 \times 10^{-9}$
	8	16.8934	572.5	$1 \times 10^{-9}$

**Tableau 3. 7** - Portée maximale, cas de la neige, Détection DSO.

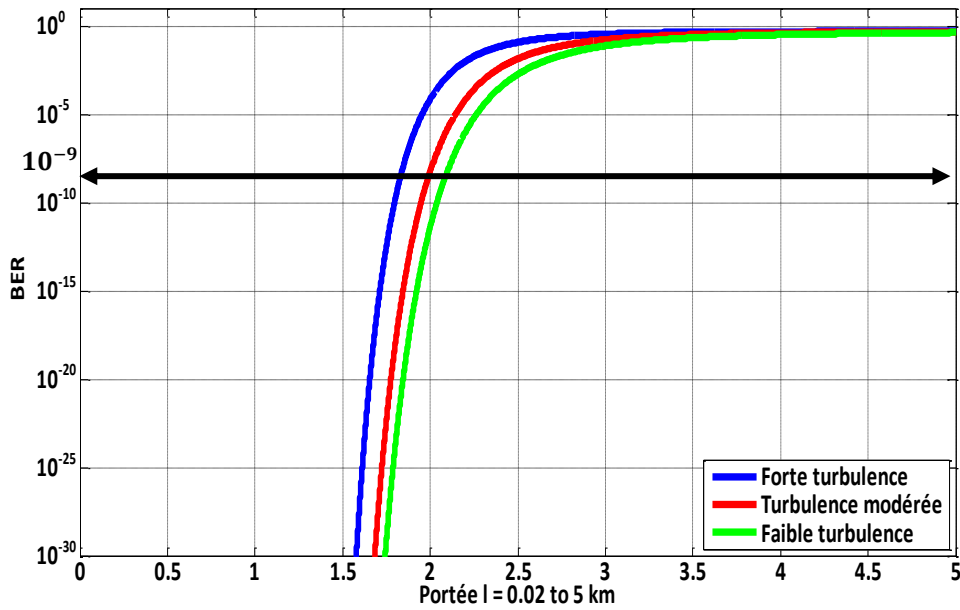
#### (d) Cas de la scintillation

La turbulence et la scintillation peuvent causer des problèmes de transmission. Le réchauffement de l'air provoque la formation de cellules aléatoires de taille variable (Figure (1.18)). Ces diverses cellules possèdent des indices de réfractions différents. Le paramètre de structure de l'indice de réfraction ( $C_n^2$ ) dépend de la température de l'air, il prend une valeur minimale après le lever et le coucher du soleil, il prend une valeur maximale l'après midi [6]. L'atténuation due à la scintillation est donnée par l'équation (1.23). Le tableau (3.8) donne les atténuations en fonction de leurs valeurs de  $C_n^2$ .

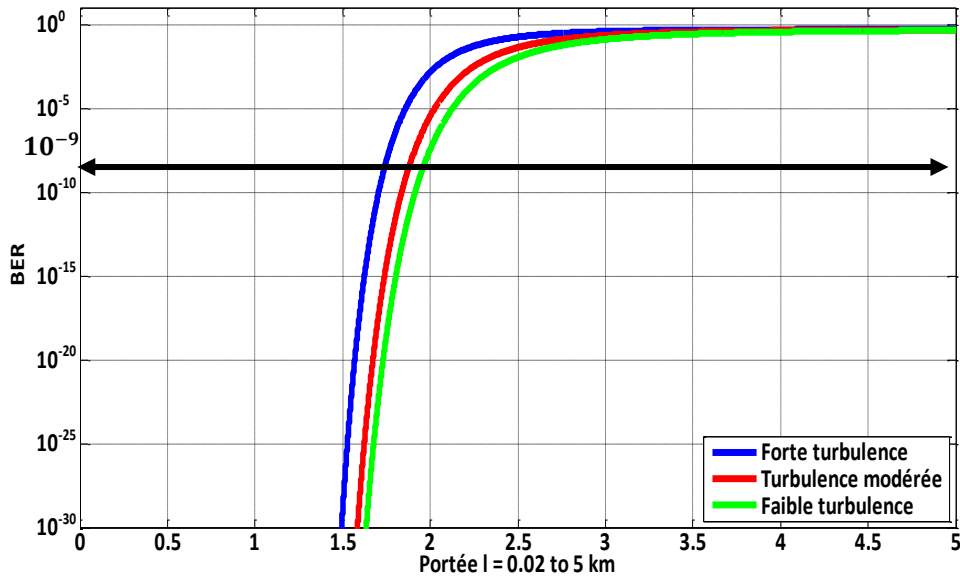
Phénomènes météorologiques	$C_n^2 (m^{-2/3})$	Atténuation (dB/km)
Forte turbulence	$10^{-12}$	0.6554
Turbulence modérée	$10^{-13}$	0.2073
Faible turbulence	$10^{-16}$	0.0066

**Tableau 3. 8** - Atténuation des différents types de la scintillation.

La figure (3.6) représente la variation du BER en fonction de la portée pour différents types de scintillation (forte scintillation, turbulence modérée et faible turbulence) avec deux valeurs de débit binaire  $D_b = 622 Mbps$  (figure (3.6 a)) et  $D_b = 1 Gbps$  (figure (3.6 b)).



a)



b)

**Figure 3. 6** - BER en fonction de la portée, cas de la scintillation, Détection DSO : a)  $D_b = 622 \text{ Mbps}$ , b)  $D_b = 1 \text{ Gbps}$ .

On constate à partir de la figure (3.6) que lorsque la portée de la liaison augmente, les performances du système FSO-SAC-OCDMA sont détériorées, notamment pour forte turbulence. Le tableau (3.9) donne les valeurs des portées maximales obtenues. La même remarque concernant la réduction de la portée maximale, quand le débit binaire augmente, reste valable.

$D_b = 622 \text{ Mbps}$				
Phénomènes météorologiques	$C_n^2 (m^{-2/3})$	Atténuation (dB/km)	Portée maximale (m)	BER
Forte turbulence	$10^{-12}$	0.6554	1819	$1 \times 10^{-9}$
Turbulence modérée	$10^{-13}$	0.2073	1976	$1 \times 10^{-9}$
Faible turbulence	$10^{-16}$	0.0066	2071	$1 \times 10^{-9}$
$D_b = 1 \text{ Gbps}$				
Phénomènes météorologiques	$C_n^2 (m^{-2/3})$	Atténuation (dB/km)	Portée maximale (m)	BER
Forte turbulence	$10^{-12}$	0.6554	1729	$1 \times 10^{-9}$
Turbulence modérée	$10^{-13}$	0.2073	1865	$1 \times 10^{-9}$
Faible turbulence	$10^{-16}$	0.0066	1945	$1 \times 10^{-9}$

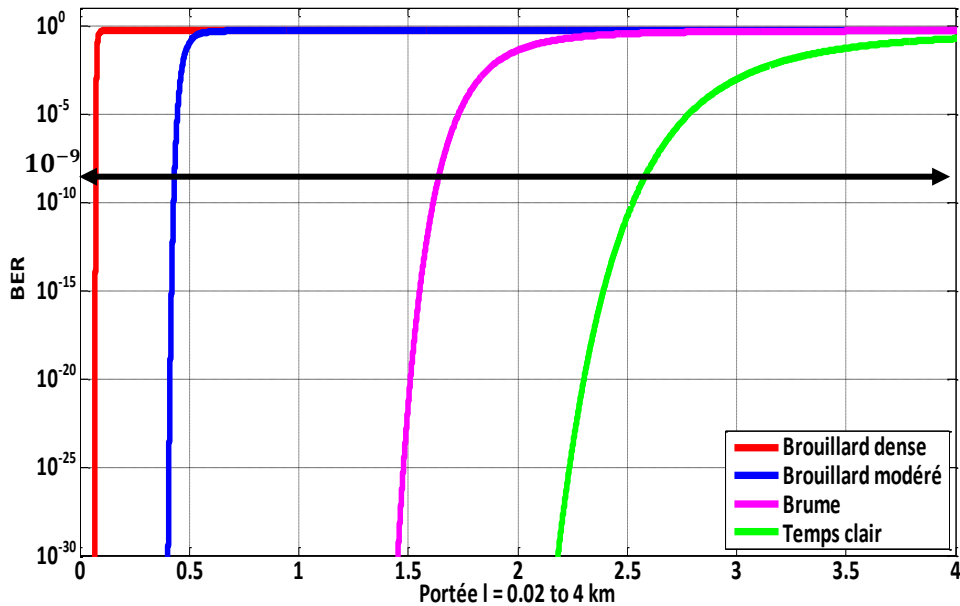
**Tableau 3. 9** - Portées maximales, cas de la scintillation, Détection DSO.

### 3.2.3.2 Détection DTO

Les performances du système FSO-SAC-OCDMA pour une Détection DTO en termes de BER dans le cas de brouillard sont présentées dans le tableau et les figures suivants. Les performances dans le cas de la pluie, la neige et la scintillation sont présentées dans l'annexe B.1. Les mêmes spécifications en termes de BER, puissance et le débit binaire utilisés dans le cas Détection DSO sont considérés.

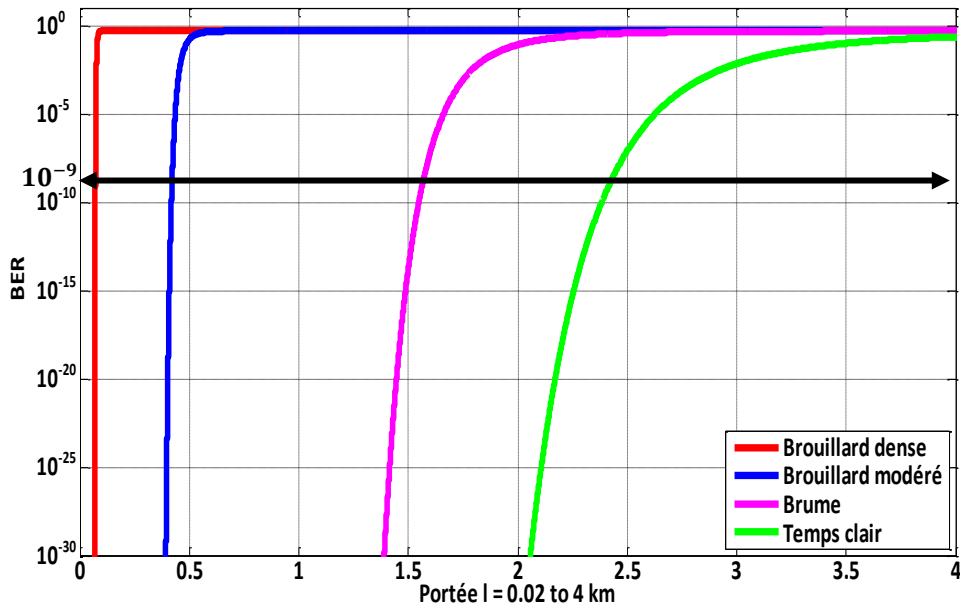
#### (a) Cas de brouillard

La figure (3.7) représente la variation du BER en fonction de la portée pour différents types de brouillard (brouillard dense, brouillard modéré, brume et en temps clair) avec deux valeurs de débit  $D_b = 622 Mbps$  (figure (3.7 a)) et  $D_b = 1 Gbps$  (figure (3.7 b)).



a)





b)

**Figure 3. 7** - BER en fonction de la portée, cas de brouillard, Détection DTO : a)  $D_b = 622$  Mbps, b)  $D_b = 1$  Gbps.

A partir de la figure (3.7), on remarque que les performances du système FSO-SAC-OCDMA diminuent avec l'augmentation de la portée de la liaison FSO, notamment pour un brouillard dense. D'après le tableau (3.10), on constate que les valeurs des portées maximales obtenues sont supérieures comparativement à celles obtenues dans le cas d'une Détection DSO (voir tableau (3.3)). Cette augmentation est due à l'augmentation de la puissance recueillie au niveau du récepteur (puissance relative au code spectral). Il à noter que cette augmentation est attribuable à l'augmentation de la complexité du récepteur (voir figure (B.5), annexe B.2).

<b><math>D_b = 622 \text{ Mbps}</math></b>			
<b>Phénomènes météorologiques</b>	<b>Atténuation (dB/km)</b>	<b>Portée maximale (m)</b>	<b>BER</b>
Brouillard dense	339,7920	71.89	$1 \times 10^{-9}$
Brouillard modéré	33,9792	430.7	$1 \times 10^{-9}$
Brume	2,6743	1632	$1 \times 10^{-9}$
Temps clair	0,2429	2564	$1 \times 10^{-9}$
<b><math>D_b = 1 \text{ Gbps}</math></b>			
<b>Phénomènes météorologiques</b>	<b>Atténuation (dB/km)</b>	<b>Portée maximale (m)</b>	<b>BER</b>
Brouillard dense	339,7920	70.55	$1 \times 10^{-9}$
Brouillard modéré	33,9792	420.4	$1 \times 10^{-9}$
Brume	2,6743	1565	$1 \times 10^{-9}$
Temps clair	0,2429	2418	$1 \times 10^{-9}$

**Tableau 3. 10** - Portées maximales, cas de brouillard, détection DTO.

### 3.3 Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons déterminé le rapport signal à bruit ainsi que l'expression du taux d'erreur binaire pour deux types de détection (DSO et DTO) pour le système FSO-SAC-OCDMA. Dans le but d'évaluer les performances du système FSO-SAC-OCDMA sous l'effet des différents phénomènes météorologiques, nous avons calculés, dans la deuxième partie, les atténuations relatives à ces derniers. Un programme Matlab a été élaboré pour tracer l'évolution du BER en fonction de la portée entre l'émetteur et le récepteur. Pour chaque phénomène météorologique, La portée maximale a été déterminée, pour un BER acceptable, une puissance d'émission tolérée et des débits binaires variables. Les différents résultats obtenus ont été comparés. Cette comparaison montre que la détection DTO est meilleures que la détection DSO au détriment de la complexité du récepteur. Dans le chapitre qui suit, nous validons sous le logiciel Optisystem les résultats obtenus numériquement aux résultats de simulation fournis par ce dernier.

## Chapitre 4

# Modélisation et évaluation des performances du système FSO-SAC-OCDMA sous l'effet de mauvaises conditions météorologique à l'aide du logiciel Optisystem

### 4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter les résultats obtenus, par simulation, en modélisant le système FSO-SAC-OCDMA à l'aide du logiciel Optisystem. Le logiciel Optisystem est un outil innovant qui permet de réaliser des chaînes de transmission optiques à l'aide des composants et des générateurs de signaux contenus dans sa bibliothèque. Les deux techniques de détection DSO et DTO seront étudiées pour un nombre de 5 utilisateurs actifs utilisant les codes optiques ZCC de poids  $w = 3$ .

### 4.2 Modélisation sous Optisystem

La modélisation sous Optisystem du système étudié FSO-SAC-OCDMA est effectuée en utilisant la bibliothèque des composants optiques et électriques sous logiciel Optisystem version 9.0.0.623 [45]. Le schéma bloc d'une liaison FSO-SAC-OCDMA avec une détection directe est présentée par la figure (4.1).

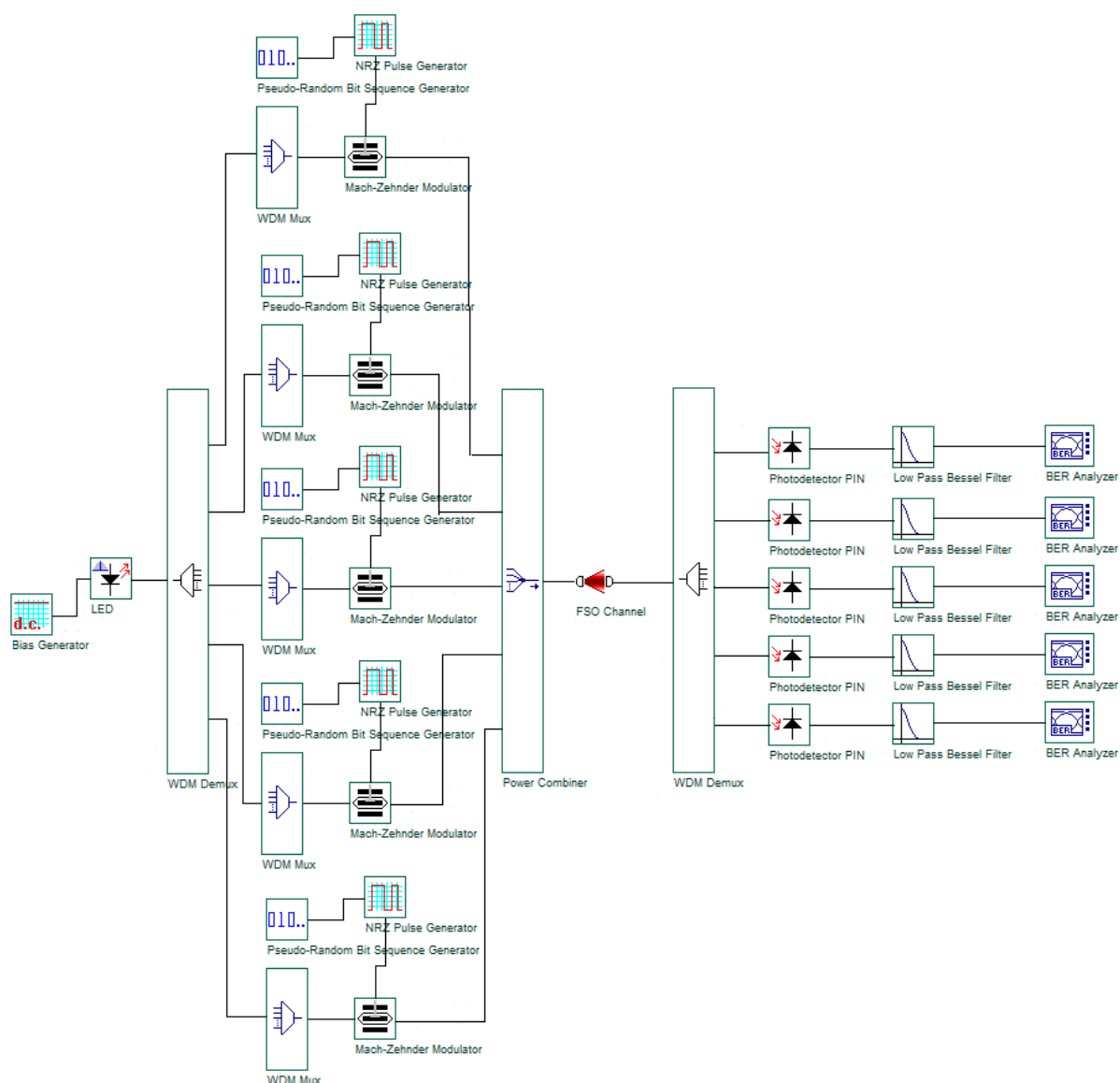
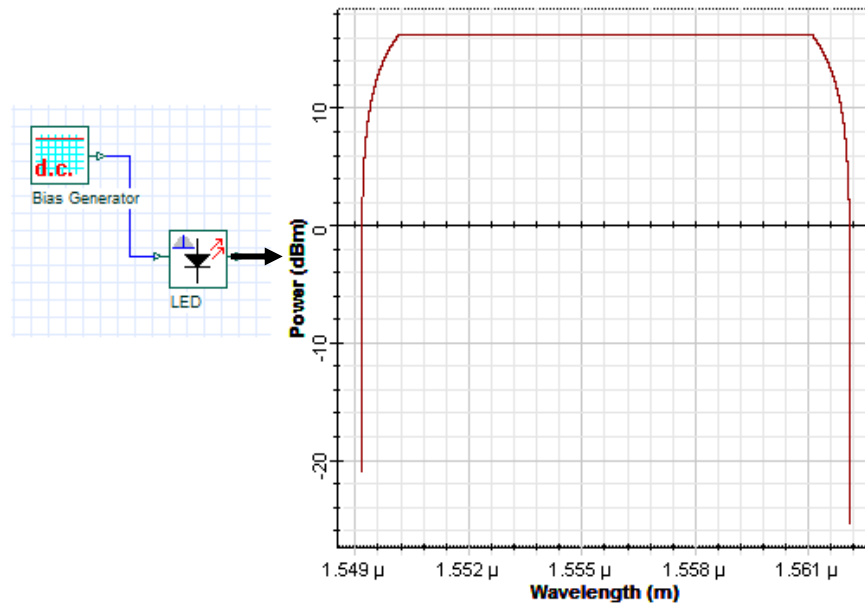


Figure 4. 1 - Schéma bloc du système FSO-SAC-OCDMA, détection DSO sous Optisystem.

Au niveau de l'émetteur une onde continue (Figure (4.2)) de la source optique LED, longueurs d'onde centrale égale à 1555.6 nm, est divisée en plusieurs longueurs d'onde (15 longueurs d'onde dans notre étude) par le démultiplexeur, le nombre des longueurs d'ondes doit être égal à la longueur du code optique utilisé.



**Figure 4. 2** – Puissance de la LED utilisée en fonction de la longueur d’onde.

La puissance du signal émis par la LED est fixée à  $25 \text{ dBm}$  pour avoir une puissance à la sortie du FSO  $P_t = 10 \text{ dBm}$ . Les pertes d’insertion ont été fixées comme suit :  $2 \text{ dB}$  au niveau du démultiplexeur et des différents multiplexeurs, et  $1 \text{ dB}$  au niveau de l’émetteur du télescope FSO.

Pour obtenir cette puissance, le courant d’alimentation de la source doit avoir une valeur bien déterminée. Ces deux paramètres sont liés par la relation suivante [45], [29] :

$$P = \eta \times h \times f_0 \times \frac{i(t)}{e} \quad (4.1)$$

où :

$\eta$  est l’efficacité quantique ( $\eta = 0.6$ );

$h$  est constante de Plank ( $h = 6.626068 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg/s}$ );

$f_0 = 192.85 \times 10^{12} \text{ Hz}$  est la fréquence centrale d’émission en [Hz], qui correspond à  $\lambda_0 = 1555.6 \text{ nm}$ ;

$e$  est la charge de l’électron ( $e = 1.9 \times 10^{-19} \text{ C}$ );

L’expression du courant en fonction de la puissance (équation (4.1)) est :

$$i(t) = \frac{P \times e}{\eta \times h \times f_0} \quad (4.2)$$

Le courant nécessaire à l’obtention d’une puissance de  $25 \text{ dBm}$  est  $i = 0.66 \text{ A}$ .

Les longueurs d'ondes, obtenues par division, sont regroupées trois par trois afin de former le code optique ZCC. La matrice du code optique ZCC utilisé ( $w = 3, K = 5$ ) [28] est donné à l'équation (2.14) au chapitre 2.

Les cinq codes optiques ( $C_1, C_2, C_3, C_4$  et  $C_5$ ) sont obtenus en découpant une partie du spectre de la LED appartenant à la bande C (1530 – 1565 nm) en sous bandes de largeurs  $\Delta\lambda = 0.8 \text{ nm}$ . La bande optique nécessaire pour former les cinq codes est :  $B = L \times \Delta\lambda = 15 \times 0.8 = 12 \text{ nm}$ , cette bande va de 1549.6 nm ( $1549.6 \text{ nm} = 1550 \text{ nm} - 0.4 \text{ nm}$ ) jusqu'à 1561.6 nm ( $1561.6 \text{ nm} = 1561.2 \text{ nm} + 0.4 \text{ nm}$ ), comme il est illustré dans la figure (4.3).

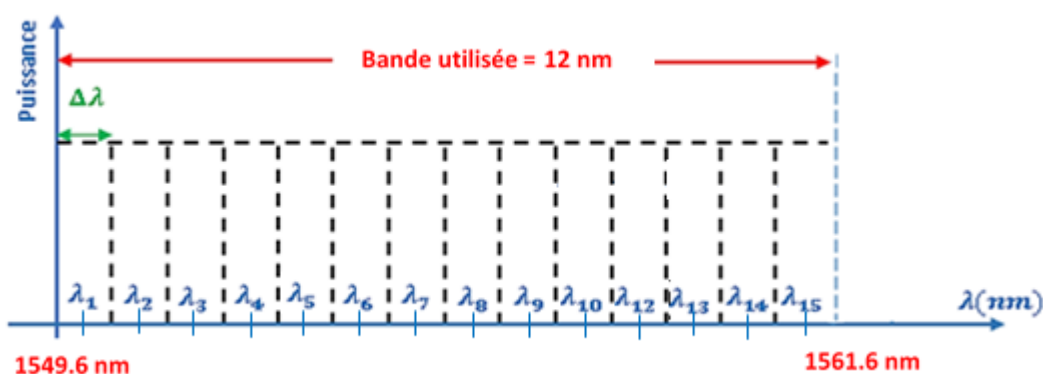


Figure 4. 3 - Répartition des longueurs d'ondes.

Les longueurs d'ondes associées aux codes  $C_i$  ( $i = 1,2,3,4,5$ ) selon la répartition du spectre de la figure (4.3) et la matrice du code (équation (2.14)) sont présentés dans le tableau (4.1).

Codes	Longueurs d'ondes		
$C_1$	$\lambda_2$	$\lambda_4$	$\lambda_6$
	1550.8 nm	1552.4 nm	1554 nm
$C_2$	$\lambda_1$	$\lambda_3$	$\lambda_5$
	1550 nm	1551.6 nm	1553.2 nm
$C_3$	$\lambda_7$	$\lambda_8$	$\lambda_9$
	1554.8 nm	1555.6 nm	1556.4 nm
$C_4$	$\lambda_{10}$	$\lambda_{11}$	$\lambda_{12}$
	1557.2 nm	1558 nm	1558.8 nm
$C_5$	$\lambda_{13}$	$\lambda_{14}$	$\lambda_{15}$
	1559.6 nm	1560.4 nm	1561.2 nm

Tableau 4. 1 - Longueurs d'ondes associées aux codes optiques  $C_i$ .

Le code  $C_1$  est formé comme il est montré dans la figure (4.4).

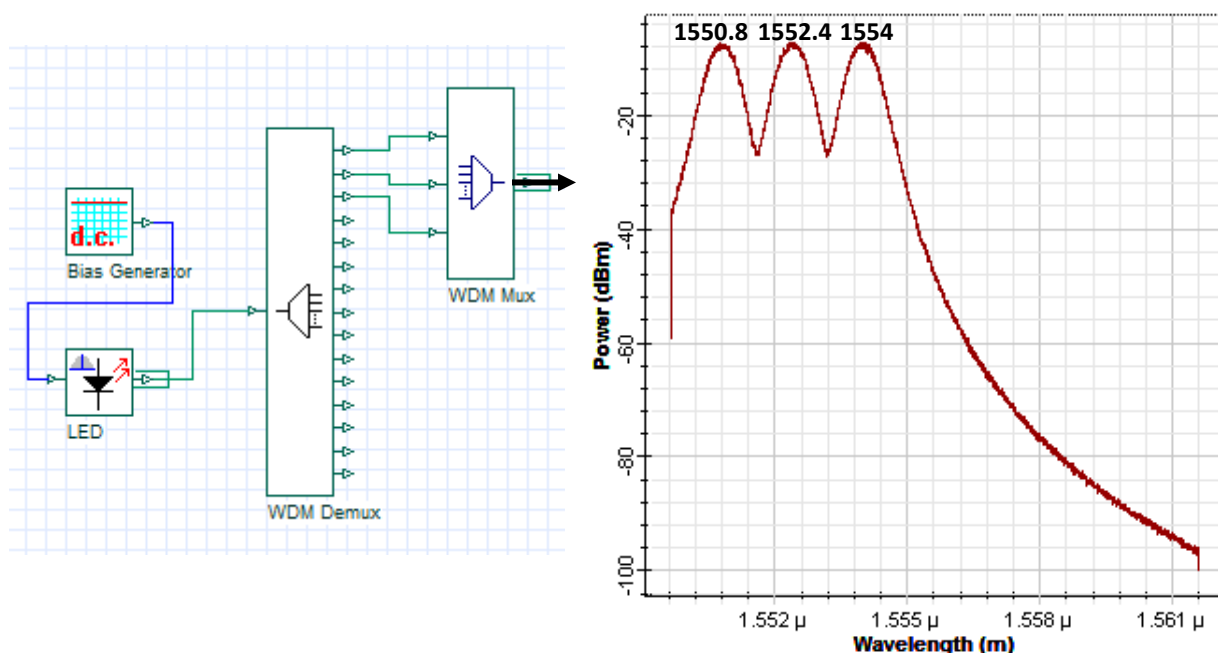


Figure 4. 4- Génération du code optique  $C_1$  sous Optisystem.

Le code optique de chaque utilisateur est ensuite modulé avec la donnée binaire qui est générée à l'aide d'un générateur de séquence binaire pseudo-aléatoires PRBS (PRBS : Pseudo Random Bit Sequence en anglais) afin d'approximer le caractère aléatoire des données. Un tel générateur peut donner une séquence  $P$  bits avec une équiprobabilité entre les bits « 0 » et les bits « 1 » comme suit [45] :

$$P = T_w \cdot D_b - n_l - n_t \tag{4.3}$$

où :

$T_w$  est la fenêtre de simulation temporelle (Time window);

$D_b$  est le débit binaire (bit rate), dans notre étude on a utilisé  $D_b = 622Mbps$  et  $D_b = 1Gbps$ ;

$n_l$  et  $n_t$  représentent respectivement le nombre de zéros en tête (leading zeros) et le nombre de zéros à la fin (trailing zeros) comme il est montré dans à la figure (4.5).

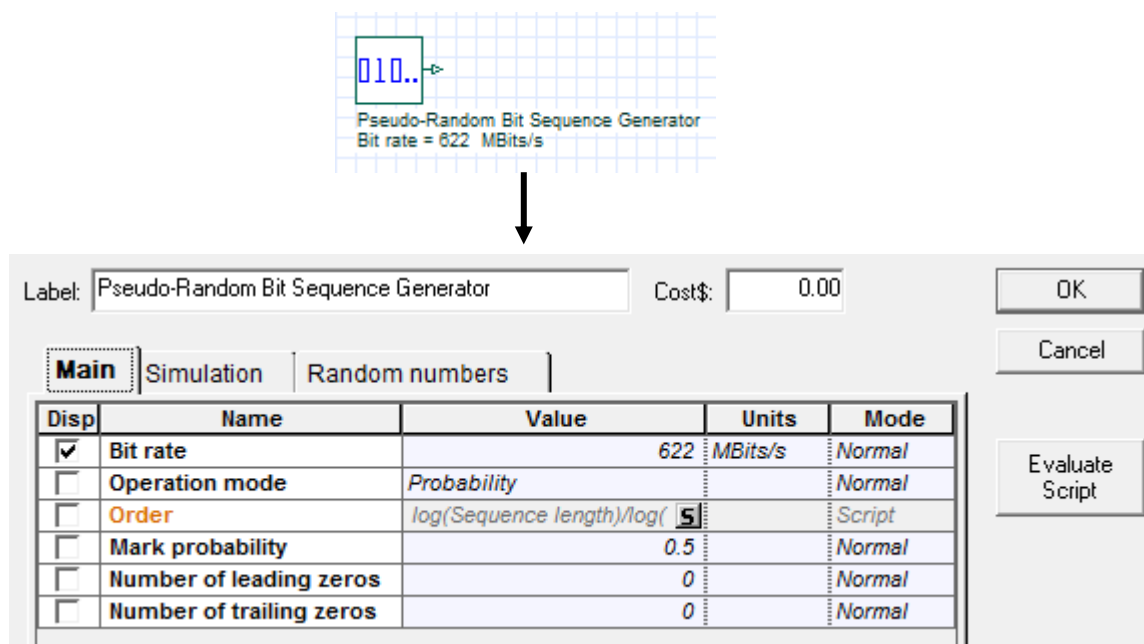


Figure 4. 5 - Configuration du générateur de séquence PRBS.

Les séquences binaires générées sont ensuite codées en NRZ et modulées par les codes optiques ZCC de chaque utilisateur. Un modulateur externe de type MZM (MZM : Mach-Zehander Modulator en anglais) est utilisé. Les signaux modulés de tous les utilisateurs sont ensuite sommés à l'aide d'un combineur optique (Power combiner) et transmis via le FSO.

Lorsque le signal est transmis via le FSO dans l'espace libre, ce signal est affecté par différents phénomènes dans le canal atmosphérique comme le brouillard, la pluie, la neige et la scintillation. Les valeurs d'atténuations et la portée sont mentionnées à la configuration de FSO dans l'Optisystem (figure (4.6)).



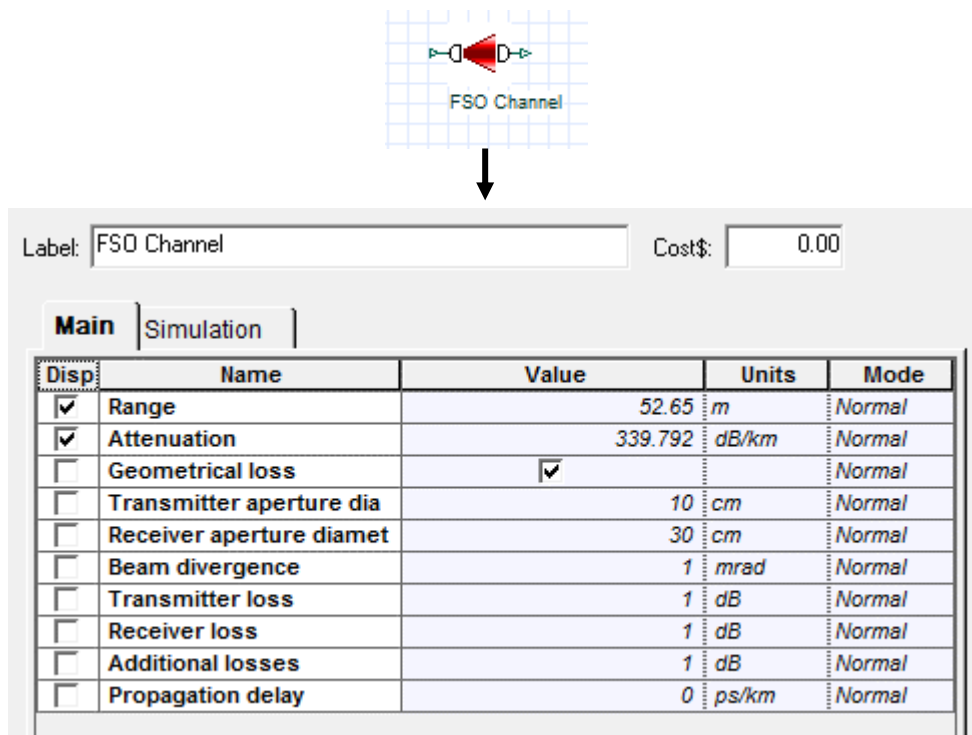


Figure 4. 6 - Configuration du canal FSO.

Dans la configuration du canal FSO, il y a plusieurs paramètres à tenir compte (figure (4.6)) :

- La portée (Range) : la distance entre l'émetteur FSO et le récepteur FSO;
- L'atténuation (Attenuation) : due aux différentes conditions météorologiques (brouillard, pluie, neige, scintillation);
- L'atténuation géométrique (Geometrical loss) dépend : du diamètre d'ouverture de l'émetteur et du récepteur et l'angle de divergence de faisceau;
- Perte au niveau de l'émetteur (Transmitter loss) au niveau de télescope ;
- Perte au niveau de récepteur (Receiver loss) au niveau de télescope ;
- Pertes additionnelles (Additional losses) : autres atténuations affectent la propagation de signal;
- Délais de propagation (Propagation delay).

La puissance du signal émis à la sortie du télescope est  $10 \text{ dBm}$  [4]. La figure (4.7) illustre l'atténuation du signal transmis via le canal FSO pour les paramètres cités à la figure (4.6) (cas de brouillard dense avec une portée de 52.65 m et avec considération des pertes d'insertion).

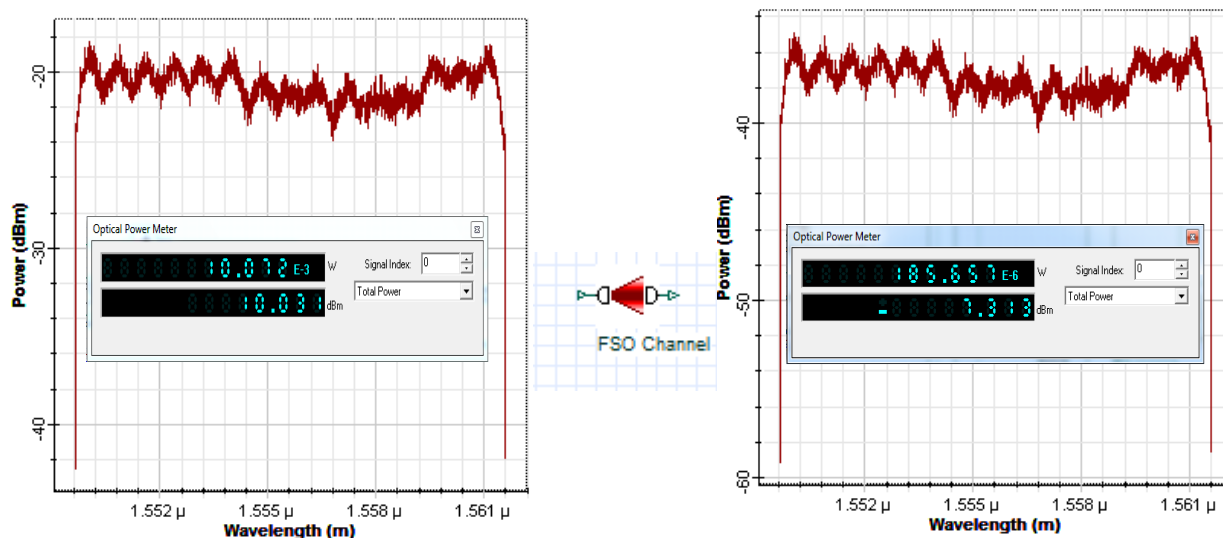


Figure 4. 7 - Atténuation du signal transmis via le canal FSO.

Au niveau du récepteur, un démultiplexeur optique permet d'avoir à sa sortie cinq longueurs d'onde (à chaque sortie, une longueur d'onde parmi celles constituant le code optique pour le cas de la détection DSO). Cette sélection se fait à l'aide d'un banc de filtres de Bessel constituant le démultiplexeur. Le démultiplexeur apporte une atténuation supplémentaire, due aux pertes d'insertions, elle est fixée égales à 2 [46]. Un photodétecteur (PD) est ensuite utilisé pour convertir le signal optique en un signal électrique. Le signal est ensuite filtré par un filtre LPF (LPF : Low Pass Filter en anglais) de type Bessel du quatrième ordre afin de récupérer les données transmises par l'utilisateur désiré, la fréquence de coupure de ce filtre a été choisi égale à  $D_b \times 0.75$  [45], où  $D_b$  représente le débit binaire de transmission.

### 4.3 Simulation du système FSO-SAC-OCDMA sous Optisystem

Cette partie consiste à simuler le système FSO-SAC-OCDMA sous l'Optisystem. Dans le logiciel l'Optisystem, un bit est représenté numériquement par un certain nombre d'échantillons. La figure (4.8) donne la représentation temporelle et spectrale d'une séquence à 16 échantillons [45]. La durée du bit  $T_b$ , la période d'échantillonnage  $T_e$ , la fenêtre de visualisation temporelle  $T_w$ , l'espacement fréquentiel  $\Delta f$  et la bande de visualisation fréquentielle  $F_e$  sont définis sous logiciel Optisystem par : bit periode, time spacing, time window, frequency spacing et sample rate.

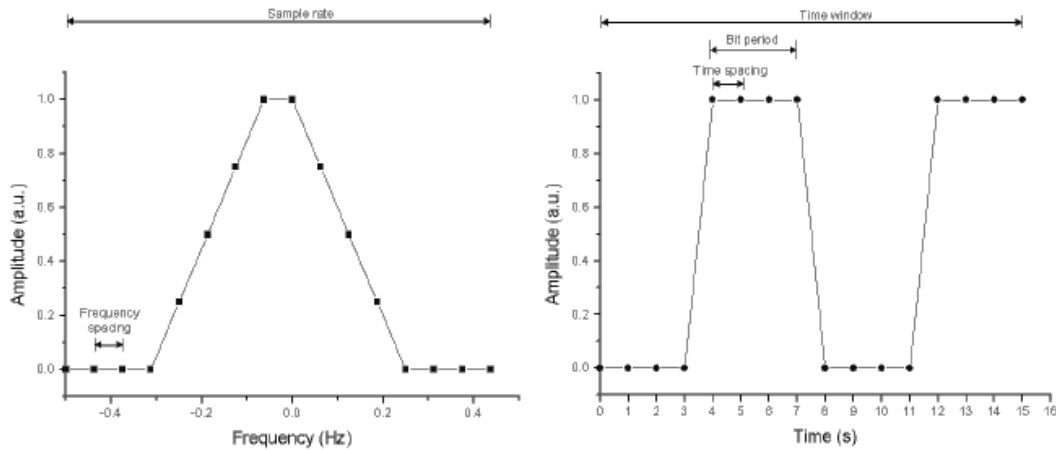


Figure 4. 8 - Représentation temporelle et spectrale d'une séquence à 16 échantillons [45].

### 4.3.1 Paramètres de simulation

La figure (4.9) montre les paramètres globaux nécessaires pour toute simulation Optisystem, tels que :

- La fenêtre de visualisation temporelle (Time window) ;
- Le nombre d'échantillons total de la séquence à transmettre (number of samples) ;

- La fenêtre de visualisation fréquentielle (sample rate)

Ces paramètres sont calculés en utilisant :

- Le débit binaire (bit rate) ;
- La longueur de la séquence de bit (sequence length) ;
- Nombre d'échantillons par bit.

Simulation			
Name	Value	Units	Mode
Simulation window	Set bit rate		Normal
Reference bit rate	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal
Bit rate	2312500000	Bits/s	Normal
Time window	8.856216216216e-008	s	Normal
Sample rate	1480000000000	Hz	Normal
Sequence length	2048	Bits	Normal
Samples per bit	64		Normal
Number of samples	131072		Normal

Figure 4. 9 - Paramètres globaux utilisés sous l'Optisystem.

La bande de visualisation fréquentielle  $f_e$  [Hz] (Sample rate) nécessaire à la simulation se calcul de la manière suivante:

$$f_e = f_{max} - f_{min} \quad (4.4)$$

où :

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (4.5)$$

$$f_{max} = \frac{c}{1549.6 \times 10^{-6}} = 193.59 \text{ THz}$$

$$\Rightarrow f_e = 1.48 \text{ THz}$$

$$f_{min} = \frac{c}{1561.6 \times 10^{-6}} = 192.11 \text{ THz}$$

La période d'échantillonnage  $T_e$  s'obtient comme suit :

$$T_e = \frac{1}{f_e} = 0.67567 \cdot 10^{-12} \text{ s}$$

La fenêtre de visualisation temporelle se calcul de manière suivante :

$$T_w = T_e \times \text{number of samples} = 0.67567 \cdot 10^{-12} \times 131072 = 8.856216216216 \times 10^{-8} \text{ s}$$

Le débit de simulation (bit rate) se calcul comme suit :

$$B_r = \frac{1}{T_b} = \frac{1}{S_b \times T_e} = \frac{1}{64 \times T_e} = 23.125 \text{ Gbps}$$

où :  $S_b$  désigne le nombre d'échantillons par bit (samples per bit)

Le nombre de bits à visualiser est comme suit :

$$N_b = \frac{T_w}{T_e} = \frac{T_w}{S_b \times T_e} = 2048$$

Les pertes d'insertion considérées sont indiquées dans le tableau (4.2).

Composant sous Optisystem		Pertes d'insertion (dB)
Démultiplexeur / Multiplexeur		2
FSO	FSO émetteur	1
	FSO récepteur	1
	Pertes additionnelles (diffusion, absorption, ...)	1

**Tableau 4. 2** - Pertes d'insertion considérées.

### 4.3.2 Évaluation des performances

Pour évaluer les performances du système FSO-SAC-OCDMA, trois facteurs de qualité sont disponibles sous le logiciel Optisystem :

- Le BER : La valeur acceptable doit être inférieure ou égale à  $10^{-9}$  ;
- Le facteur Q : doit être supérieur ou égale à 6 ;
- Le diagramme de l'œil : l'ouverture verticale doit être maximale.

Le BER et le facteur Q sont reliés par l'équation suivante [28], [45] :

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \quad (4.6)$$

où le facteur Q est estimé par le logiciel selon l'équation (4.7) suivante [45]. Dans l'équation (4.7),  $i_0$  et  $i_1$  représentent respectivement les courants associés aux bits « 1 » et « 0 ».  $\sigma_1$  et  $\sigma_0$  les écarts type respectives. Les nombre de bits transmis est de 2048 (voir figure (4.9))

$$Q = \frac{i_1 - i_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (4.7)$$

Dans ce qui suit, nous allons présenter les résultats des simulations obtenus sous l'Optisystem, pour deux valeurs de débit binaire  $D_b = 622 \text{ Mbps}$ ,  $D_b = 1 \text{ Gbps}$ . Les deux configurations de détection vue au chapitre 3 (détection DSO et DTO) ont été considérées :

Les résultats analytiques exposés au chapitre 3 sont obtenus sans considération de pertes d'insertion. Pour cela, dans un premier temps, nous allons comparer les résultats obtenus par simulation (sous Optisystem) avec et sans perte d'insertion à ceux obtenus analytiquement.

#### 4.3.2.1 Détection DSO, sans pertes d'insertion

La simulation est effectuée pour une puissance pour les phénomènes météorologiques suivants : brouillards, pluie, neige et scintillation. Les paramètres considérés du canal FSO sont donnés au tableau (4.6). La puissance à la sortie du FSO a été fixée à  $P_t = 10 \text{ dBm}$ . L'atténuation (ligne 2, colonne 2 de la figure (4.6), exemple dans le cas de brouillard dense) doit correspondre au phénomène étudié (voir chapitre 3). La portée maximale doit être déterminée à partir d'un BER acceptable de  $10^{-9}$ .

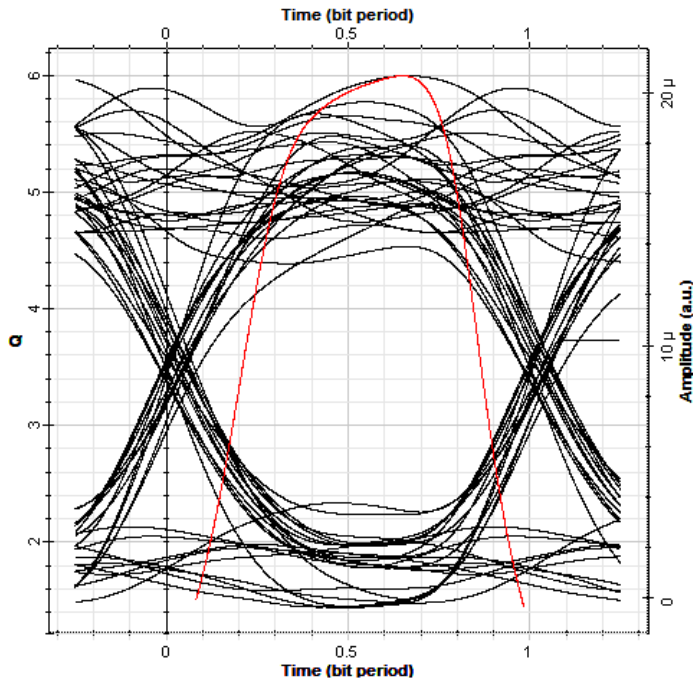
## (a) Cas du brouillard

Les résultats obtenus sont indiqués dans le tableau (4.3).

<i>D<sub>b</sub> = 622 Mbps</i>				
Phénomènes météorologiques	Atténuation (dB/km)	Portée maximale (m)	Min BER	Facteur <i>Q</i>
Brouillard dense	339.7920	65.8	$1 \times 10^{-9}$	5.99732
Brouillard modéré	33.9792	384.1	$1 \times 10^{-9}$	5.99731
Brume	2.6743	1340	$1 \times 10^{-9}$	5.99721
Temps clair	0.2429	1960	$1 \times 10^{-9}$	5.99687
<i>D<sub>b</sub> = 1 Gbps</i>				
Phénomènes météorologiques	Atténuation (dB/km)	Portée maximale (m)	Min BER	Facteur <i>Q</i>
Brouillard dense	339.7920	64.4	$1 \times 10^{-9}$	5.99592
Brouillard modéré	33.9792	373.55	$1 \times 10^{-9}$	5.99606
Brume	2.6743	1277.9	$1 \times 10^{-9}$	5.99551
Temps clair	0.2429	1839	$1 \times 10^{-9}$	5.99674

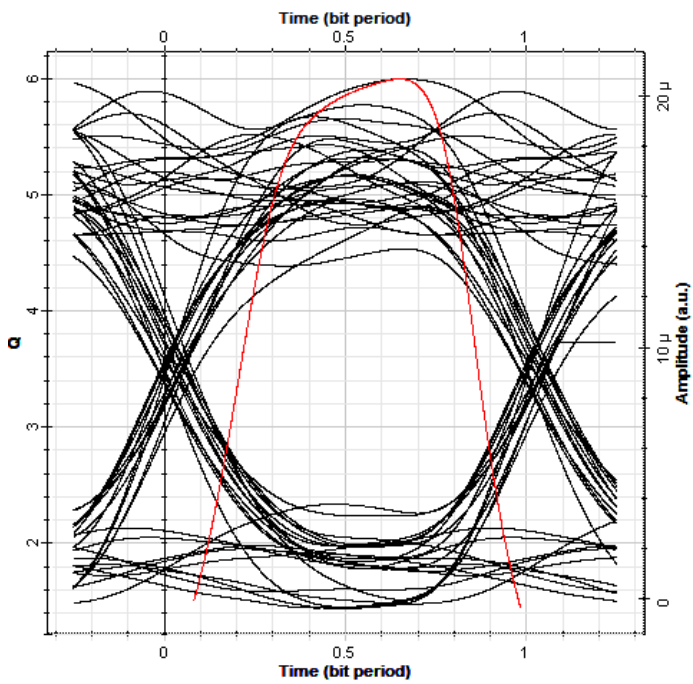
**Tableau 4. 3** - Portée maximale, cas de brouillard, détection DSO, sans pertes d'insertion.

D'après le tableau (4.3), les portées maximales estimées sont quelque peu différentes à celles déterminées analytiquement (Tableau (3.3)). La différence minimale remarquée est due, à notre sens, à la méthode d'estimation utilisée par le logiciel Optisystem. Ces résultats sont validés par le biais du diagramme de l'œil (voir figure (4.10) et (4.11)). Les mêmes remarques restent valables dans le cas de la pluie (voir tableau (4.4) et figures (4.12), (4.13)), le cas de la neige (voir tableau (4.5) et figures (4.14), (4.15), (4.16) et (4.17)), le cas de la scintillation (voir tableau (4.6) et figures (4.18), (4.19)).



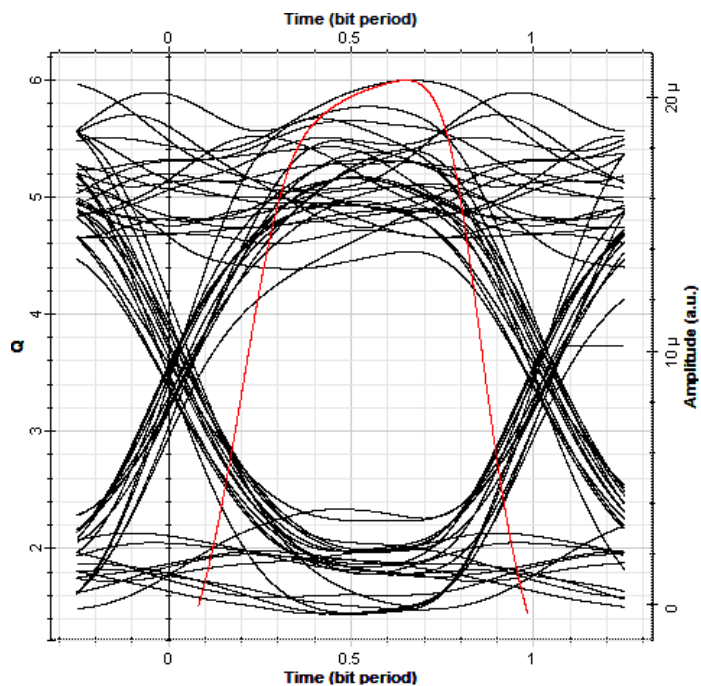
a)

Analysis	
Max. Q Factor	5.99732
Min. BER	1.00271e-009
Eye Height	7.62516e-006
Threshold	7.73834e-006
Decision Inst.	0.649762



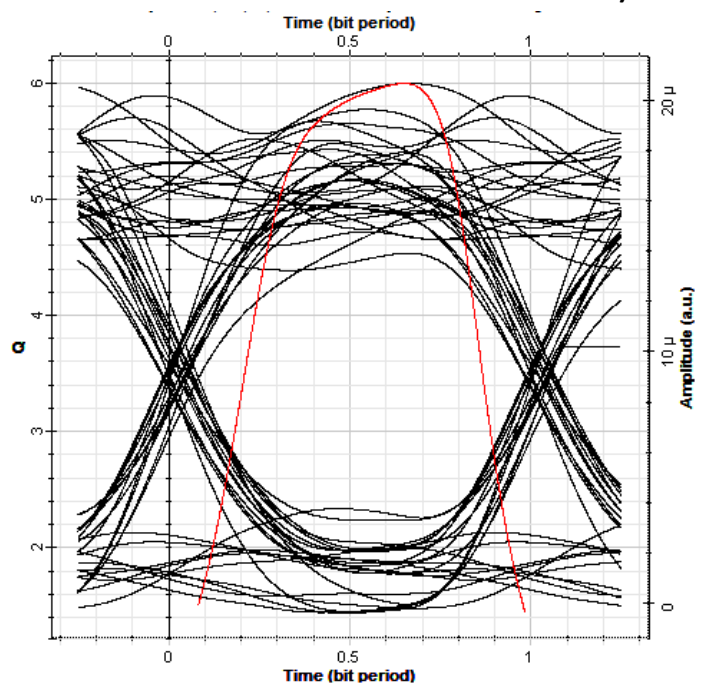
b)

Analysis	
Max. Q Factor	5.99731
Min. BER	1.0028e-009
Eye Height	7.62496e-006
Threshold	7.73814e-006
Decision Inst.	0.649762



Analysis	
Max. Q Factor	5.99721
Min. BER	1.00336e-009
Eye Height	7.62363e-006
Threshold	7.73686e-006
Decision Inst.	0.649762

c)

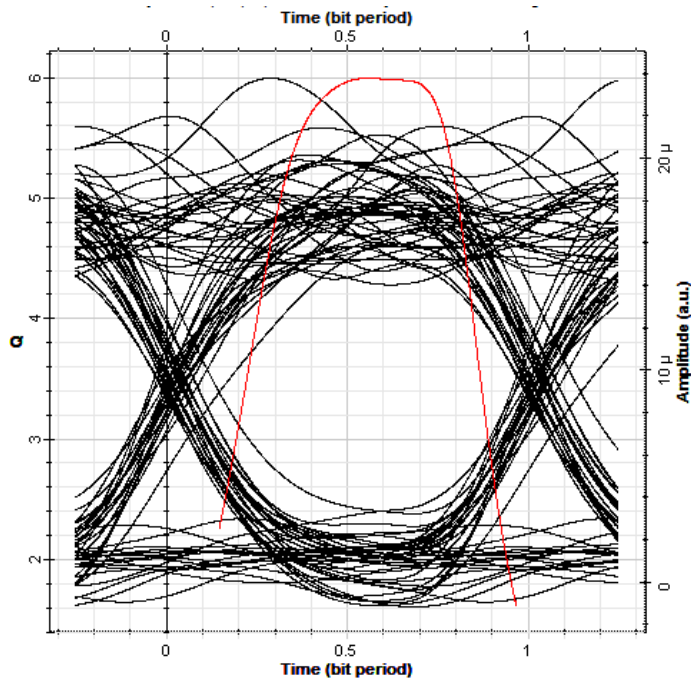


Analysis	
Max. Q Factor	5.99687
Min. BER	1.00548e-009
Eye Height	7.61867e-006
Threshold	7.73208e-006
Decision Inst.	0.649762

d)

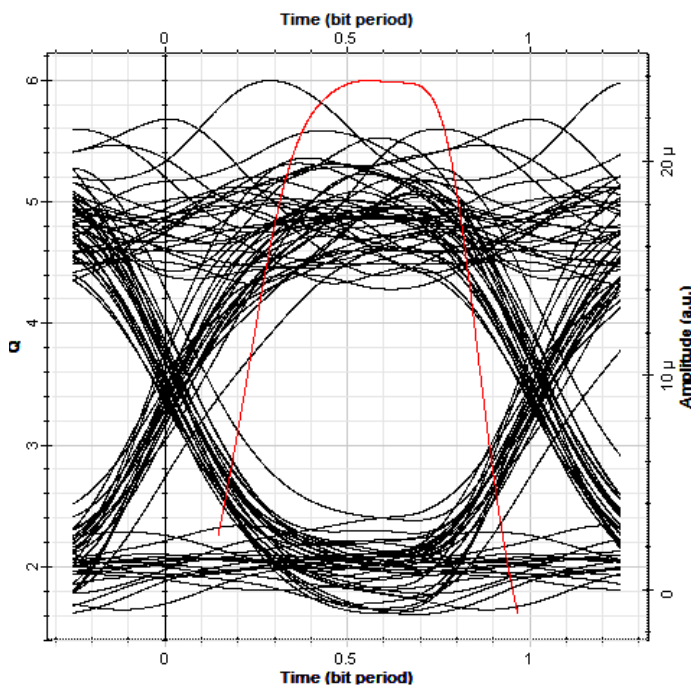
Figure 4. 10- Diagramme de l'œil, cas de brouillard, détection DSO, sans pertes d'insertion,  $D_b = 622 Mbps$  : a) brouillard dense, b) brouillard modéré, c) brume, d) temps clair.





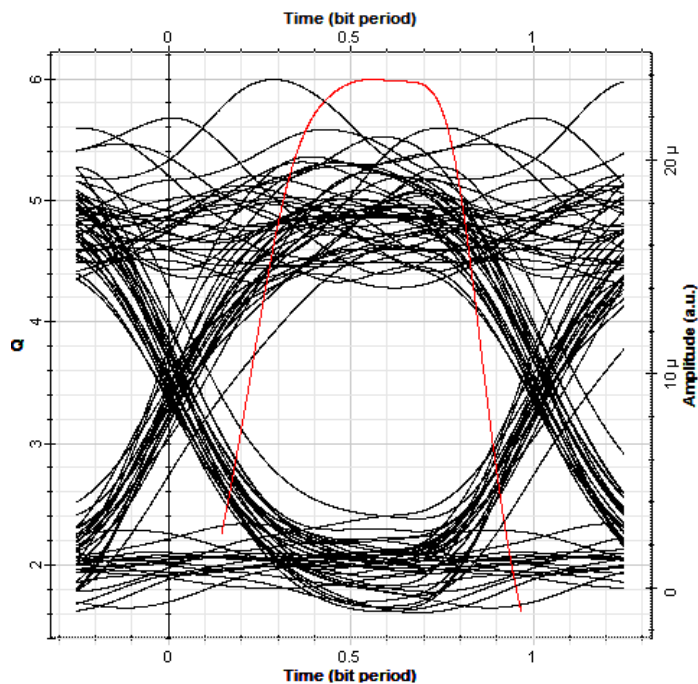
a)

Analysis	
Max. Q Factor	5.99592
Min. BER	1.0056e-009
Eye Height	8.23957e-006
Threshold	7.56157e-006
Decision Inst.	0.555405



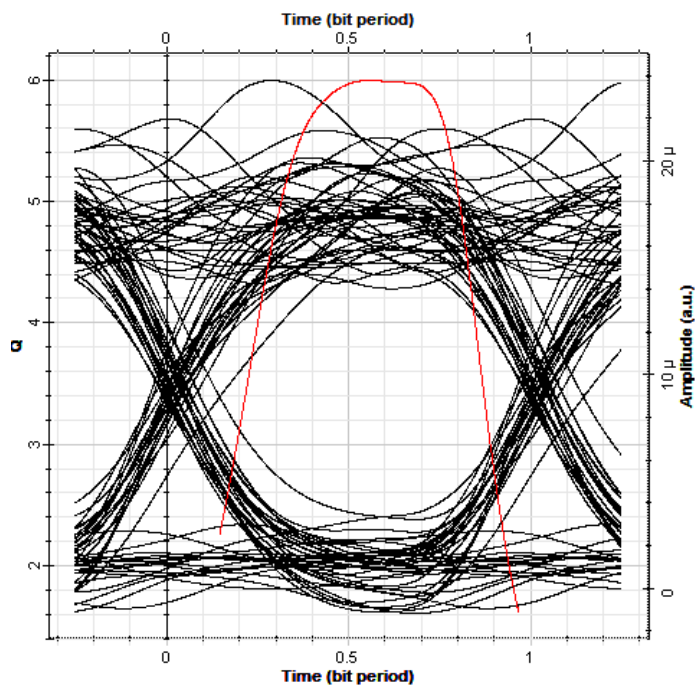
b)

Analysis	
Max. Q Factor	5.99606
Min. BER	1.00476e-009
Eye Height	8.24051e-006
Threshold	7.56217e-006
Decision Inst.	0.555405



Analysis	
Max. Q Factor	5.99551
Min. BER	1.00817e-009
Eye Height	8.23671e-006
Threshold	7.55972e-006
Decision Inst.	0.555405

c)



Analysis	
Max. Q Factor	5.99674
Min. BER	1.00052e-009
Eye Height	8.24527e-006
Threshold	7.56524e-006
Decision Inst.	0.555405

d)

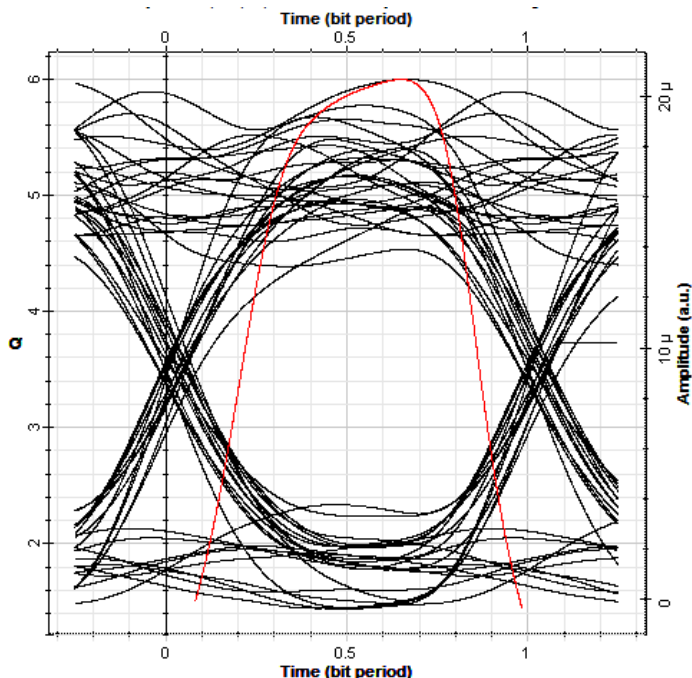
Figure 4. 11- Diagramme de l'œil, cas le brouillard, détection DSO, sans pertes d'insertion,  $D_b = 1 Gbps$  : a) brouillard dense, b) brouillard modéré, c) brume, d) temps clair.

(b) Cas de la pluie

Les résultats obtenus sont indiqués dans le tableau (4.4) et les figures (4.12) et (4.13).

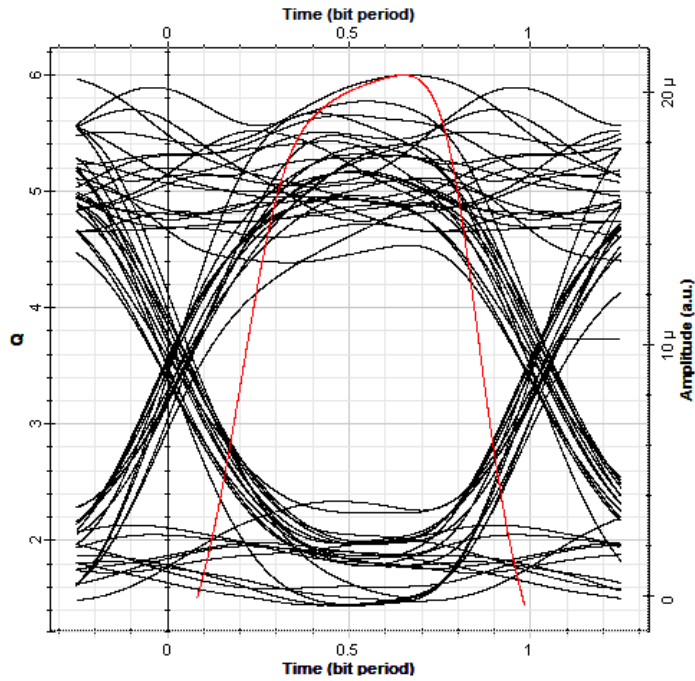
$D_b = 622 \text{ Mbps}$					
Phénomènes météorologiques	Précipitation (mm/h)	Atténuation (dB/km)	Portée maximale (m)	Min BER	Facteur Q
Pluie d'orage	100	23.5403	484.8	$1 \times 10^{-9}$	5.997
Forte pluie	25	9.2989	811.8	$1 \times 10^{-9}$	5.99773
Pluie légère	2.5	1.9881	1458	$1 \times 10^{-9}$	5.99732
Bruine pluie	0.25	0.4250	1883	$1 \times 10^{-9}$	5.99775
$D_b = 1 \text{ Gbp}$					
Phénomènes météorologiques	Précipitation (mm/h)	Atténuation (dB/km)	Portée maximale (m)	Min BER	Facteur Q
Pluie d'orage	100	23.5403	470.5	$1 \times 10^{-9}$	5.99586
Forte pluie	25	9.2989	783	$1 \times 10^{-9}$	5.99605
Pluie légère	2.5	1.9881	1386.5	$1 \times 10^{-9}$	5.99621
Bruine pluie	0.25	0.4250	1772	$1 \times 10^{-9}$	5.99641

Tableau 4. 4 - Portée maximale, cas de la pluie, détection DSO, sans pertes d'insertion.



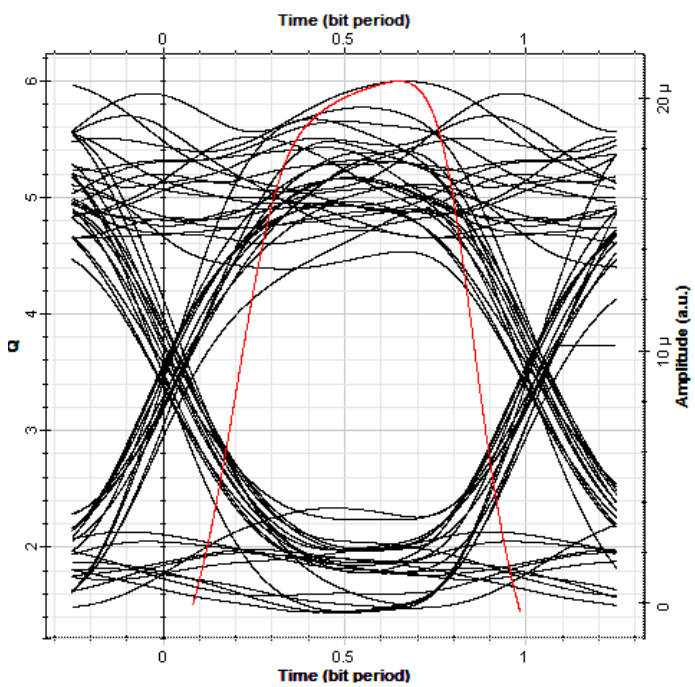
Analysis	
Max. Q Factor	5.997
Min. BER	1.00471e-009
Eye Height	7.62046e-006
Threshold	7.73381e-006
Decision Inst.	0.649762

a)



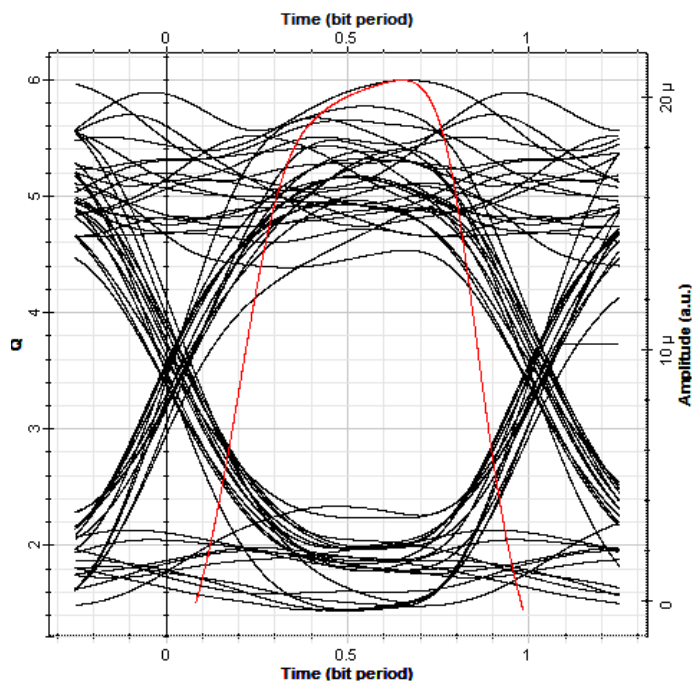
b)

Analysis	
Max. Q Factor	5.99773
Min. BER	1.00017e-009
Eye Height	7.63117e-006
Threshold	7.74412e-006
Decision Inst.	0.649762



c)

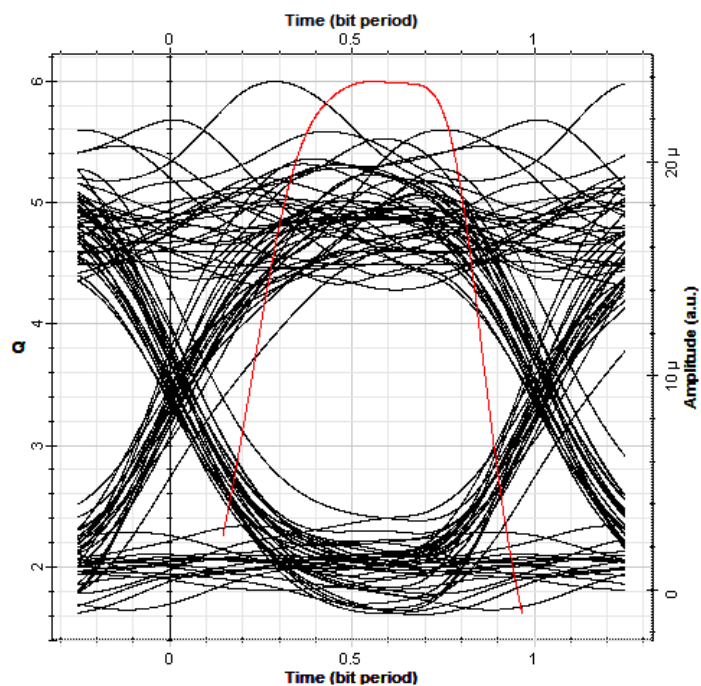
Analysis	
Max. Q Factor	5.99732
Min. BER	1.00271e-009
Eye Height	7.62517e-006
Threshold	7.73834e-006
Decision Inst.	0.649762



Analysis	
Max. Q Factor	5.99775
Min. BER	1.00008e-009
Eye Height	7.63137e-006
Threshold	7.74432e-006
Decision Inst.	0.649762

d)

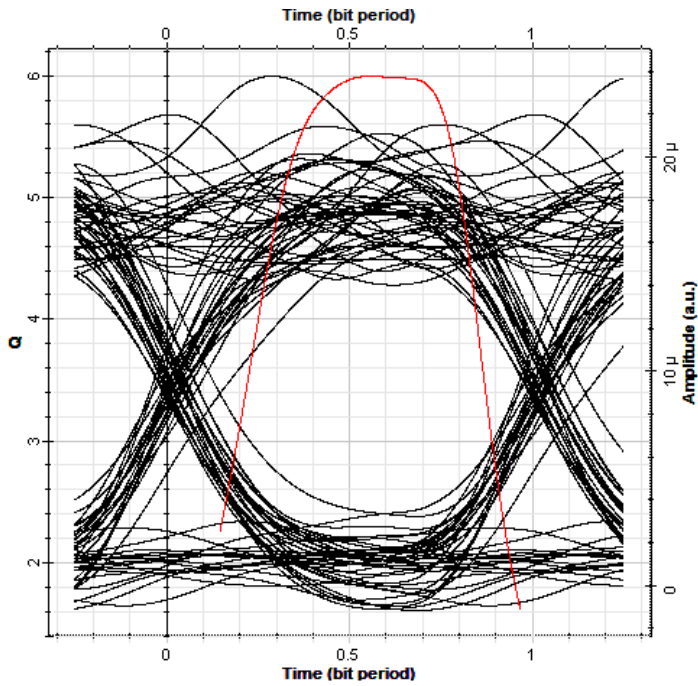
Figure 4. 12 - Diagramme de l'œil, cas de la pluie, détection DSO, sans pertes d'insertion,  $D_b = 622 Mbps$  : a) pluie d'orage, b) forte pluie, c) pluie légère, d) bruine pluie.



Analysis	
Max. Q Factor	5.99586
Min. BER	1.00599e-009
Eye Height	8.23914e-006
Threshold	7.56129e-006
Decision Inst.	0.555405

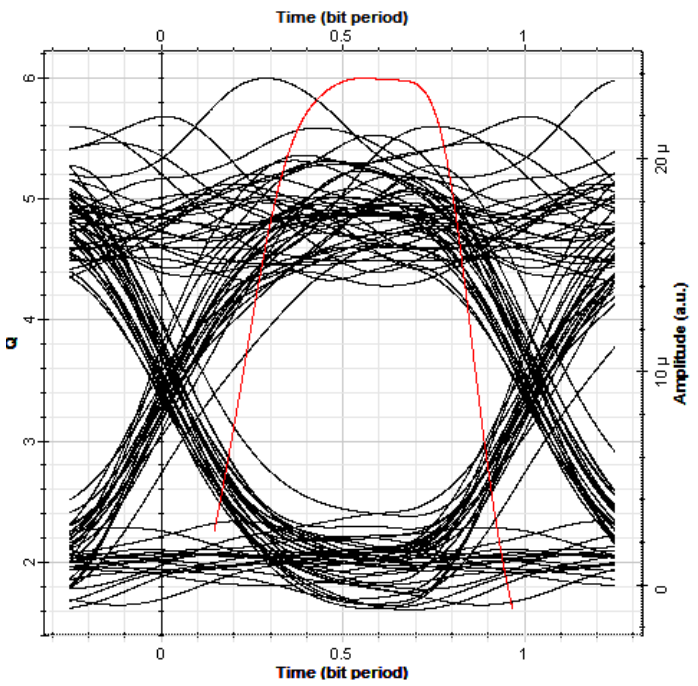
a)





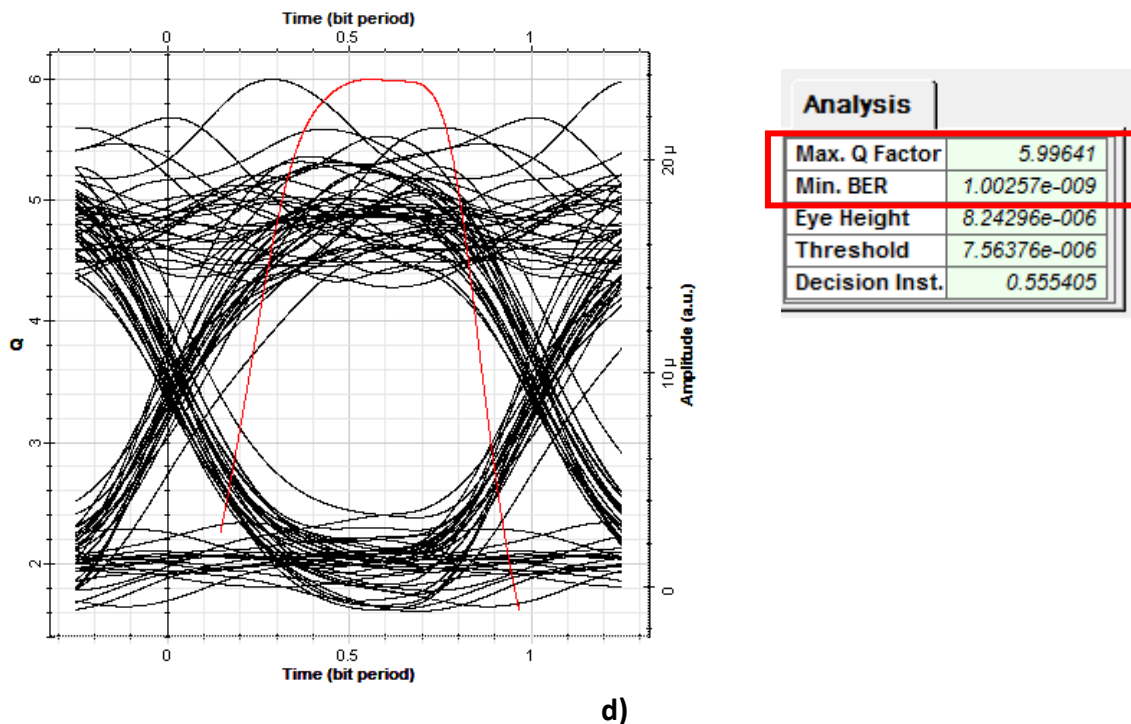
b)

Analysis	
Max. Q Factor	5.99605
Min. BER	1.00478e-009
Eye Height	8.2405e-006
Threshold	7.56216e-006
Decision Inst.	0.555405



c)

Analysis	
Max. Q Factor	5.99621
Min. BER	1.00381e-009
Eye Height	8.24158e-006
Threshold	7.56286e-006
Decision Inst.	0.555405



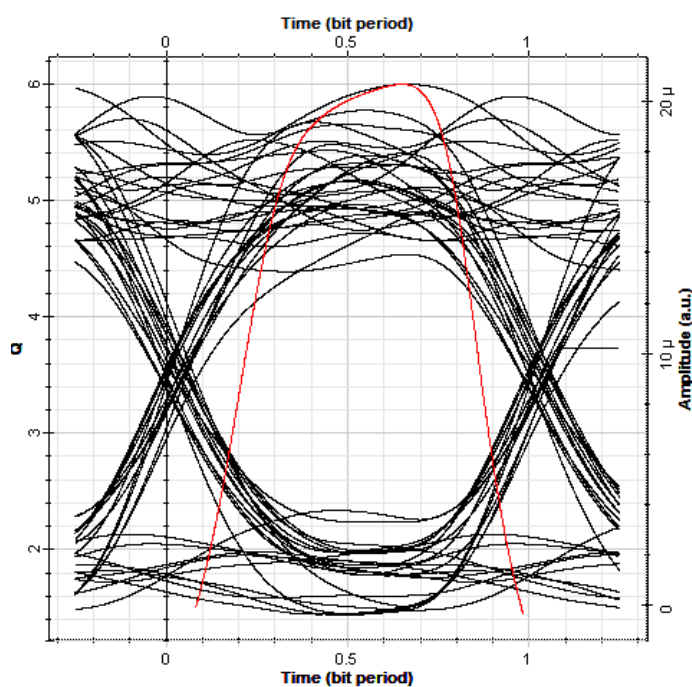
**Figure 4. 13** - Diagramme de l'œil, cas de brouillard, détection DSO, sans pertes d'insertion,  $D_b = 1\text{ Gbps}$  : a) pluie d'orage, b) forte pluie, c) pluie légère, d) bruine pluie.

**(c) Cas de la neige**

Les résultats obtenus sont indiqués dans le tableau (4.5) et les figures (4.14), (4.15), (4.16) et (4.17).

$D_b = 622 Mbps$					
Phénomènes météorologiques	Précipitation (mm/h)	Atténuation (dB/km)	Portée maximale (m)	Min BER	Facteur Q
Neige sèche	2	14.2887	648.4	$1 \times 10^{-9}$	5.99765
	4	37.1891	362	$1 \times 10^{-9}$	5.99663
	6	65.0760	245.6	$1 \times 10^{-9}$	5.99678
	8	96.7913	183	$1 \times 10^{-9}$	5.99751
Neige humide	2	6.2263	978.6	$1 \times 10^{-9}$	5.99747
	4	10.2559	773	$1 \times 10^{-9}$	5.99757
	6	13.7329	663	$1 \times 10^{-9}$	5.99661
	8	16.8934	590.1	$1 \times 10^{-9}$	5.99771
$D_b = 1 Gbps$					
Phénomènes météorologiques	Précipitation (mm/h)	Atténuation (dB/km)	Portée maximale (m)	Min BER	Facteur Q
Neige sèche	2	14.2887	627.4	$1 \times 10^{-9}$	5.99607
	4	37.1891	352.1	$1 \times 10^{-9}$	5.99649
	6	65.0760	239.5	$1 \times 10^{-9}$	5.99528
	8	96.7913	178.7	$1 \times 10^{-9}$	5.99637
Neige humide	2	6.2263	940.6	$1 \times 10^{-9}$	5.99541
	4	10.2559	746	$1 \times 10^{-9}$	5.99672
	6	13.7329	641	$1 \times 10^{-9}$	5.99643
	8	16.8934	571.7	$1 \times 10^{-9}$	5.99564

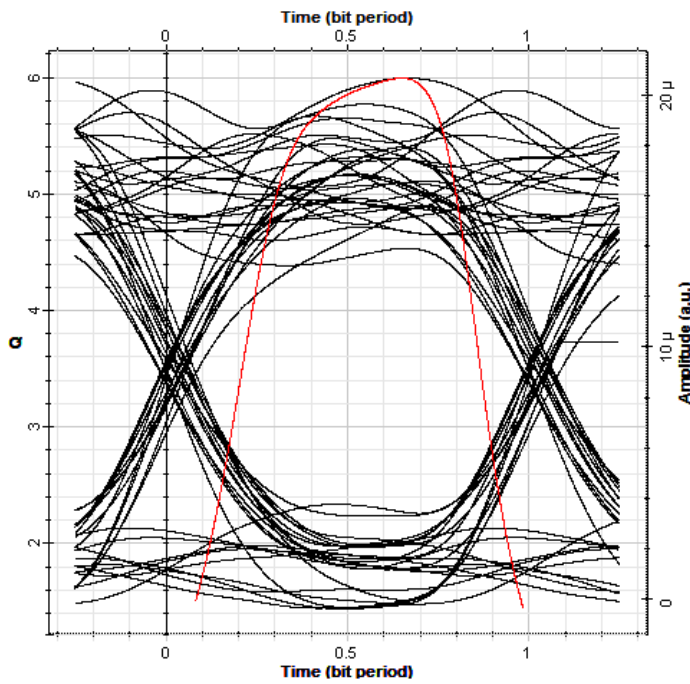
Tableau 4. 5 - Portée maximale, cas de la neige, détection DSO, sans pertes d'insertion.



Analysis	
Max. Q Factor	5.99765
Min. BER	1.00067e-009
Eye Height	7.62997e-006
Threshold	7.74297e-006
Decision Inst.	0.649762

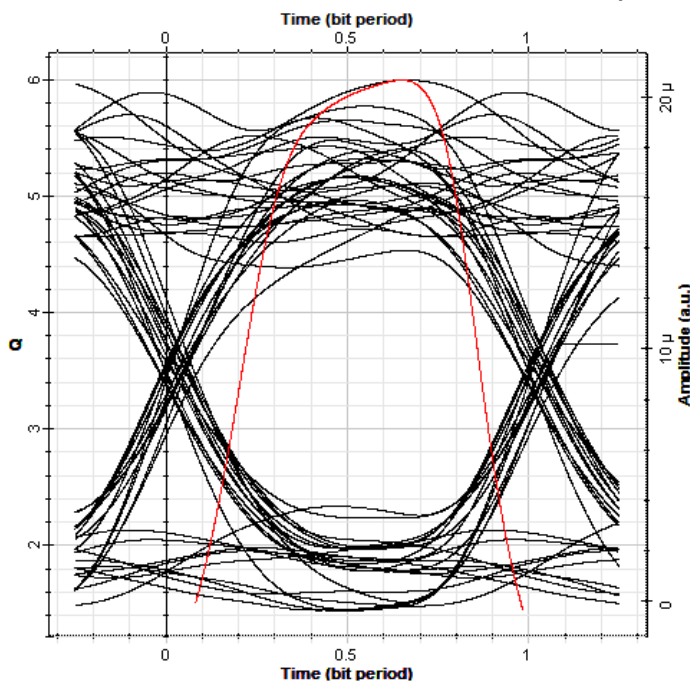
a)





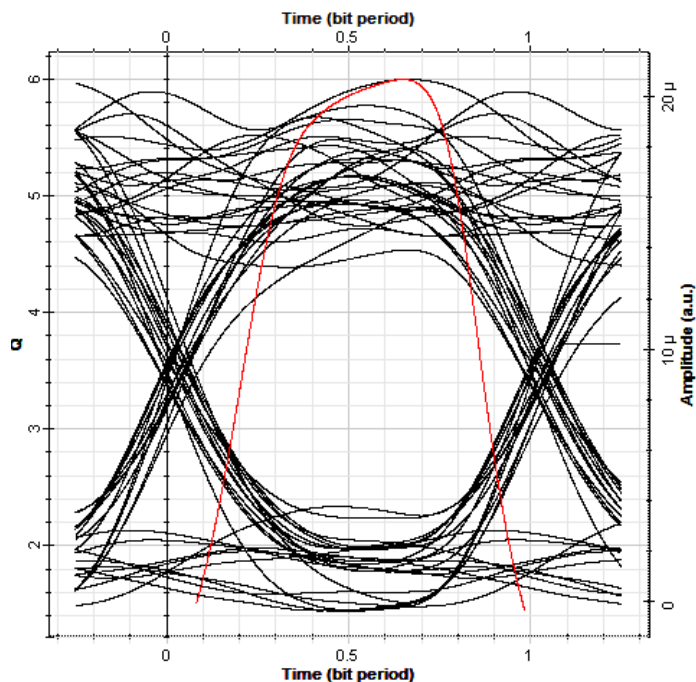
Analysis	
Max. Q Factor	5.99663
Min. BER	1.00699e-009
Eye Height	7.61514e-006
Threshold	7.72868e-006
Decision Inst.	0.649762

b)



Analysis	
Max. Q Factor	5.99678
Min. BER	1.00605e-009
Eye Height	7.61732e-006
Threshold	7.73078e-006
Decision Inst.	0.649762

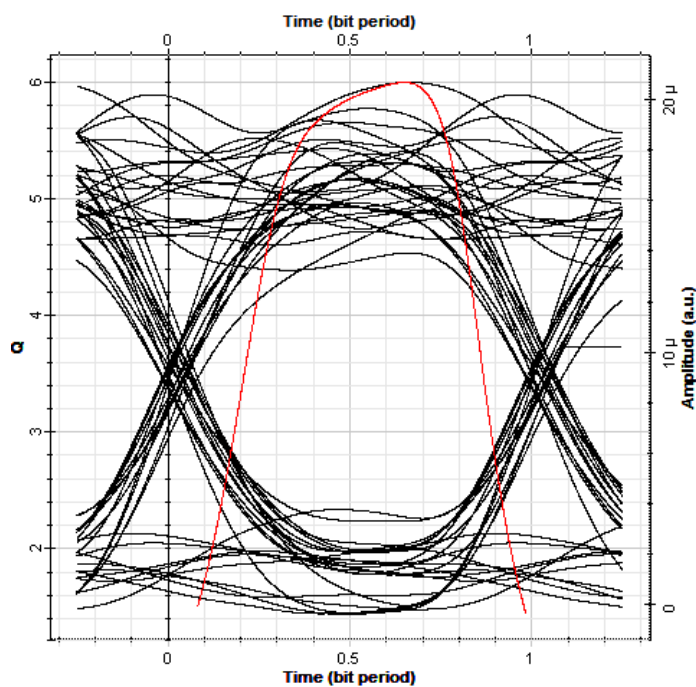
c)



Analysis	
Max. Q Factor	5.99751
Min. BER	1.00153e-009
Eye Height	7.62795e-006
Threshold	7.74102e-006
Decision Inst.	0.649762

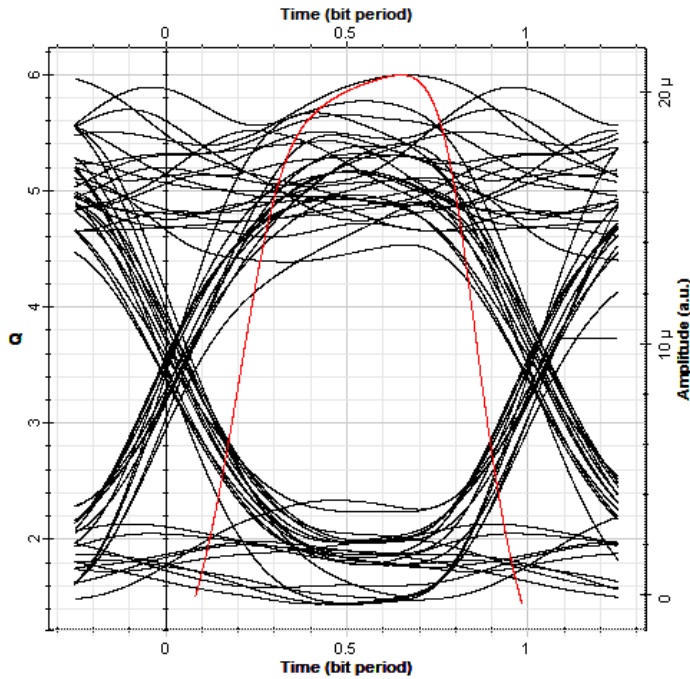
d)

Figure 4. 14 - Diagramme de l'œil, cas de la neige sèche, détection DSO, sans pertes d'insertion,  $D_b = 622 Mbps$  : a) 2 mm/h, b) 4 mm/h, c) 6 mm/h, d) 8 mm/h.



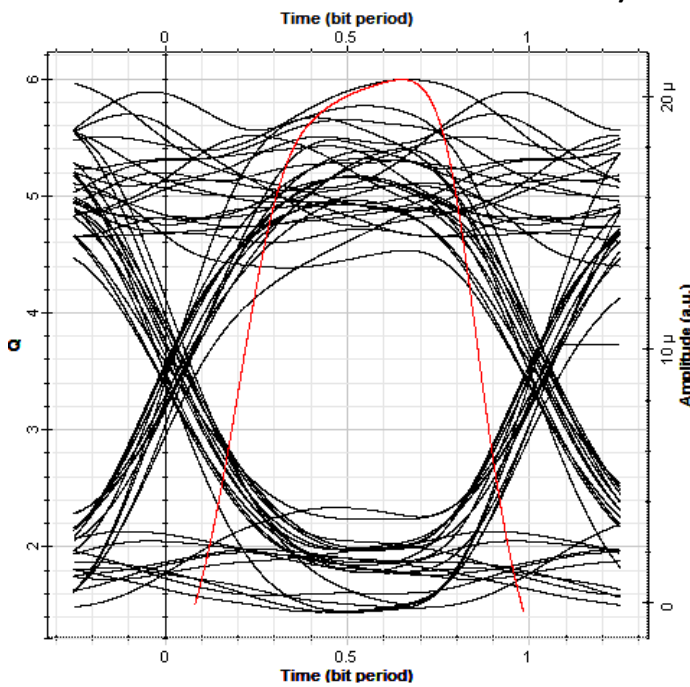
Analysis	
Max. Q Factor	5.99747
Min. BER	1.00177e-009
Eye Height	7.62737e-006
Threshold	7.74047e-006
Decision Inst.	0.649762

a)



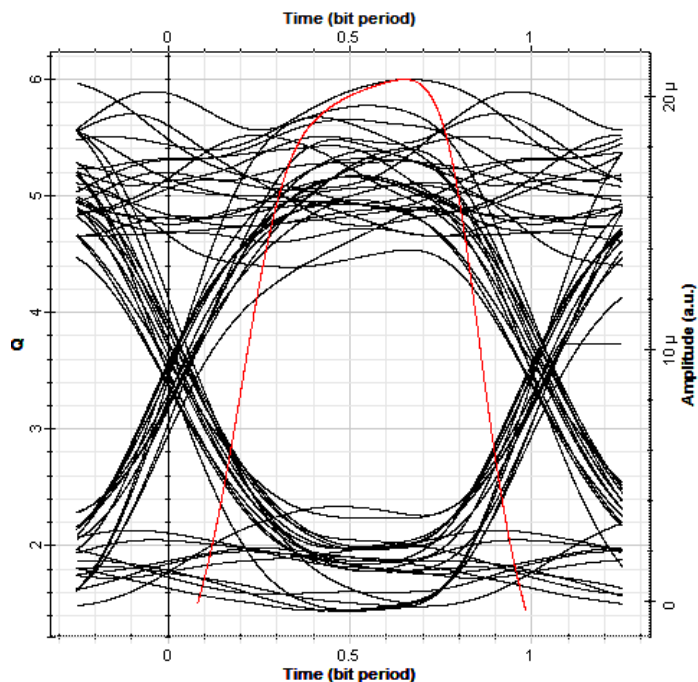
Analysis	
Max. Q Factor	5.99757
Min. BER	1.00118e-009
Eye Height	7.62878e-006
Threshold	7.74182e-006
Decision Inst.	0.649762

b)



Analysis	
Max. Q Factor	5.99661
Min. BER	1.00708e-009
Eye Height	7.61493e-006
Threshold	7.72848e-006
Decision Inst.	0.649762

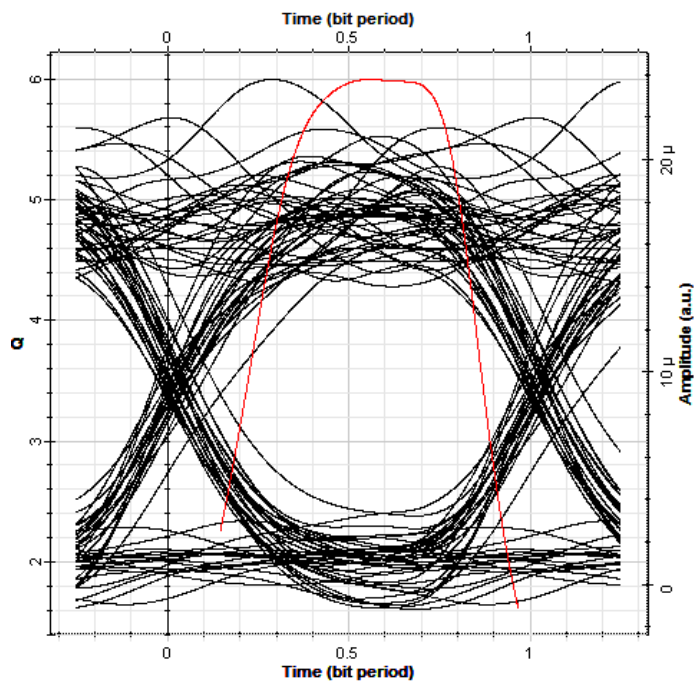
c)



Analysis	
Max. Q Factor	5.99771
Min. BER	1.00032e-009
Eye Height	7.63079e-006
Threshold	7.74376e-006
Decision Inst.	0.649762

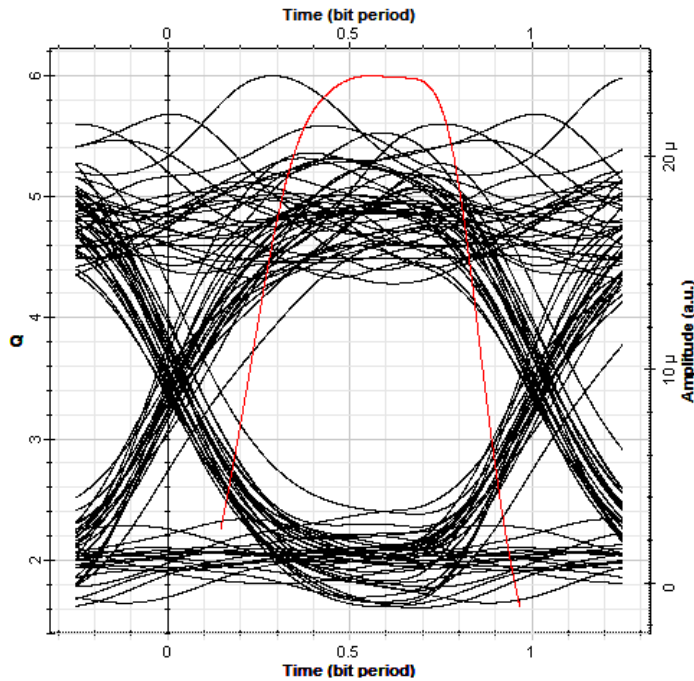
d)

Figure 4. 15 - Diagramme de l'œil, cas de la neige humide, détection DSO, sans pertes d'insertion,  $D_b = 622 Mbps$  : a) 2 mm/h, b) 4 mm/h, c) 6 mm/h, d) 8 mm/h.



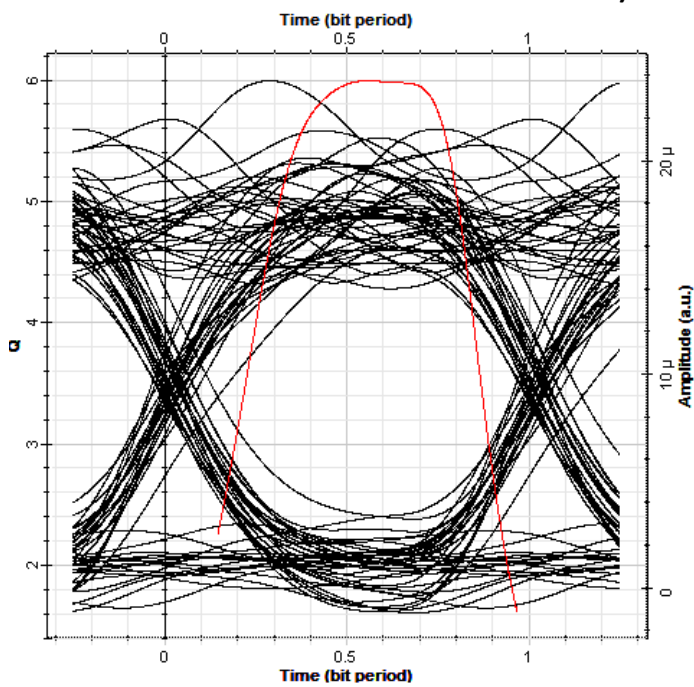
Analysis	
Max. Q Factor	5.99607
Min. BER	1.00466e-009
Eye Height	8.24063e-006
Threshold	7.56225e-006
Decision Inst.	0.555405

a)



Analysis	
Max. Q Factor	5.99649
Min. BER	1.00205e-009
Eye Height	8.24355e-006
Threshold	7.56413e-006
Decision Inst.	0.555405

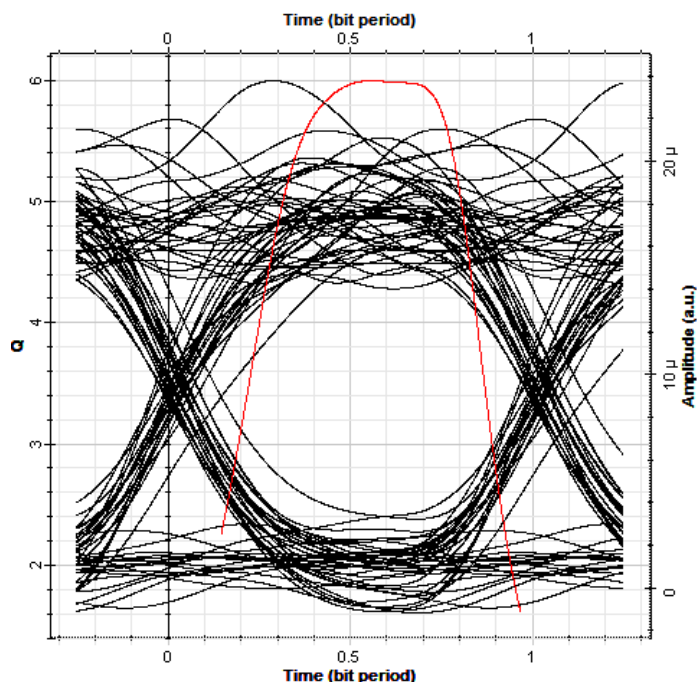
b)



Analysis	
Max. Q Factor	5.99528
Min. BER	1.00957e-009
Eye Height	8.23515e-006
Threshold	7.55871e-006
Decision Inst.	0.555405

c)

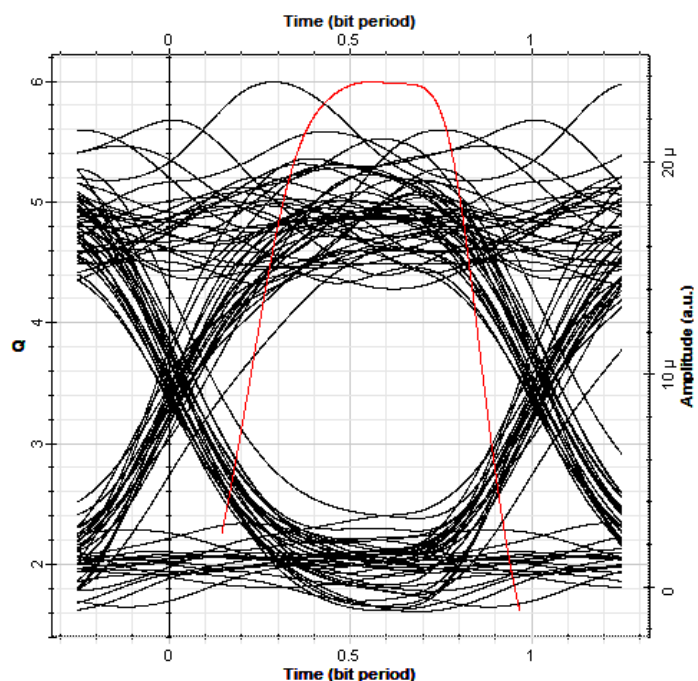




Analysis	
Max. Q Factor	5.99637
Min. BER	1.00284e-009
Eye Height	8.24266e-006
Threshold	7.56356e-006
Decision Inst.	0.555405

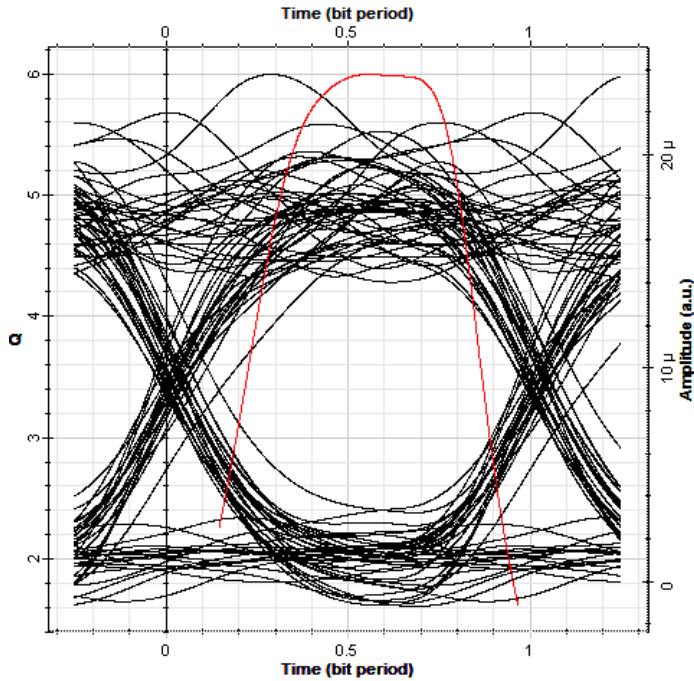
d)

Figure 4. 16 - Diagramme de l'œil, cas de la neige sèche, détection DSO, sans pertes d'insertion,  $D_b = 1 \text{ Gbps}$  : a) 2 mm/h, b) 4 mm/h, c) 6 mm/h, d) 8 mm/h.



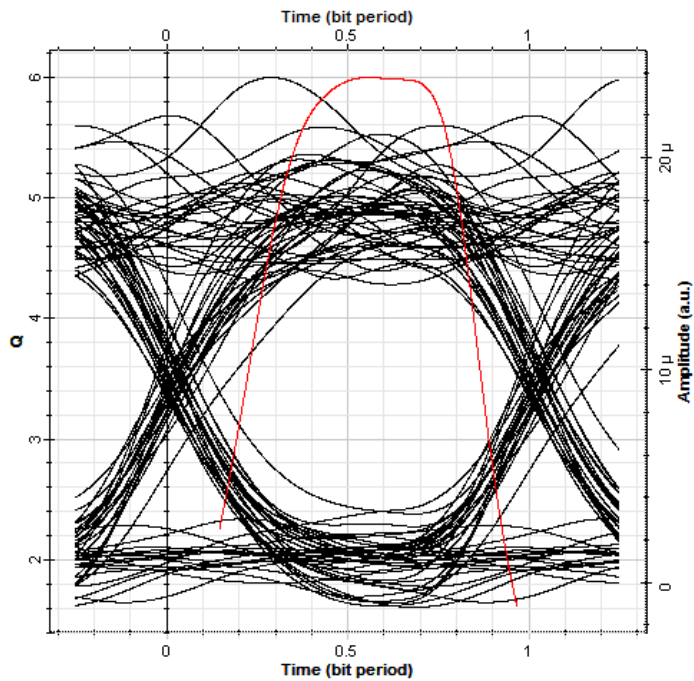
Analysis	
Max. Q Factor	5.99541
Min. BER	1.00879e-009
Eye Height	8.23602e-006
Threshold	7.55927e-006
Decision Inst.	0.555405

a)



b)

Analysis	
Max. Q Factor	5.99672
Min. BER	1.00064e-009
Eye Height	8.24513e-006
Threshold	7.56515e-006
Decision Inst.	0.555405



c)

Analysis	
Max. Q Factor	5.99643
Min. BER	1.00243e-009
Eye Height	8.24312e-006
Threshold	7.56385e-006
Decision Inst.	0.555405

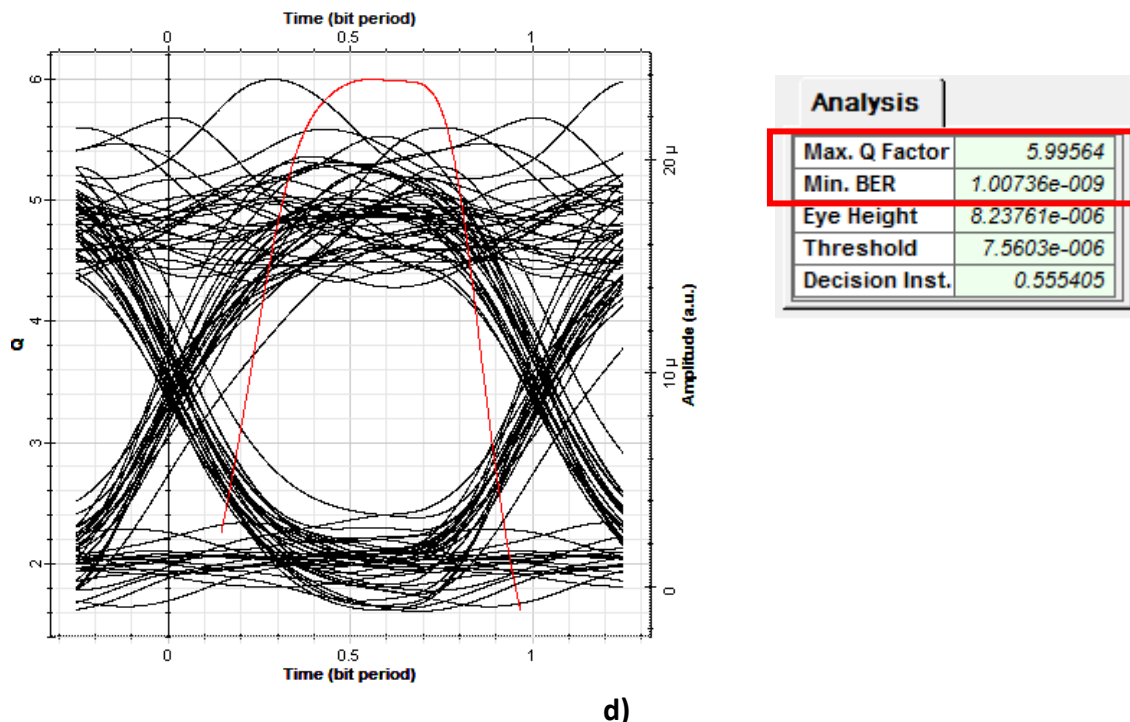


Figure 4. 17- Diagramme de l'œil, cas de la neige humide, détection DSO, sans pertes d'insertion,  $D_b = 1 \text{ Gbps}$  : a) 2 mm/h, b) 4 mm/h, c) 6 mm/h, d) 8 mm/h.

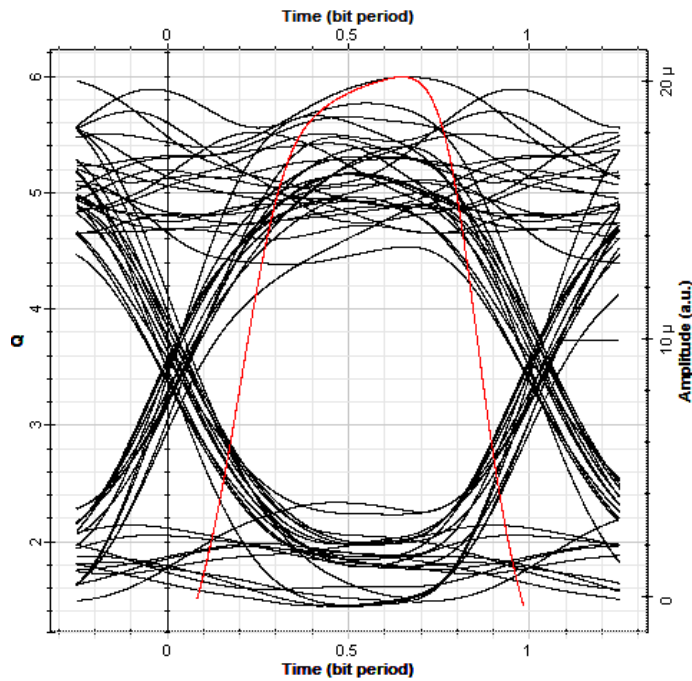
(d) Cas de la scintillation

Les résultats obtenus sont indiqués dans le tableau (4.6) et les figures (4.18) et (4.19).

$D_b = 622 \text{ Mbps}$					
Phénomènes météorologiques	$C_n^2$ ( $m^{-2/3}$ )	Atténuation (dB/km)	Portée maximale (m)	Min BER	Facteur Q
Forte turbulence	$10^{-13}$	0.2069	1819	$1 \times 10^{-9}$	5.99671
Turbulence modérée	$10^{-14}$	0.0654	1982	$1 \times 10^{-9}$	5.9975
Faible turbulence	$10^{-16}$	0.0065	2080	$1 \times 10^{-9}$	5.99719
$D_b = 1 \text{ Gbps}$					
Phénomènes météorologiques	$C_n^2$ ( $m^{-2/3}$ )	Atténuation (dB/km)	Portée maximale (m)	Min BER	Facteur Q
Forte turbulence	$10^{-13}$	0.2069	1799	$1 \times 10^{-9}$	5.99551
Turbulence modérée	$10^{-14}$	0.0654	1975	$1 \times 10^{-9}$	5.99542
Faible turbulence	$10^{-16}$	0.0065	2072	$1 \times 10^{-9}$	5.99494

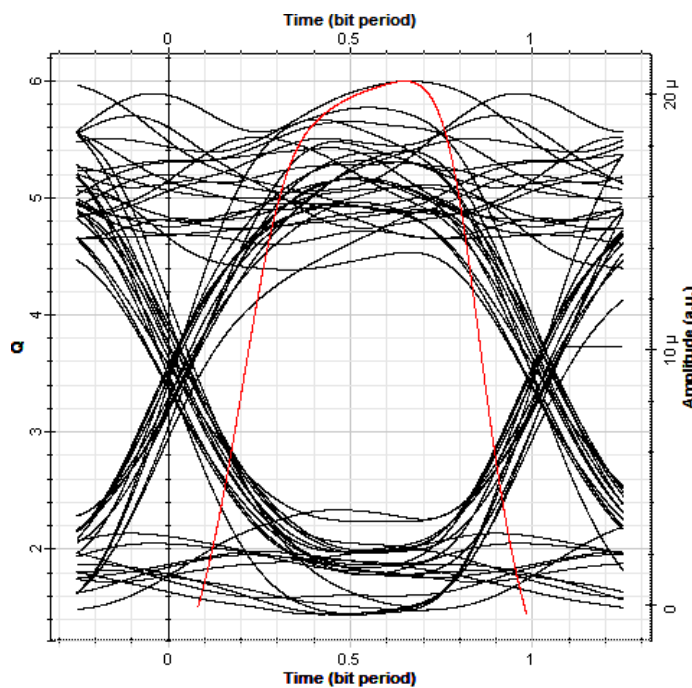
Tableau 4. 6 - Portée maximale, cas de la scintillation, détection DSO, sans pertes d'insertion.





a)

Analysis	
Max. Q Factor	5.99671
Min. BER	1.00643e-009
Eye Height	7.44232e-006
Threshold	7.53724e-006
Decision Inst.	0.648921



b)

Analysis	
Max. Q Factor	5.9975
Min. BER	1.00157e-009
Eye Height	7.57129e-006
Threshold	7.67831e-006
Decision Inst.	0.649762

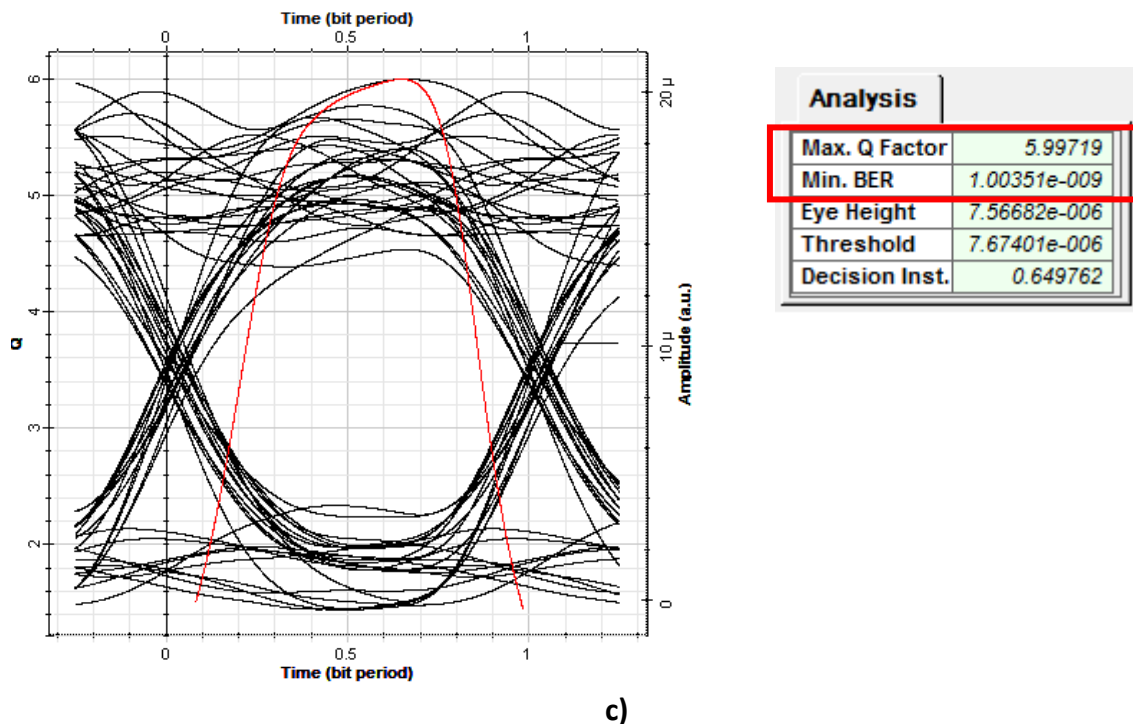
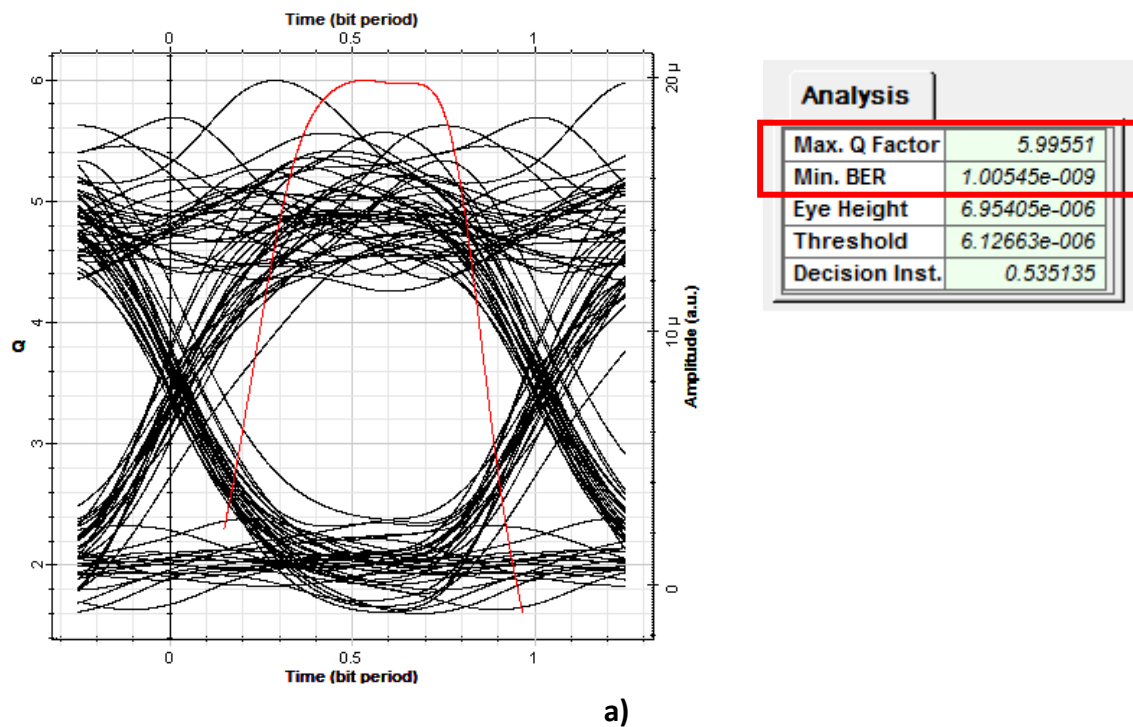
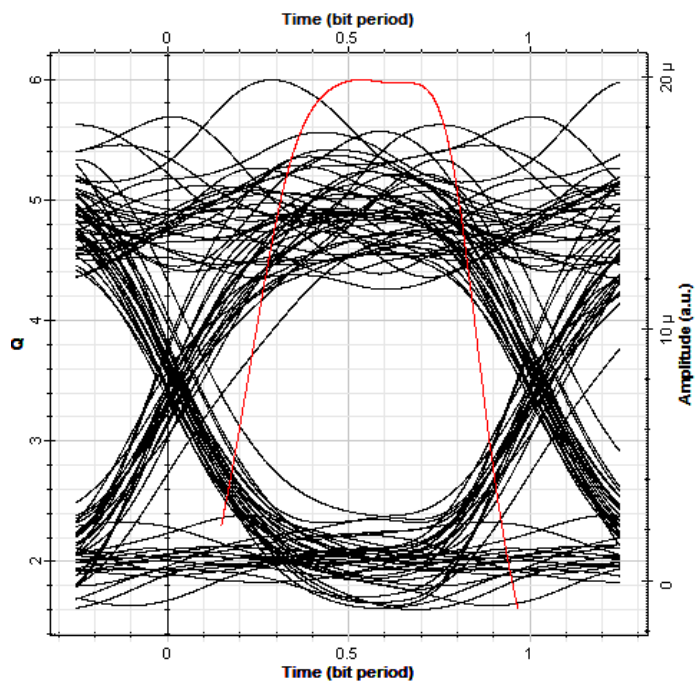


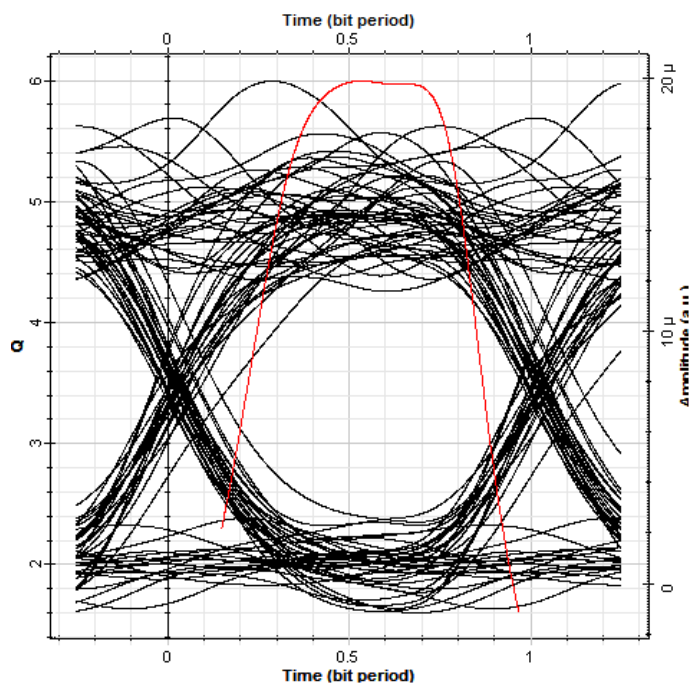
Figure 4.18 - Diagramme de l'œil, cas de la scintillation, détection DSO, sans pertes d'insertion,  $D_b = 622 Mbps$  : a) forte turbulence, b) turbulence modérée, c) faible turbulence.





Analysis	
Max. Q Factor	5.99542
Min. BER	1.00604e-009
Eye Height	6.95359e-006
Threshold	6.12638e-006
Decision Inst.	0.535135

b)



Analysis	
Max. Q Factor	5.99494
Min. BER	1.00902e-009
Eye Height	6.95127e-006
Threshold	6.12507e-006
Decision Inst.	0.535135

c)

Figure 4. 19 - Diagramme de l'œil, cas de la scintillation, détection DSO, sans pertes d'insertion,  $D_b = 1 \text{ Gbps}$  : a) forte turbulence, b) turbulence modérée, c) faible turbulence.

### 4.3.2.2 Détection DSO, avec pertes d'insertion

Les mêmes paramètres utilisés dans la configuration de détection DSO, sans pertes d'insertion, ont été considérés avec ajout de pertes d'insertion donnés dans le tableau (4.2). En ce qui suit les résultats obtenus dans le cas de brouillard sont présentées, le cas des autres phénomènes (pluie, neige et scintillation) sont donnés à l'annexe A.

#### (a) Cas du brouillard

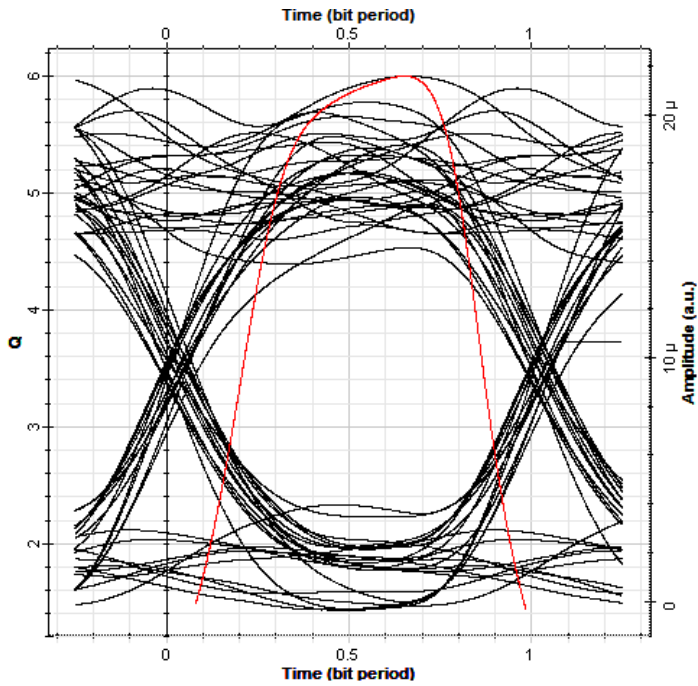
Les résultats obtenus sont indiqués dans le tableau (4.7) et les figures (4.20) et (4.21)

<i>D<sub>b</sub> = 622 Mbps</i>				
Phénomènes météorologiques	Atténuation (dB/km)	Portée maximale (m)	Min BER	Facteur <i>Q</i>
Brouillard dense	339.7920	52.65	$1 \times 10^{-9}$	5.99661
Brouillard modéré	33.9792	294.1	$1 \times 10^{-9}$	5.99557
Brume	2.6743	856.5	$1 \times 10^{-9}$	5.99575
Temps clair	0.2429	1107	$1 \times 10^{-9}$	5.99605
<i>D<sub>b</sub> = 1 Gbps</i>				
Phénomènes météorologiques	Atténuation (dB/km)	Portée maximale (m)	Min BER	Facteur <i>Q</i>
Brouillard dense	339.7920	50	$1 \times 10^{-9}$	5.99608
Brouillard modéré	33.9792	269.5	$1 \times 10^{-9}$	5.99654
Brume	2.6743	743.5	$1 \times 10^{-9}$	5.99645
Temps clair	0.2429	933	$1 \times 10^{-9}$	5.99682

**Tableau 4. 7** - Portée maximale, cas de brouillard, détection DSO, avec pertes d'insertion.

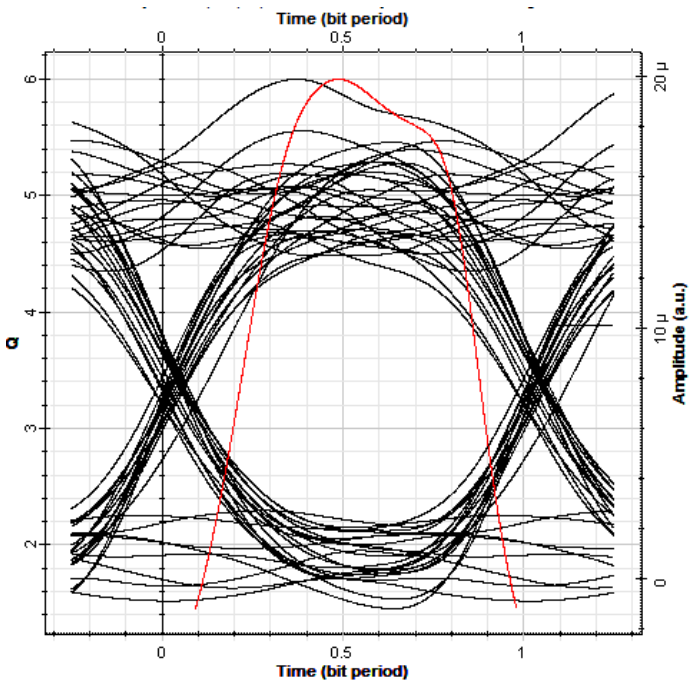
D'après le tableau (4.7), la différence constatée quant aux portées maximales est plus prononcée par rapport au cas sans pertes (tableau (4.3)). La différence remarquée est due à la méthode d'estimation utilisée par le logiciel Optisystem et à l'ajout des pertes d'insertion.

Ces résultats sont validés par le biais du diagramme de l'œil (voir figure (4.20) et (4.21)).



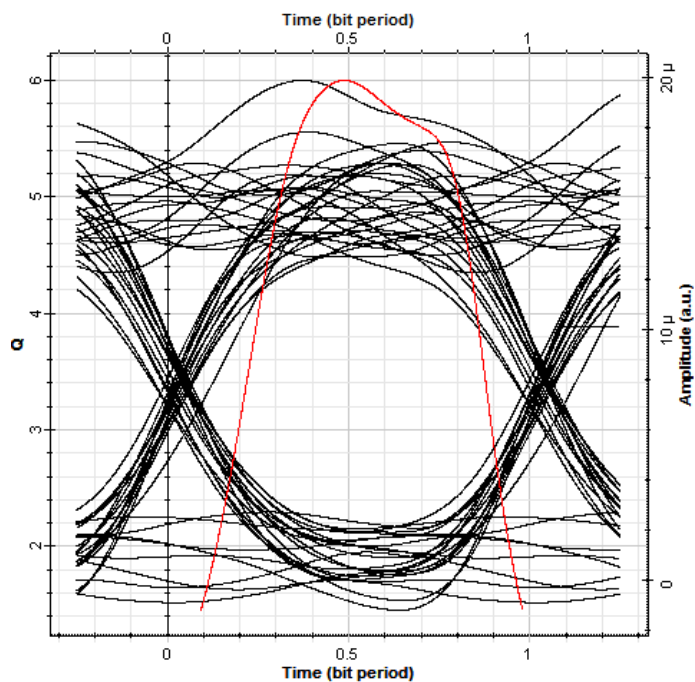
a)

Analysis	
Max. Q Factor	5.99661
Min. BER	1.00717e-009
Eye Height	7.96069e-006
Threshold	8.11005e-006
Decision Inst.	0.652284



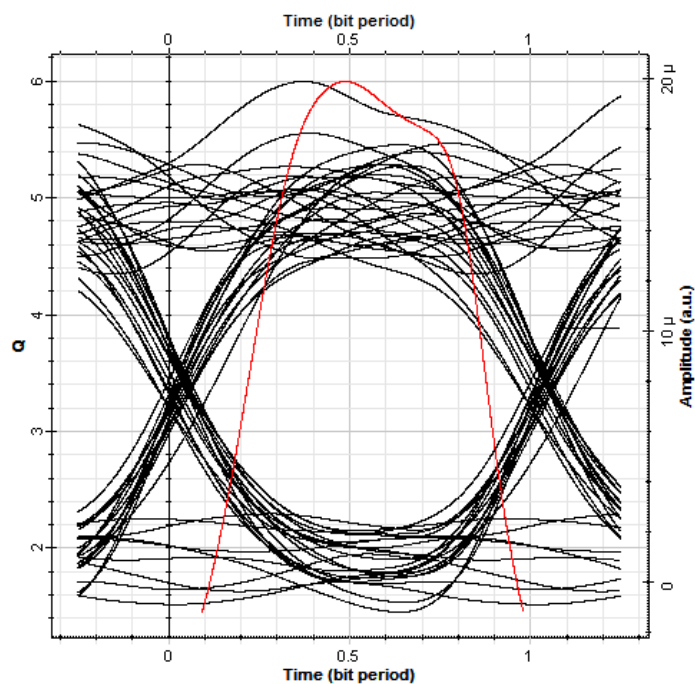
b)

Analysis	
Max. Q Factor	5.99557
Min. BER	1.00716e-009
Eye Height	7.0487e-006
Threshold	6.15578e-006
Decision Inst.	0.488372



Analysis	
Max. Q Factor	5.99575
Min. BER	1.00602e-009
Eye Height	7.05012e-006
Threshold	6.15679e-006
Decision Inst.	0.488372

c)

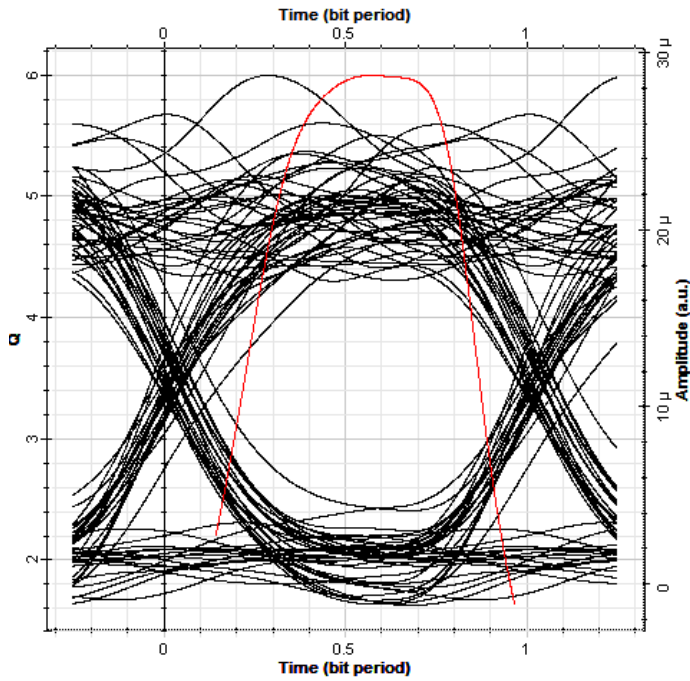


Analysis	
Max. Q Factor	5.99605
Min. BER	1.00415e-009
Eye Height	7.05245e-006
Threshold	6.15846e-006
Decision Inst.	0.488372

d)

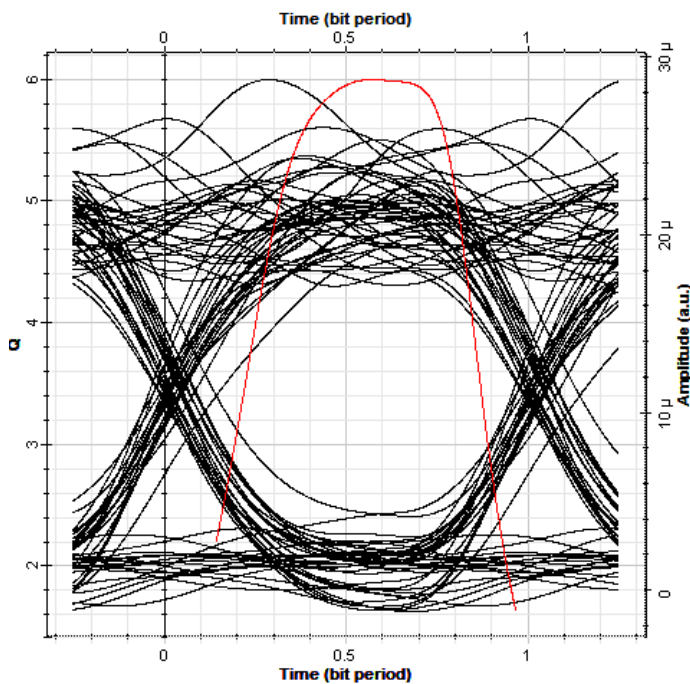
Figure 4. 20 - Diagramme de l'œil, cas de brouillard, détection DSO, avec pertes d'insertion,  $D_b = 622 Mbps$  : a) brouillard dense, b) brouillard modéré, c) brume, d) temps clair.





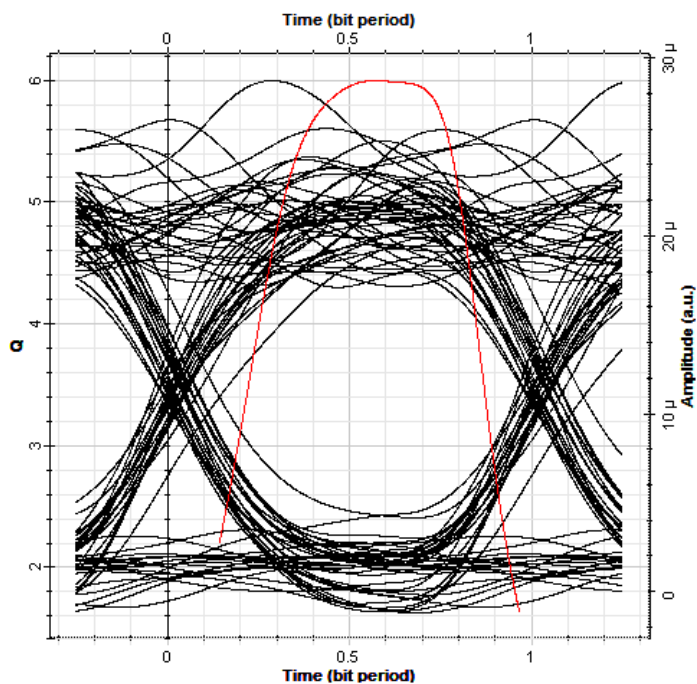
a)

Analysis	
Max. Q Factor	5.99608
Min. BER	1.00528e-009
Eye Height	9.91553e-006
Threshold	9.27769e-006
Decision Inst.	0.566216



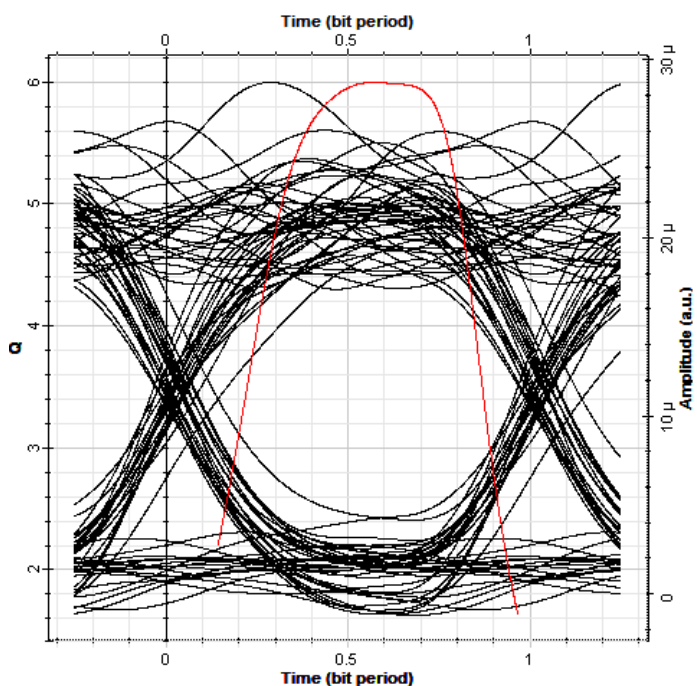
b)

Analysis	
Max. Q Factor	5.99654
Min. BER	1.00244e-009
Eye Height	9.92028e-006
Threshold	9.28106e-006
Decision Inst.	0.566216



c)

Analysis	
Max. Q Factor	5.99645
Min. BER	1.00303e-009
Eye Height	9.9193e-006
Threshold	9.28036e-006
Decision Inst.	0.566216



d)

Analysis	
Max. Q Factor	5.99682
Min. BER	1.00073e-009
Eye Height	9.92315e-006
Threshold	9.2831e-006
Decision Inst.	0.566216

Figure 4. 21 - Diagramme de l'œil, cas de brouillard, détection DSO, avec pertes d'insertion,  $D_b = 1 \text{ Gbps}$  : a) brouillard dense, b) brouillard modéré, c) brume d) temps clair.



### 4.3.2.3 Détection DTO, sans pertes d'insertion

Les mêmes paramètres utilisés dans la configuration de détection DSO, sans pertes d'insertion. Mais dans ce cas ont été considéré la détection DTO. En ce qui suit les résultats obtenus dans le cas de brouillard sont présentées.

#### (a) Cas du brouillard

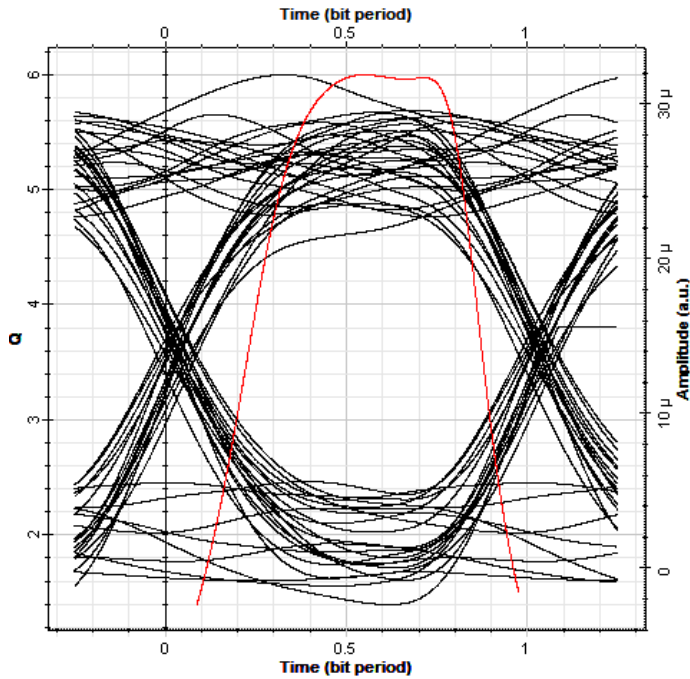
Les résultats obtenus sont indiqués dans le tableau (4.8) et les figures (4.22) et (4.23)

<i>D<sub>b</sub> = 622 Mbps</i>				
Phénomènes météorologiques	Atténuation (dB/km)	Portée maximale (m)	Min BER	Facteur Q
Brouillard dense	339.7920	71.87	$1 \times 10^{-9}$	5.99529
Brouillard modéré	33.9792	430.6	$1 \times 10^{-9}$	5.99476
Brume	2.6743	1631	$1 \times 10^{-9}$	5.9945
Temps clair	0.2429	2562	$1 \times 10^{-9}$	5.99485
<i>D<sub>b</sub> = 1 Gbps</i>				
Phénomènes météorologiques	Atténuation (dB/km)	Portée maximale (m)	Min BER	Facteur Q
Brouillard dense	339.7920	70.95	$1 \times 10^{-9}$	5.99649
Brouillard modéré	33.9792	423.5	$1 \times 10^{-9}$	5.9958
Brume	2.6743	1562.5	$1 \times 10^{-9}$	5.99524
Temps clair	0.2429	2413	$1 \times 10^{-9}$	5.9961

**Tableau 4. 8** - Portée maximale, cas de brouillard, détection DTO, sans pertes d'insertion.

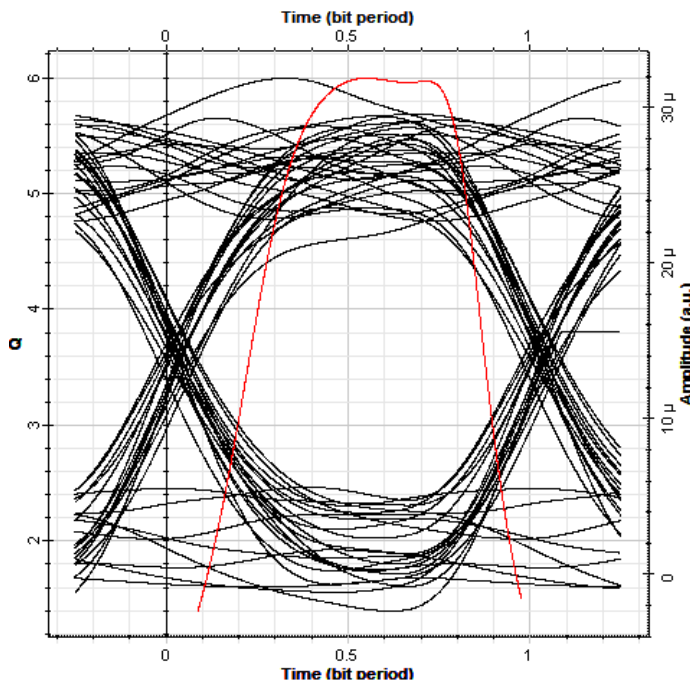
D'après le tableau (4.8), les portées maximales estimées sont quelque peu différentes à celles déterminées analytiquement (Tableau (3.10)). La différence minimale remarquée est due à la méthode d'estimation utilisée par le logiciel Optisystem. D'autre part, d'après le tableau (4.3), on constate que les valeurs des portées maximales obtenues sont supérieures comparativement à celles obtenues dans le cas d'une Détection DSO sans pertes d'insertion. Cette augmentation est due à l'augmentation de la puissance recueillie au niveau du récepteur (puissance relative au code spectral). Il à noter que cette augmentation est attribuable à l'augmentation de la complexité du récepteur.

Ces résultats sont validés par le biais du diagramme de l'œil (voir figure (4.22) et (4.23)).



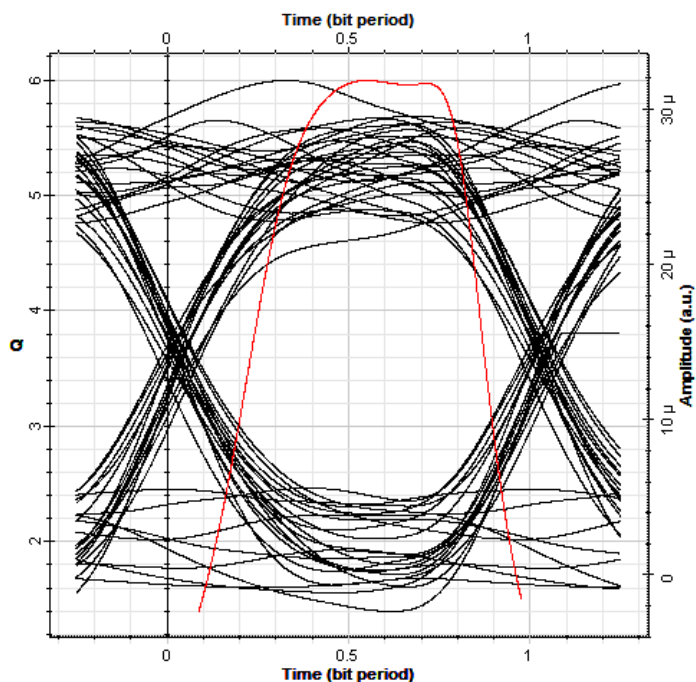
Analysis	
Max. Q Factor	5.99529
Min. BER	1.00281e-009
Eye Height	1.23202e-005
Threshold	1.41174e-005
Decision Inst.	0.554777

a)



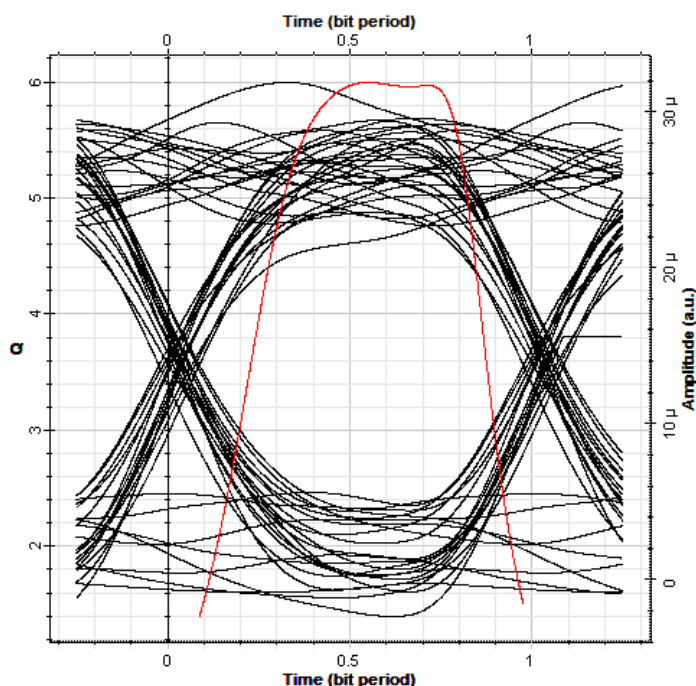
Analysis	
Max. Q Factor	5.99476
Min. BER	1.00611e-009
Eye Height	1.23135e-005
Threshold	1.41109e-005
Decision Inst.	0.554777

b)



Analysis	
Max. Q Factor	5.9945
Min. BER	1.00772e-009
Eye Height	1.23103e-005
Threshold	1.41078e-005
Decision Inst.	0.554777

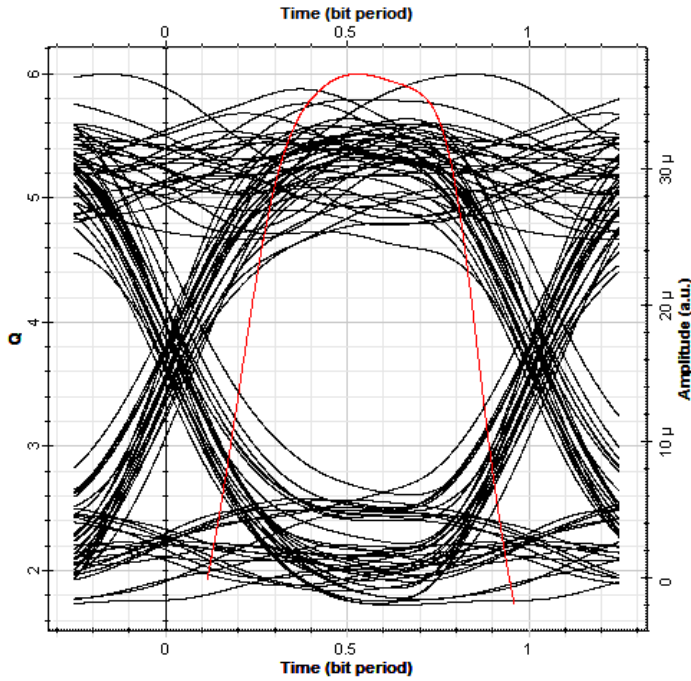
c)



Analysis	
Max. Q Factor	5.99485
Min. BER	1.00557e-009
Eye Height	1.23146e-005
Threshold	1.4112e-005
Decision Inst.	0.554777

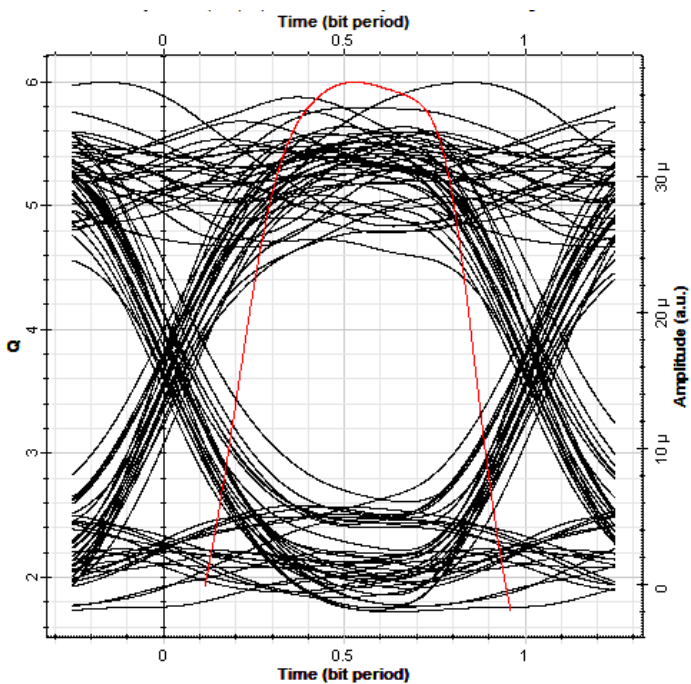
d)

Figure 4. 22 - Diagramme de l'œil, cas de brouillard, détection DTO, sans pertes d'insertion,  $D_b = 622 Mbps$  : a) brouillard dense, b) brouillard modéré, c) brume, d) temps clair.



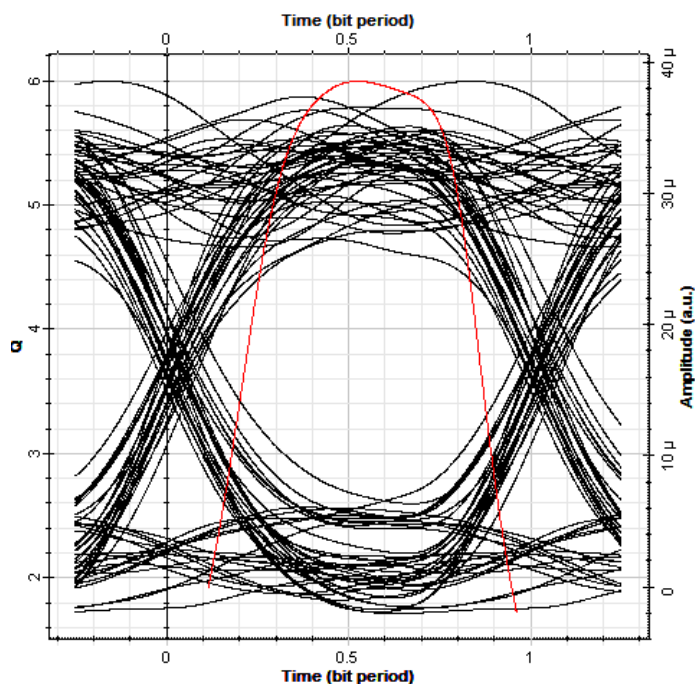
a)

Analysis	
Max. Q Factor	5.99649
Min. BER	1.00154e-009
Eye Height	1.43666e-005
Threshold	1.63903e-005
Decision Inst.	0.527027



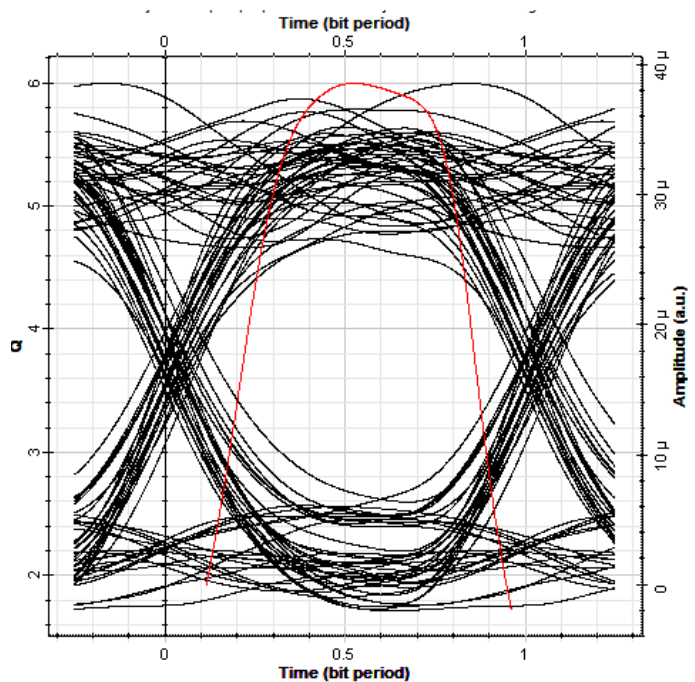
b)

Analysis	
Max. Q Factor	5.9958
Min. BER	1.00584e-009
Eye Height	1.43553e-005
Threshold	1.63796e-005
Decision Inst.	0.527027



Analysis	
Max. Q Factor	5.99524
Min. BER	1.00937e-009
Eye Height	1.49767e-005
Threshold	1.70971e-005
Decision Inst.	0.526351

c)



Analysis	
Max. Q Factor	5.9961
Min. BER	1.00404e-009
Eye Height	1.49922e-005
Threshold	1.7112e-005
Decision Inst.	0.526351

d)

Figure 4. 23 - Diagramme de l'œil, cas de brouillard, détection DTO, sans pertes d'insertion,  $D_b = 1 \text{ Gbps}$  : a) brouillard dense, b) brouillard modéré, c) brume, d) temps clair.

#### 4.3.2.4 Détection DTO avec des pertes d'insertion

Les mêmes paramètres utilisés dans la configuration de détection DTO, sans pertes d'insertion, ont été considérés avec ajout de pertes d'insertion donnés dans le tableau (4.2).

##### (a) Cas du brouillard

Les résultats obtenus sont indiqués dans le tableau (4.9) et les figures (4.24) et (4.25)

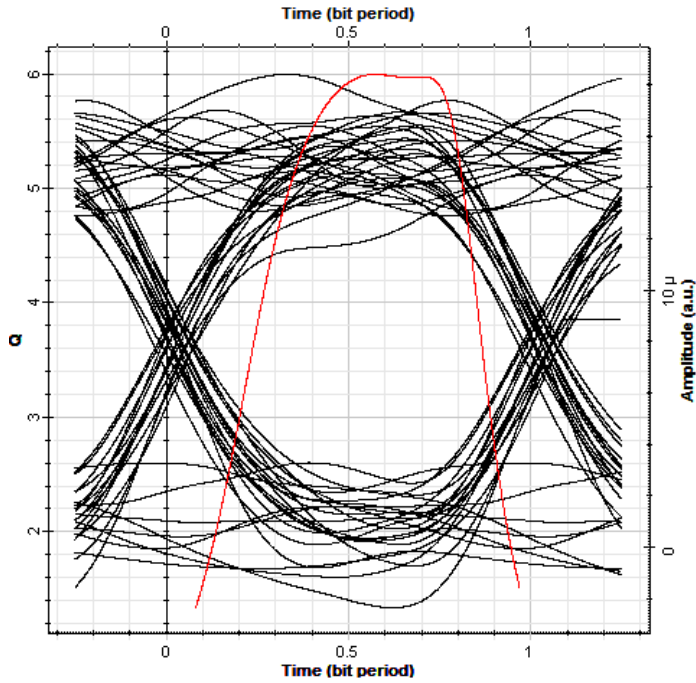
<b><math>D_b = 622 Mbps</math></b>				
<b>Phénomènes météorologiques</b>	<b>Atténuation (dB/km)</b>	<b>Portée maximale (m)</b>	<b>Min BER</b>	<b>Facteur <math>Q</math></b>
Brouillard dense	339.7920	64.295	$1 \times 10^{-9}$	5.9947
Brouillard modéré	33.9792	372.75	$1 \times 10^{-9}$	5.99552
Brume	2.6743	1273	$1 \times 10^{-9}$	5.99598
Temps clair	0.2429	1830.5	$1 \times 10^{-9}$	5.8858
<b><math>D_b = 1 Gbps</math></b>				
<b>Phénomènes météorologiques</b>	<b>Atténuation (dB/km)</b>	<b>Portée maximale (m)</b>	<b>Min BER</b>	<b>Facteur <math>Q</math></b>
Brouillard dense	339.7920	62.88	$1 \times 10^{-9}$	5.99635
Brouillard modéré	33.9792	362.2	$1 \times 10^{-9}$	5.99601
Brume	2.6743	1212.3	$1 \times 10^{-9}$	5.99701
Temps clair	0.2429	1717	$1 \times 10^{-9}$	5.99576

**Tableau 4.9** - Portée maximale, cas de brouillard, détection DTO, avec pertes d'insertion.

D'après le tableau (4.9), la différence constatée quant aux portées maximales est plus prononcée par rapport au cas sans pertes (tableau (4.8)). La différence remarquée est due à la méthode d'estimation utilisée par le logiciel Optisystem et à l'ajout des pertes d'insertion.

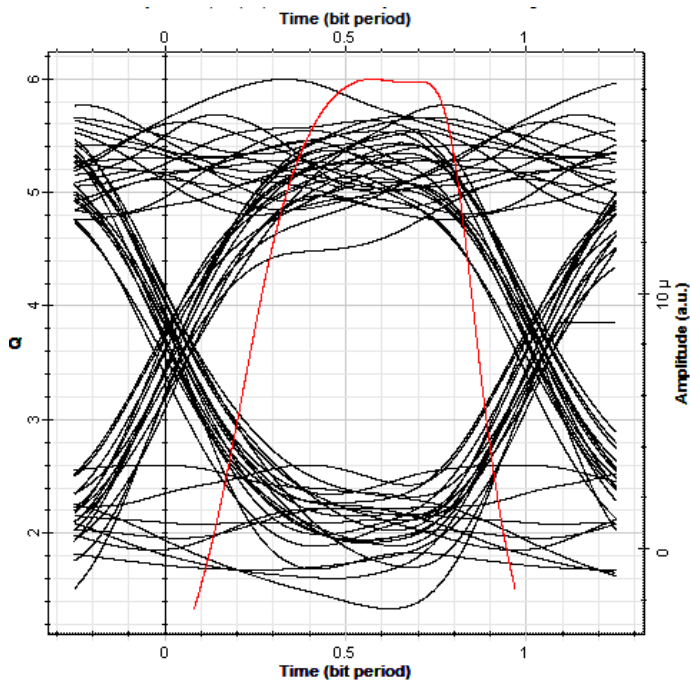
Ces résultats sont validés par le biais du diagramme de l'œil (voir figure (4.24) et (4.25)).





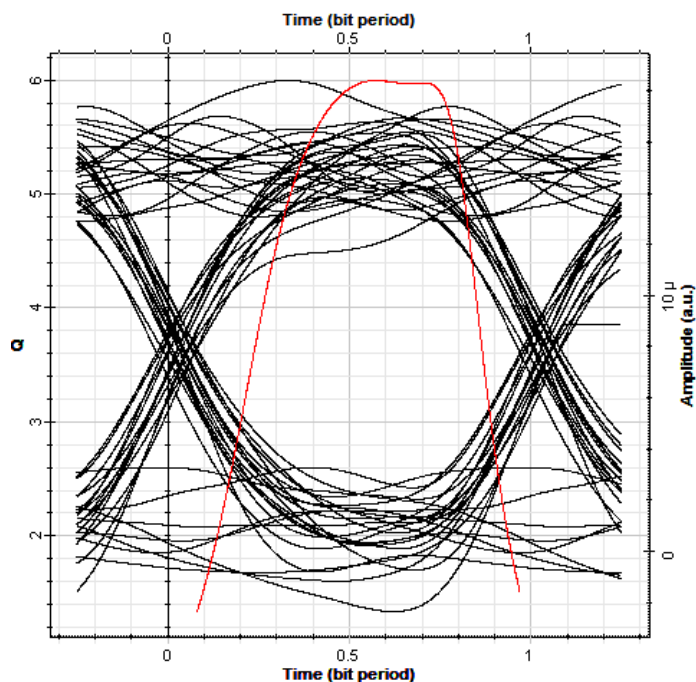
a)

Analysis	
Max. Q Factor	5.9947
Min. BER	1.00857e-009
Eye Height	7.09542e-006
Threshold	7.83797e-006
Decision Inst.	0.569908



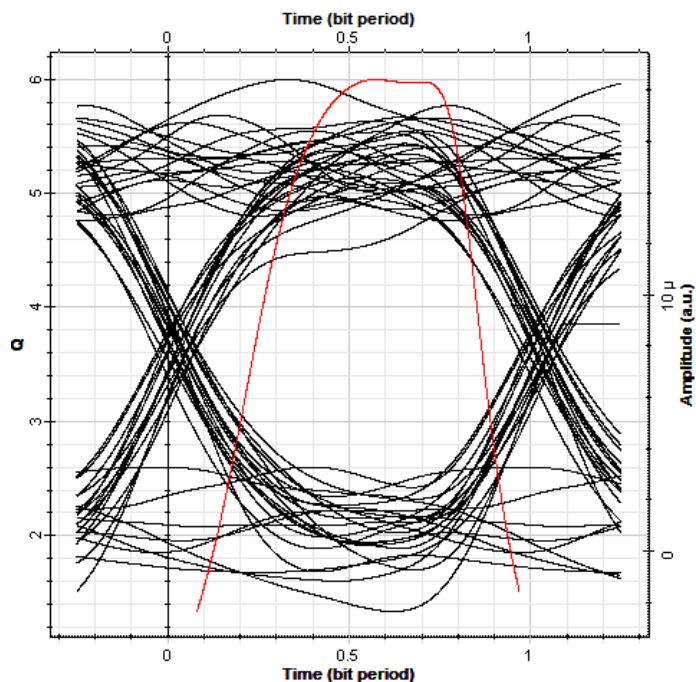
b)

Analysis	
Max. Q Factor	5.99552
Min. BER	1.0035e-009
Eye Height	7.09813e-006
Threshold	7.83986e-006
Decision Inst.	0.569908



c)

Analysis	
Max. Q Factor	5.99598
Min. BER	1.00067e-009
Eye Height	7.09965e-006
Threshold	7.84092e-006
Decision Inst.	0.569908

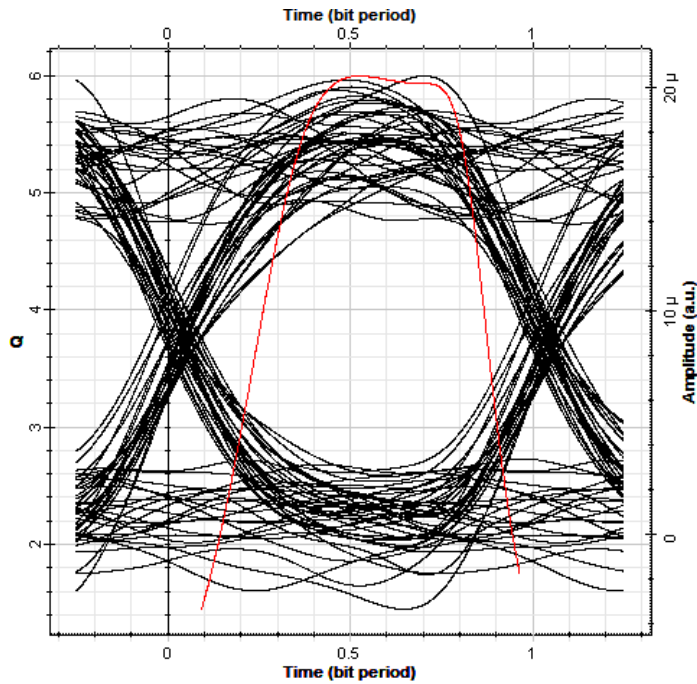


d)

Analysis	
Max. Q Factor	5.9958
Min. BER	1.00178e-009
Eye Height	7.09905e-006
Threshold	7.8405e-006
Decision Inst.	0.569908

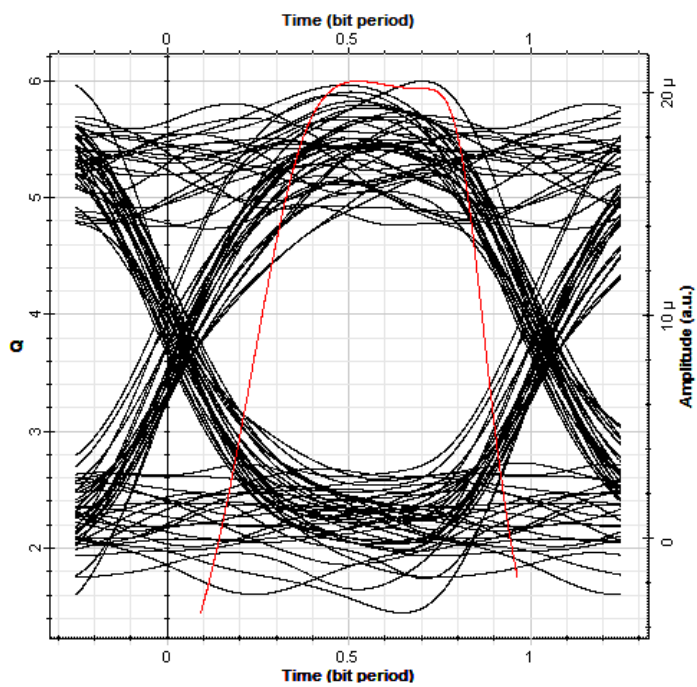
Figure 4. 24 - Diagramme de l'œil, cas de brouillard, détection DTO, avec pertes d'insertion,  $D_b = 622 Mbps$  : a) brouillard dense, b) brouillard modéré, c) brume, d) temps clair.





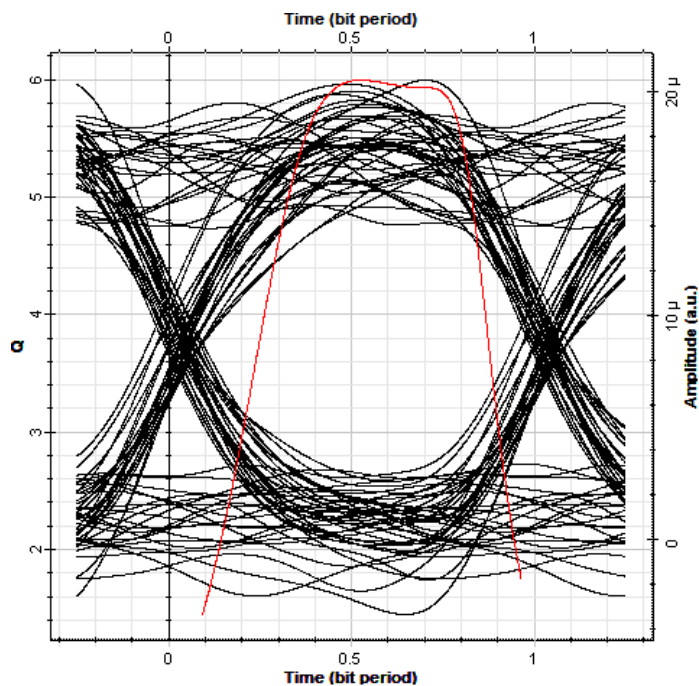
a)

Analysis	
Max. Q Factor	5.99635
Min. BER	1.00484e-009
Eye Height	8.30545e-006
Threshold	8.49348e-006
Decision Inst.	0.523649



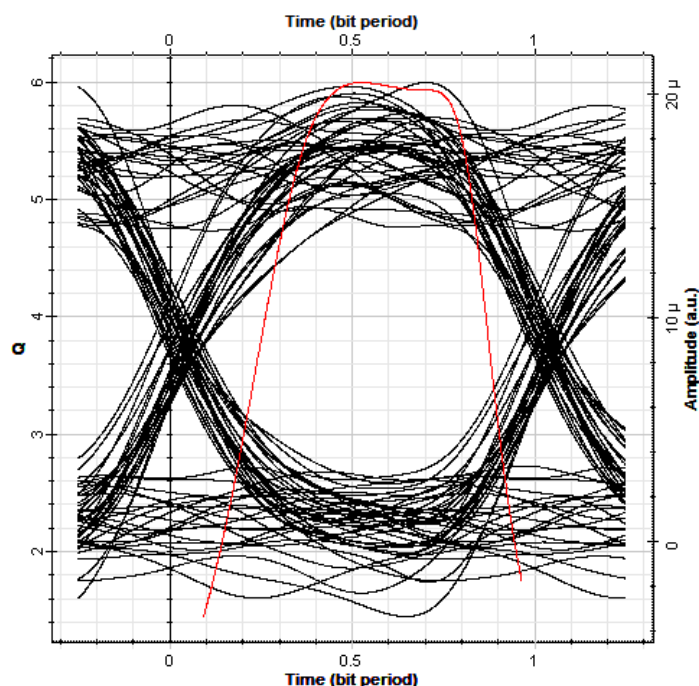
b)

Analysis	
Max. Q Factor	5.99601
Min. BER	1.00692e-009
Eye Height	8.30423e-006
Threshold	8.4927e-006
Decision Inst.	0.523649



Analysis	
Max. Q Factor	5.99701
Min. BER	1.00079e-009
Eye Height	8.30783e-006
Threshold	8.49499e-006
Decision Inst.	0.523649

c)



Analysis	
Max. Q Factor	5.99576
Min. BER	1.00849e-009
Eye Height	8.30332e-006
Threshold	8.49212e-006
Decision Inst.	0.523649

d)

Figure 4. 25 - Diagramme de l'œil, cas de brouillard, détection DTO, avec pertes d'insertion,  $D_b = 1 \text{ Gbps}$  : a) brouillard dense, b) brouillard modéré, c) brume, d) temps clair.

#### 4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, des études par simulation ont été menés afin de valider l'efficacité de l'approche proposée dans le chapitre précédent. Dans la première partie, nous avons considéré le système FSO-SAC-OCDMA sans pertes d'insertion afin de comparer les résultats obtenus analytiquement. Dans la deuxième partie, nous avons appliqué les pertes d'insertion (cas d'un contexte réel) l'analyse des résultats obtenus montre le bien fondé des approches proposées.

## Conclusion générale et perspectives

Les travaux de la thèse ont pour objectif de déterminer la portée maximale du système FSO-SAC-OCDMA sous les différentes conditions météorologiques.

Dans un premier chapitre, nous nous sommes intéressés à la présentation de la technologie FSO, principe de fonctionnement une liaison FSO et les différents modèles d'atténuations du signal transmis.

Dans le second chapitre, la technique d'accès multiple par répartition des codes OCDMA utilisant le codage d'amplitude spectral, les différentes technologies de codage et la technique de détection directe ont été présentés. Les différents bruits ainsi que la méthode de construction des codes ZCC utilisés en SAC-OCDMA ont été décrit.

L'étude du système FSO-SAC-OCDMA sous l'effet des phénomènes météorologiques est mise en avant dans le troisième chapitre. L'expression du SNR théorique a été établie en fonction des différents paramètres du système tel que le paramètre d'atténuation spécifique affectant le signal transmis dans l'atmosphère. L'estimation de la portée maximale à partir de d'un BER acceptable a été faite. Un programme Matlab a été élaboré à cet effet.

Au cours du quatrième chapitre, une modélisation et une évaluation des performances du système FSO-SAC-OCDMA ont été réalisées sous l'effet des différents phénomènes météorologiques (le brouillard, la pluie, la neige et la scintillation) à l'aide du logiciel Optisystem. Afin d'effectuer une simulation dans un contexte réel, les pertes d'insertion des composants ont été considérées. Les résultats obtenus, en termes de BER, facteur Q et de diagramme de l'œil, sont confrontés à ceux déterminés par l'approche analytique.

Les aboutissements de cette thèse ouvrent la voie dans le domaine des télécommunications optiques sans fil. Plusieurs perspectives peuvent être envisagées, nous suggérons à titre d'exemple pour les futurs travaux d'utiliser la technologie FSO dans le système SCM SAC-OCDMA (SCM : SubCarrier Multiplexing en anglais).

Les travaux présentés dans cette thèse ont donné lieu à la publication et communication suivantes :

- L. Mesri and A. Djebbari, "Performance Limits of FSO Based SAC-OCDMA System Under Weather Conditions", J. Opt. Commun. 2018. Article- DOI: 10.1515/joc-2018-0204
- L. Mesri, A. Djebbari, "SAC-OCDMA in free space optics under rain effect", deuxièmes journées doctorales de génie électrique Décembre 2018, université Djillali Liabes Sidi Bel Abbes



## Annexe A : Détection DSO, cas des pertes d'insertion

On utilise les mêmes paramètres déjà utilisés dans la configuration de détection DSO, avec pertes d'insertion (chapitre 4). En ce qui suit les résultats obtenus dans le cas de la pluie (tableau (A.1)), la neige (tableau (A.2)) et la scintillation (tableau (A.3)).

### A.1 Cas de la pluie

<i>D<sub>b</sub> = 622 Mbps</i>					
Phénomènes météorologiques	Précipitation (mm/h)	Atténuation (dB/km)	Portée maximale (m)	Min BER	Facteur Q
Pluie d'orage	100	23.5403	364.1	$1 \times 10^{-9}$	5.996
Forte pluie	25	9.2989	573.7	$1 \times 10^{-9}$	5.99578
Pluie légère	2.5	1.9881	1009	$1 \times 10^{-9}$	5.99565
Bruine pluie	0.25	0.4250	1168	$1 \times 10^{-9}$	5.99719
<i>D<sub>b</sub> = 1 Gbps</i>					
Phénomènes météorologiques	Précipitation (mm/h)	Atténuation (dB/km)	Portée maximale (m)	Min BER	Facteur Q
Pluie d'orage	100	23.5403	331.7	$1 \times 10^{-9}$	5.99594
Forte pluie	25	9.2989	512.6	$1 \times 10^{-9}$	5.99642
Pluie légère	2.5	1.9881	827.6	$1 \times 10^{-9}$	5.9966
Bruine pluie	0.25	0.4250	969.5	$1 \times 10^{-9}$	5.99562

**Tableau A. 1** - Portée maximale, cas de la pluie, une détection DSO et avec pertes d'insertion.

## A.2 Cas de la neige

<i>D<sub>b</sub> = 622 Mbps</i>					
Phénomènes météorologiques	Précipitation (mm/h)	Atténuation (dB/km)	Portée maximale (m)	Min BER	Facteur <i>Q</i>
Neige sèche	2	14.2887	495	$1 \times 10^{-9}$	5.99664
	4	37.1891	295	$1 \times 10^{-9}$	5.99613
	6	65.0760	200	$1 \times 10^{-9}$	5.99732
	8	96.7913	150.6	$1 \times 10^{-9}$	5.99747
Neige humide	2	6.2263	708	$1 \times 10^{-9}$	5.99746
	4	10.2559	593.2	$1 \times 10^{-9}$	5.99657
	6	13.7329	504.8	$1 \times 10^{-9}$	5.99648
	8	16.8934	454.5	$1 \times 10^{-9}$	5.99751
<i>D<sub>b</sub> = 1 Gbps</i>					
Phénomènes météorologiques	Précipitation (mm/h)	Atténuation (dB/km)	Portée maximale (m)	Min BER	Facteur <i>Q</i>
Neige sèche	2	14.2887	422	$1 \times 10^{-9}$	5.99564
	4	37.1891	263.25	$1 \times 10^{-9}$	5.9961
	6	65.0760	183.5	$1 \times 10^{-9}$	5.99662
	8	96.7913	138.8	$1 \times 10^{-9}$	5.99573
Neige humide	2	6.2263	619.4	$1 \times 10^{-9}$	5.99552
	4	10.2559	512.4	$1 \times 10^{-9}$	5.99557
	6	13.7329	450.3	$1 \times 10^{-9}$	5.99554
	8	16.8934	407.6	$1 \times 10^{-9}$	5.99546

Tableau A. 2 - Portée maximale, cas de la neige, détection DSO et avec pertes d'insertion.

## A.3 Cas de la scintillation

<i>D<sub>b</sub> = 1 Gbps</i>					
Phénomènes météorologiques	$C_n^2$ ( $m^{-2/3}$ )	Atténuation (dB/km)	Portée maximale (m)	Min BER	Facteur <i>Q</i>
Forte turbulence	$10^{-12}$	0.6554	1132	$1 \times 10^{-9}$	5.99774
Turbulence modérée	$10^{-13}$	0.2073	1255.6	$1 \times 10^{-9}$	5.99608
Faible turbulence	$10^{-16}$	0.0066	1295.5	$1 \times 10^{-9}$	5.99603
<i>D<sub>b</sub> = 622 Mbps</i>					
Phénomènes météorologiques	$C_n^2$ ( $m^{-2/3}$ )	Atténuation (dB/km)	Portée maximale (m)	Min BER	Facteur <i>Q</i>
Forte turbulence	$10^{-12}$	0.6554	944	$1 \times 10^{-9}$	5.99656
Turbulence modérée	$10^{-13}$	0.2073	995	$1 \times 10^{-9}$	5.99598
Faible turbulence	$10^{-16}$	0.0066	1020.5	$1 \times 10^{-9}$	5.99584

**Tableau A. 3** - Portée maximale, cas de la scintillation, détection DSO et avec pertes d'insertion.

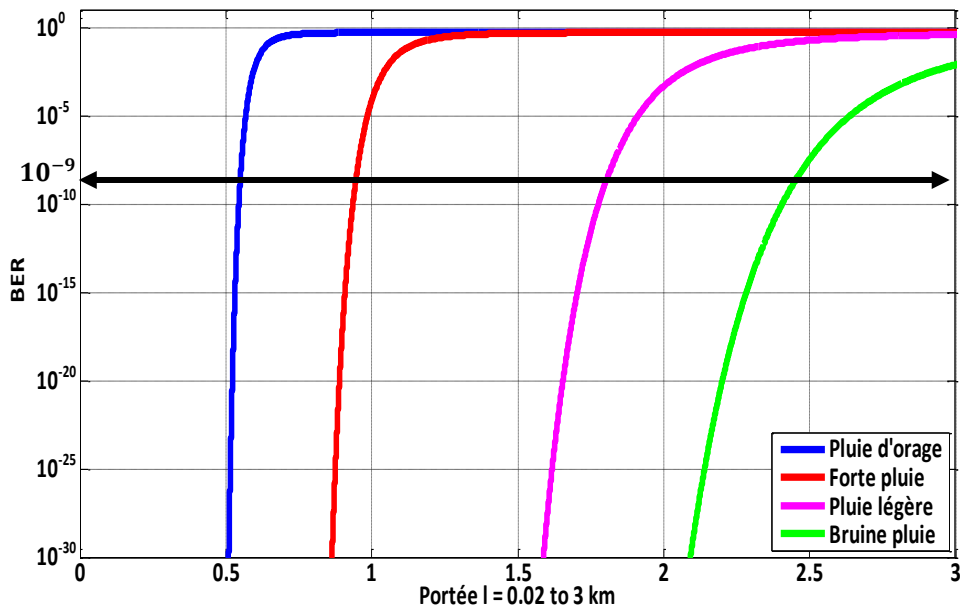


## Annexe B : Détection DTO, cas sans pertes d'insertion

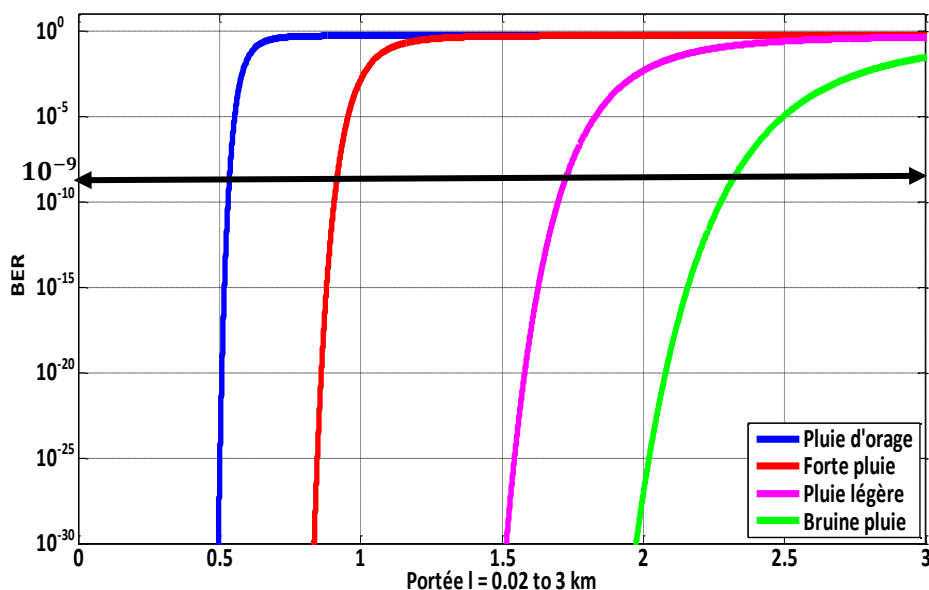
### B.1 Evaluation analytique des performances du système FSO-SAC-OCDMA sous Matlab

Les performances du système FSO-SAC-OCDMA pour une Détection DTO en termes de BER dans le cas de la pluie, la neige et la scintillation sont présentées dans les tableaux et les figures suivants. Les mêmes spécifications en termes de BER, puissance et débit binaire utilisés dans le cas de la détection DTO (chapitre 3) sont considérés.

(a) Cas de la pluie



a)



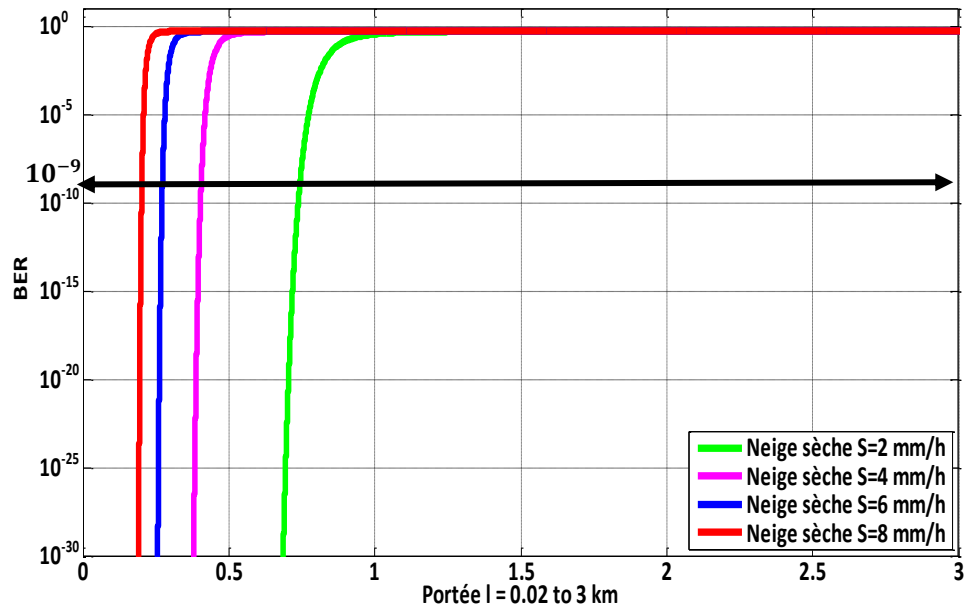
b)

Figure B. 1 - BER en fonction de la portée, cas de la pluie, détection DTO : a)  $D_b = 622 \text{ Mbps}$ , b)  $D_b = 1 \text{ Gbps}$ .

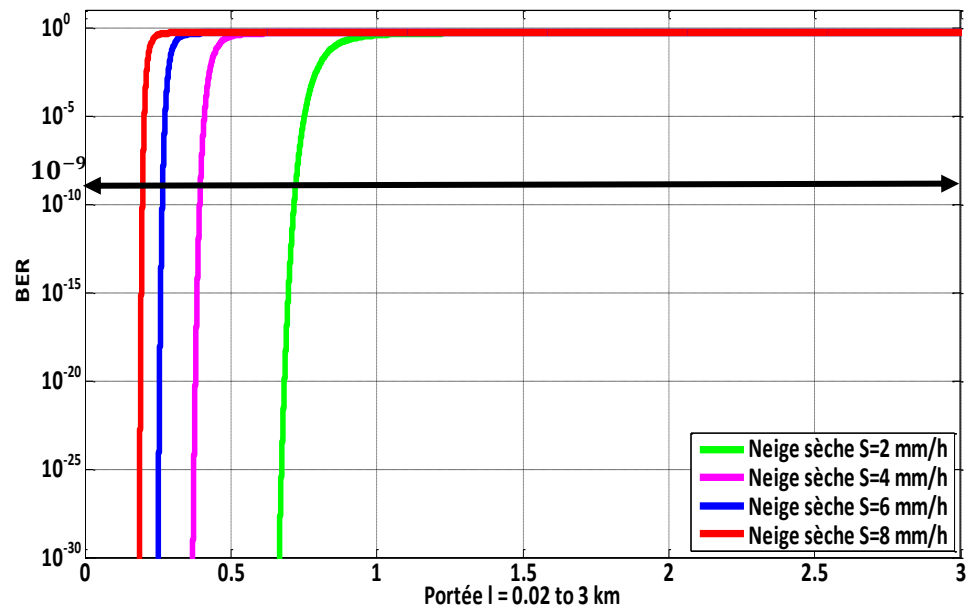
$D_b = 622 \text{ Mbps}$				
Phénomènes météorologiques	Précipitation $R \text{ (mm/h)}$	Atténuation $\text{(dB/km)}$	Portée maximale $\text{(m)}$	BER
Pluie d'orage	100	23.5403	548	$1 \times 10^{-9}$
Forte pluie	25	9.2989	942.9	$1 \times 10^{-9}$
Pluie légère	2.5	1.9881	1797	$1 \times 10^{-9}$
Bruine pluie	0.25	0.4250	2440	$1 \times 10^{-9}$
$D_b = 1 \text{ Gbps}$				
Phénomènes météorologiques	Précipitation $R \text{ (mm/h)}$	Atténuation $\text{(dB/km)}$	Portée maximale $\text{(m)}$	BER
Pluie d'orage	100	23.5403	534	$1 \times 10^{-9}$
Forte pluie	25	9.2989	913.5	$1 \times 10^{-9}$
Pluie légère	2.5	1.9881	1718	$1 \times 10^{-9}$
Bruine pluie	0.25	0.4250	2307	$1 \times 10^{-9}$

Tableau B. 1 - Portées maximales, cas de la pluie, détection DTO.

## (b) Cas de la neige

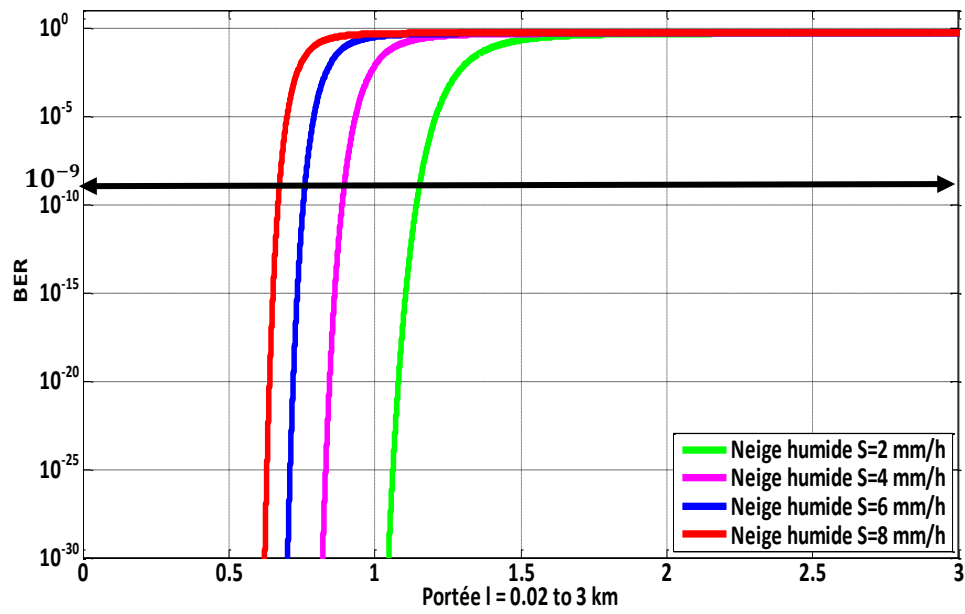


a)

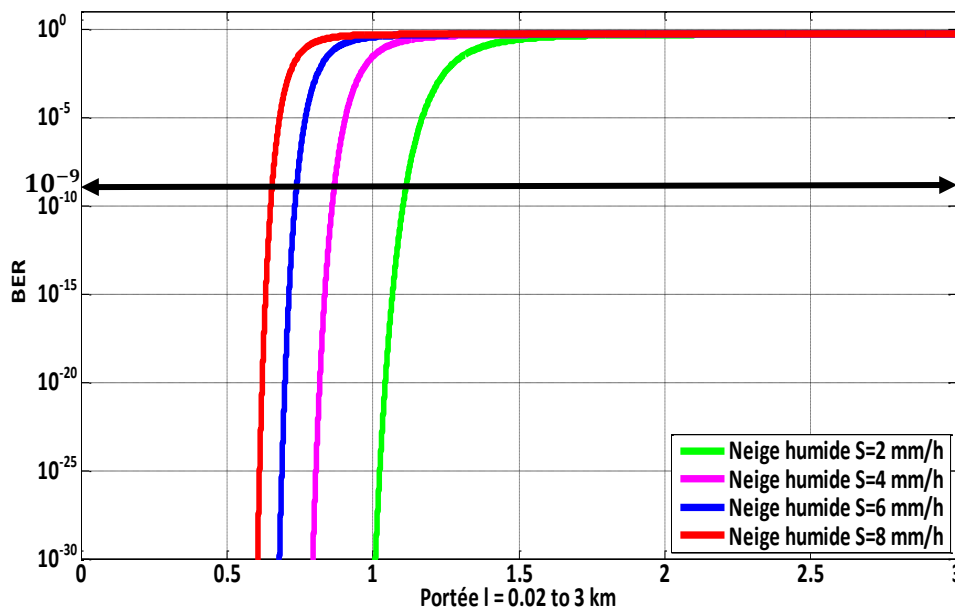


b)

Figure B. 2 - BER en fonction de la portée, cas de la neige sèche, détection DTO : a)  $D_b = 622$  Mbps, b)  $D_b = 1$  Gbps.



a)



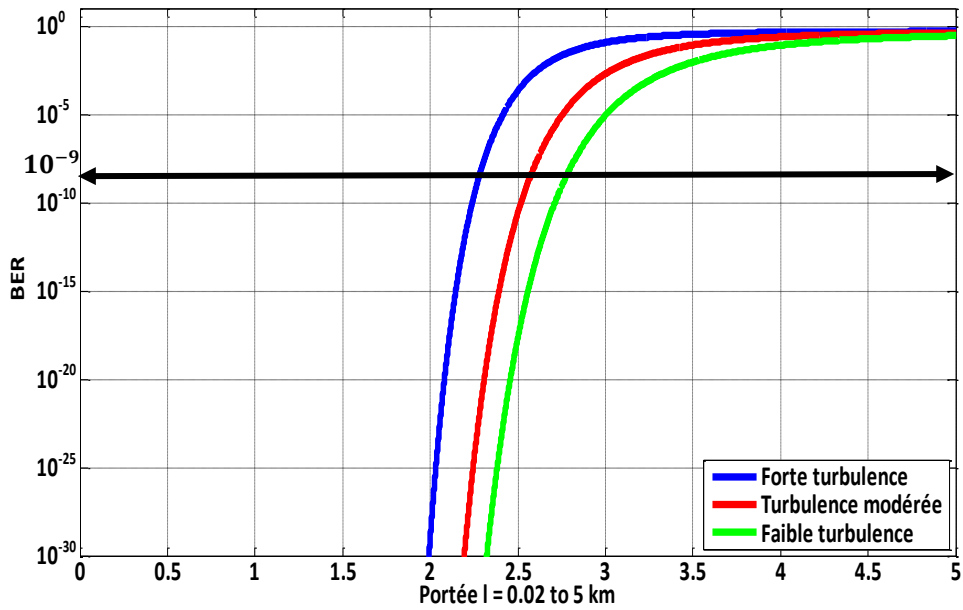
b)

**Figure B. 3** - BER en fonction de la portée, cas de la neige humide, détection DTO : a)  $D_b = 622$  Mbps, b)  $D_b = 1$  Gbps.

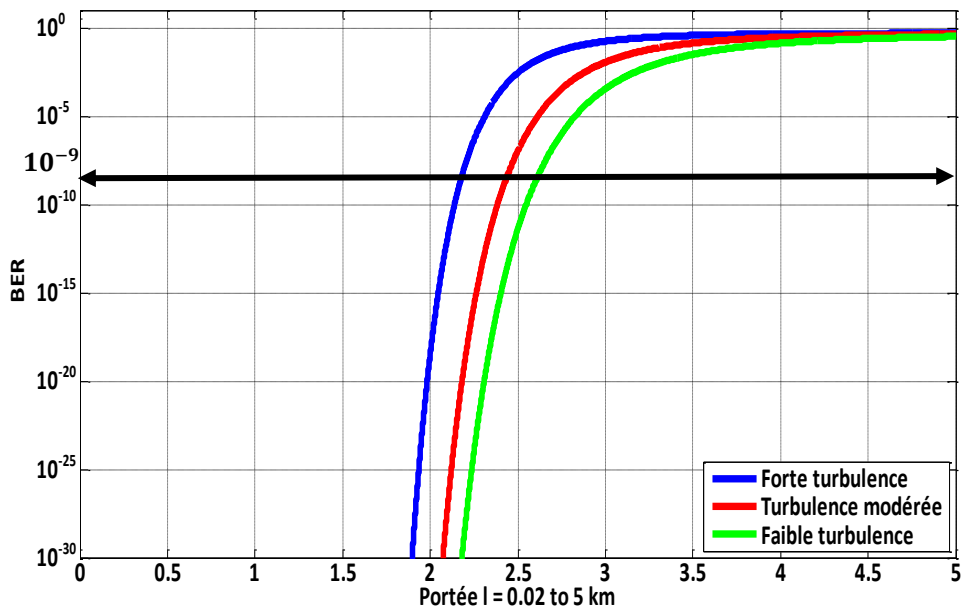
<b><math>D_b = 622 Mbps</math></b>				
<b>Phénomènes météorologiques</b>	<b>Précipitation <math>S</math> (mm/h)</b>	<b>Atténuation (dB/km)</b>	<b>Portée maximale (m)</b>	<b>BER</b>
Neige sèche	2	14.2887	743	$1 \times 10^{-9}$
	4	37.1891	405.1	$1 \times 10^{-9}$
	6	65.0760	272.2	$1 \times 10^{-9}$
	8	96.7913	201.8	$1 \times 10^{-9}$
Neige humide	2	6.2263	1153	$1 \times 10^{-9}$
	4	10.2559	894.8	$1 \times 10^{-9}$
	6	13.7329	760.2	$1 \times 10^{-9}$
	8	16.8934	673	$1 \times 10^{-9}$
<b><math>D_b = 1 Gbps</math></b>				
<b>Phénomènes météorologiques</b>	<b>Précipitation <math>S</math> (mm/h)</b>	<b>Atténuation (dB/km)</b>	<b>Portée maximale (m)</b>	<b>BER</b>
Neige sèche	2	14.2887	721.9	$1 \times 10^{-9}$
	4	37.1891	395.5	$1 \times 10^{-9}$
	6	65.0760	266.3	$1 \times 10^{-9}$
	8	96.7913	197.7	$1 \times 10^{-9}$
Neige humide	2	6.2263	1113	$1 \times 10^{-9}$
	4	10.2559	867.5	$1 \times 10^{-9}$
	6	13.7329	738.4	$1 \times 10^{-9}$
	8	16.8934	654.5	$1 \times 10^{-9}$

**Tableau B. 2** - Portée maximale, dans le cas de la neige, détection DTO.

## (c) Cas de la scintillation



a)



b)

Figure B. 4 - BER en fonction de la portée, cas de la scintillation, détection DTO : a)  $D_b = 622$  Mbps, b)  $D_b = 1$  Gbps.

$D_b = 622 \text{ Mbps}$				
Phénomènes météorologiques	$C_n^2 (m^{-2/3})$	Atténuation (dB/km)	Portée maximale (m)	BER
Forte turbulence	$10^{-12}$	0.6554	2266	$1 \times 10^{-9}$
Turbulence modérée	$10^{-13}$	0.2073	2553	$1 \times 10^{-9}$
Faible turbulence	$10^{-16}$	0.0066	2754	$1 \times 10^{-9}$
$D_b = 1 \text{ Gbps}$				
Phénomènes météorologiques	$C_n^2 (m^{-2/3})$	Atténuation (dB/km)	Portée maximale (m)	BER
Forte turbulence	$10^{-12}$	0.6554	2164	$1 \times 10^{-9}$
Turbulence modérée	$10^{-13}$	0.	2418	$1 \times 10^{-9}$
Faible turbulence	$10^{-16}$	0.0069	2588	$1 \times 10^{-9}$

Tableau B. 3 - Portées maximales, cas de la scintillation, détection DTO.

## B.2 Modélisation sous Optisystem

Le schéma bloc d'une liaison FSO-SAC-OCDMA pour une détection de toutes les longueurs d'ondes sous logiciel Optisystem est présenté par la figure (B.5).

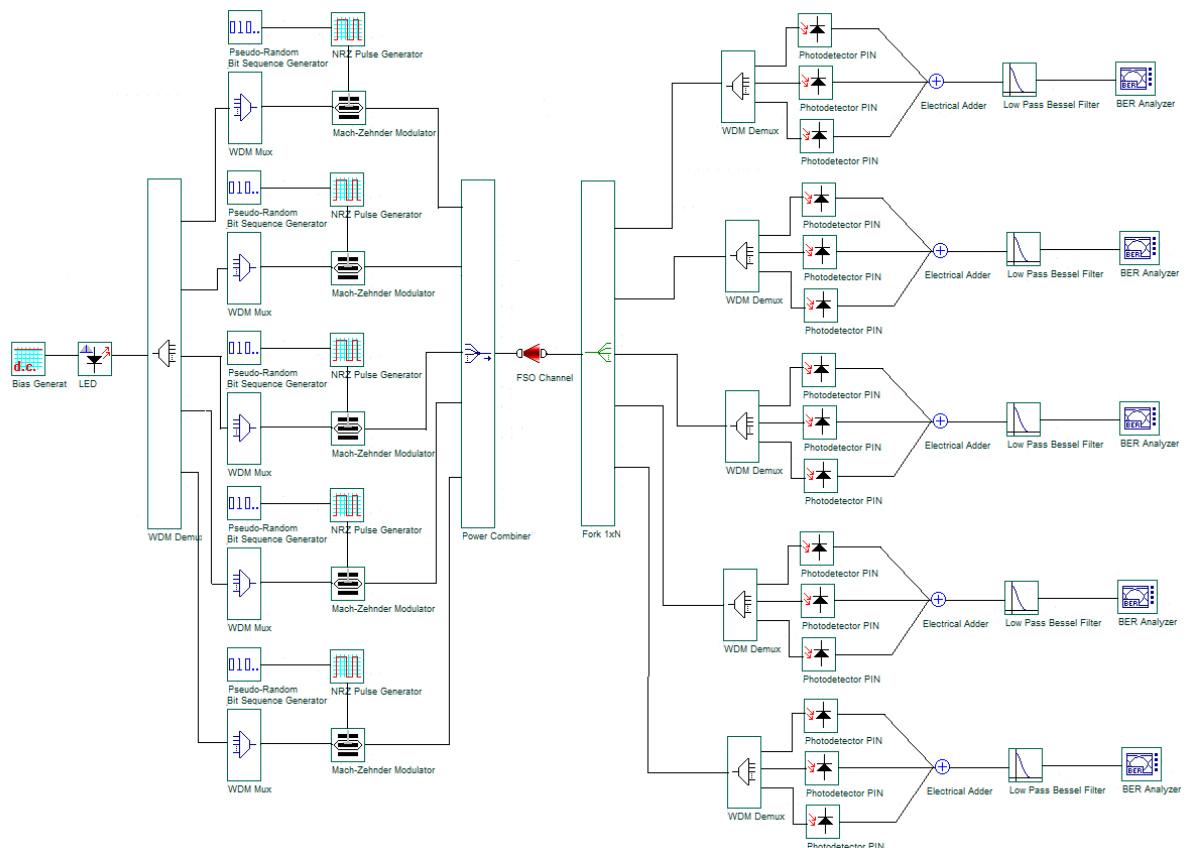


Figure B. 5 - Schéma bloc du système FSO-SAC-OCDMA pour une détection DTO sous Optisystem.

Au niveau du récepteur, un fork à cinq sorties est utilisé afin de générer toute la bande utilisée pour chaque utilisateur et un démultiplexeur optique afin de sélectionner les trois longueurs d'ondes appartenant au code de chaque utilisateur.



# Bibliographie

- [1] M. Al Naboulsi, H. Sizun and F. De Fornel, "Fog attenuation prediction for optical and infrared waves," *Optical Engineering*, vol. 43, no. 2, pp. 319-330, 2004.
- [2] O. Ringar, *Utilisation des techniques avancées d'Emission/Réception multi-antennes pour une transmission optique large bande*, Thèse de doctorat. Université de Limoges, 2015.
- [3] M. Al Naboulsi, *Contribution à l'étude des liaisons optiques atmosphériques: propagation, disponibilité et fiabilité*, Thèse de doctorat. Université de Bourgogne, 2005.
- [4] Union International Telecommunication, "Report ITU-R F.2106-1: Fixed service applications using free space optical links," 2010.
- [5] L. E. and F. Jr., *Principales of electronic communication systems*, The Mc-Graw - Hill Companies, 2008.
- [6] M. Rouissat, *Etude et Modélisation d'une Liaison Optique Sans Fil*, Thèse de doctorat. Université Tlemcen, 2013.
- [7] "slideplayer.fr," [Online]. Available: <https://slideplayer.fr/slide/8973579/>. [Accessed 6 Novembre 2018].
- [8] "docplayer.fr," [Online]. Available: <https://docplayer.fr/62827752-Chapitre-3-detecteurs-optiques.html>. [Accessed 11 Novembre 2018].
- [9] H. Kaushal, V. K. Jain et K. Subrat, et KAR, Subrat. *Free space optical communication*, Springer India, 2017.

- [10] H. Willebrand and B. S. Ghuman, Free space optics: enabling optical connectivity in today's networks, SAMS publishing, 2002.
- [11] S. Bloom, E. Korevaar, J. Schuster and H. Willebrand, "Understanding the performance of free-space optics," *Journal of optical Networking*, vol. 2, no. 6, pp. 178-200, 2003.
- [12] L. Chevalier, *Performance de l'optique sans fil pour les réseaux de capteurs corporels*, Thèse de doctorat. Université de Limoges, 2015.
- [13] "laser 2000," [Online]. Available: [https://www.laser2000.fr/index.php?force\\_sid=4fjqa99d7b2ch2dn716rkuvn45&](https://www.laser2000.fr/index.php?force_sid=4fjqa99d7b2ch2dn716rkuvn45&). [Accessed 5 Novembre 2018].
- [14] "www.orbitica.com," [Online]. Available: [https://www.orbitica.com/durcis/produits/reseau/trimble\\_fiber\\_space\\_optics.htm](https://www.orbitica.com/durcis/produits/reseau/trimble_fiber_space_optics.htm). [Accessed 22 Novembre 2018].
- [15] "openclassrooms.com," [Online]. Available: <https://openclassrooms.com/en/courses/4617941-initiez-vous-au-traitement-du-signal-radar/4649731-utilisez-l-equation-du-radar-avec-bruits-et-pertes>. [Accessed 2 Novembre 2018].
- [16] A. K. Majumdar, "Free-space laser communication performance in the atmospheric channel," *Journal of Optical and Fiber Communications Reports*, vol. 2, no. 4, pp. 345-396, 2005.
- [17] A. G. Alkholidi and K. S. Altowij, "Free space optical communications—Theory and practices. In : Contemporary Issues in Wireless Communications," *InTech*, 2014.
- [18] S. Nagpal and A. Gupta, "An Analytical Approach for Performance Enhancement of FSO Communication System Using Array of Receivers in Adverse Weather Conditions," *Journal of Optical Communications*, vol. 38, no. 3, pp. 287-291, 2017.

- [19] H. S. Mohammed, S. A. Aljunid and H. A. Fadhil, "Generation of a new hybrid subcarrier multiplexing–SAC-OCDMA system based on FSO," *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, vol. 58, no. 2, pp. 389-396, 2013.
- [20] S. Singh, D. Singh and B. Utreja, "Performance enhancement of a FSO-based hybrid SAC-OCDMA system using zero cross correlation code," *Iject*, vol. 5, no. 2, pp. 108-112, 2014.
- [21] A. A. Ali Mazin, «Transmission of Optical Signals for Wireless Communications under Snow Attenuation Effect,» *AIJRSTEM*, 2013.
- [22] B. Priya, "Performance Analysis of SACOCDMA-FSO System Using MD Codes," *International Journal of Hybrid Information Technology*, vol. 8, no. 5, pp. 187-194, 2015.
- [23] A. K. Majumdar, "Free-space laser communication performance in the atmospheric channel," *Journal of Optical and Fiber Communications Reports*, vol. 2, no. 4, pp. 345-396, 2005.
- [24] P. W. Kruse, L. D. Mcglauchlin et R. B. Mcquistan, *Elements of infrared technology: Generation, transmission and detection*, New York: Wiley, 1962.
- [25] I. I. Kim, B. Mcarthur and E. J. Korevaar, "Comparison of laser beam propagation at 785 nm and 1550 nm in fog and haze for optical wireless communications," *In : Optical Wireless Communications III. International Society for Optics and Photonics*, pp. 26-38, 2001.
- [26] H. Sizun, M. Al Naboulsi and F. De Fornel, "La propagation des ondes optiques visibles et infrarouges dans l'atmosphère terrestre: Interaction du champ électromagnétique avec l'environnement," *Revue de l'électricité et de l'électronique*, no. 6-7, pp. 72-82, 2005.
- [27] J. Penon, *Réduction du bruit d'intensité dans les systèmes SAC-OCDMA incohérents utilisant des réseaux de Bragg*, Thèse de doctorat. Université Laval, 2009.

- [28] A. Garadi, *Contribution à l'étude des codes ZCC: Application au système SAC-OCDMA*, Thèse de doctorat. Université Djillali Liabes, Sidi Bel Abbès, 2015.
- [29] Kandouci chahinaz, *Etude et simulation du système de transmission SAC-OCDMA sous le logiciel Optisystem*, Mémoire Master. Université Djillali Liabes, Sidi Bel Abbès, 2012.
- [30] S. Driz, *Contribution à l'étude du système hybrid SCM SAC-OCDMA*, Thèse de doctorat. Université Djillali Liabes, Sidi Bel Abbès, 2017.
- [31] A. Garadi and A. Djebbari, "New family of algebraically designed Zero Cross-Correlation codes for use in CDMA fibre codes for use in CDMA fibre-optic networks," *International Journal of Computer Science and Network Security*, vol. 11, no. 12, pp. 131-133, 2011.
- [32] A. Garadi and A. Djebbari, "New technique for construction of a zero cross correlation code," *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, vol. 123, no. 15, pp. 1382-1384, 2012.
- [33] M. S. Anuar, S. A. Aljunid and N. M. Saad, "Development of a zero cross-correlation code for spectral amplitude coding optical code division multiple access (OCDMA)," *IJCSNS*, vol. 6, no. 12, pp. 180-184, 2006.
- [34] E. I. Babekir, N. M. Saad et E. N., «Study of optical spectral CDMA zero cross-correlation code,» *Int. J. Comput. Sci. Network Security*, vol. 7, pp. 315-320, 2007.
- [35] A. M. Safar, S. A. Aljunid and A. Razif, "Enhancement of zero cross correlation code for optical CDMA network system," *In : International Conference on Communications and Information Technology*, 2012.
- [36] M. S. Anuar, S. A. Aljunid and S. N. M., "New design of spectral amplitude coding in OCDMA with zero cross-correlation," *Optics communications*, vol. 282, no. 14, pp. 2659-2664, 2009.

- [37] N. Ahmed, S. A. Aljunid et H. A. Fadil, «Hybrid OCDMA over WDM system using modified double weight (MDW) code for optical access network,» *In : Advanced Materials Research. Trans Tech Publications*, pp. 3878-3883, 2012.
- [38] M. S. Anuar, S. A. Aljunid and N. M. Saad, "New desing of spectral amplitude coding in OCDMA with zero cross-correlation," *Optics communications*, vol. 282, no. 14, pp. 2659 - 2664, 2009.
- [39] I. S. Hmud, F. N. Hasoon and S. Shaari, "Optical CDMA system parameters limitations for AND subtraction detection scheme under enhanced double weight (EDW) code based on simulation experiment," *Optica Applicata*, vol. 40, no. 3, pp. 669 - 676, 2010.
- [40] M. S. Anuar, S. A. Aljunid and A. R. Arief, "PIN versus Avalanche photodiode gain optimization in zero cross crrelation optical code division multiple access system," *Optik International Journal for Light and Electron Optics*, vol. 124, no. 4, pp. 371 - 375, 2013.
- [41] A. Djebbari, A. Garadi and I. Dayoub, "A new code construction with zero cross correlation based on BIBD," *Optik International Journal for Light and Electron Optics*, vol. 124, no. 118, pp. 3419 - 3421, 2013.
- [42] S. H. MH., "Closed-form expression for the bit-error rate of spectral-amplitude-coding optical CDMA systems," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 24, no. 15, pp. 1285 - 1287, 2012.
- [43] A. Garadi, A. Djebbari et A. Taleb-Ahmed, «Zero Cross-Correlation Codes based on BIBD : Performance analysis and application,» *The second International Electronic, Communication and Photonic Conference*, 2013.
- [44] L. Mesri and A. Djebbari, "Performance Limits of FSO based SAC-OCDMA system under weather conditions," *Journal of Optical Communications*, 2018. DOI : 10.1515/joc-2018-0204.

[45] Library Optisystem Component, *Optical Communication System Desing Software Version 9.0.0.623*, Copyright (c) 2010 Optiwave.

[46] corecess Inc., "www.corecess.com," Septembre 2008. [Online]. Available: [https://lafibre.info/images/tuto/200809\\_WDM-PON.pdf](https://lafibre.info/images/tuto/200809_WDM-PON.pdf). [Accessed 15 Mai 2017].