

# وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI MOKHTAR- ANNABA UNIVERSITY  
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

Année : 2019

Faculté: Sciences de l'Ingéniorat  
Département: Electronique

## MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de : MASTER

**Intitulé :**

**Contribution par simulation aux différentes sources de bruits dans les détecteurs optiques**

**Domaine : Sciences et Technologie**

**Filière : Télécommunications**

**Spécialité: Systèmes des Télécommunications**

**Par :**

**Labed Lyamine Nour El Islam**

**DEVANT Le JURY**

**Président : M. Zadam**

**MCB**

**UBM Annaba**

**Directeur de mémoire: F. Brik**

**MCB**

**UBM Annaba**

**Examineur: K.Saouchi**

**Prof**

**UBM Annaba**

**Examineur: M.Bousbia**

**Prof**

**UBM Annaba**

# Remerciements

*ON DIT SOUVENT QUE LE TRAJET EST AUSSI*

*IMPORTANT QUE LA DESTINATION. LES CINQ ANNÉES DE MAÎTRISE M'ONT PERMIS DE BIEN COMPRENDRE LA SIGNIFICATION DE CETTE PHRASE TOUTE SIMPLE. CE PARCOURS, EN EFFET, NE S'EST PAS RÉALISÉ SANS DÉFIS ET SANS SOULEVER DE NOMBREUSES QUESTIONS POUR LESQUELLES LES RÉPONSES NÉCESSITENT DE LONGUES HEURES DE TRAVAIL.*

*JE TIENS A LA FIN DE CE TRAVAIL A REMERCIER ALLAH LE TOUT PUISSANT DE M'AVOIR DONNE LA FOI ET DE M'AVOIR PERMIS D'EN ARRIVER LA. J'EXPRIME TOUTE MA GRATITUDE AU Dr : F. BRIK, POUR L'EFFORT FOURNI, LES CONSEILS PRODIGUES, SA PATIENCE ET SA PERSÉVÉRANCE DANS LE SUIVI. J'ADRESSE ÉGALEMENT MES REMERCIEMENTS, A TOUS MES ENSEIGNANTS, QUI M'ONT DONNÉ LES BASES DE LA SCIENCE, JE REMERCIE TRÈS SINCÈREMENT, LES MEMBRES DE JURY D'AVOIR BIEN VOULU ACCEPTER DE FAIRE PARTIE DE LA COMMISSION D'EXAMINATEUR.*

*AINSI, J'ADRESSE MES REMERCIEMENTS LES PLUS CHALEUREUX A MES PARENTS, MON FRERE, MES SŒURS, MA FAMILLE ET A TOUTES LES PERSONNES QUI M'ONT AIDÉ DE PRÈS OU DE LOIN PAR LE FRUIT DE LEUR CONNAISSANCES PENDANT TOUTE LA DURÉE DE NOTRE PARCOURS EDUCATIF.*

*FINALEMENT, MES REMERCIEMENTS VONT A MES AMIS QUI N'ONT PAS CESSÉ DE M'ENCOURAGER DANS LES MOMENTS DIFFICILES.*

## Dédicace

*Je dédie ce mémoire à :*

*Mes parents :*

*Ma mère **Labed Nabila** , qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.*

*Mon père **Abd El Hafid** , qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit ; Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.*

*Mon frère **Mohamed El Bachir** et mes sœurs **Nadine & Lina Farah** qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité.*

*Mes professeurs qui doivent voir dans ce travail la fierté d'un savoir bien acquis.*

*Je dédie ce mémoire, à tous ceux et toutes celles qui m'ont accompagné et soutenu durant cette année de formation*

# Table des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

Résumé (Arabe, Français, Anglais)

Introduction générale

## Chapitre I: Les photo détecteurs optiques à semi-conducteurs

1.1	Introduction.....	2
1.2	Principe de la Photo détection.....	2
1.3	Différents types de photo détecteurs .....	3
1.3.1	La Photodiode PIN .....	3
1.3.2	La Photodiode APD.....	5
1.4	Matériaux utilisés pour la photo détection.....	6
1.5	Schéma électrique équivalent de la photodiode et caractéristiques électriques.....	7
1.6	Principales Caractéristiques de la photodiode .....	8
1.6.1	Le Rendement quantique interne .....	8
1.6.2	La Sensibilité .....	8
1.6.3	Le courant d'obscurité.....	9
1.6.4	La Réponse temporelle $\tau$ et bande passante BP .....	9
1.7	Comparaison entre les deux photodiodes .....	10
1.8	Sources de bruit dans les photodétecteur.....	10
1.8.1	Le bruit thermique (Johnson).....	10
1.8.2	Le bruit de grenaille (Quantique).....	11
1.9	Conclusion .....	12

## Chapitre 2 : Présentation du module de réception via le logiciel OptiSystem

2.1	Introduction.....	13
2.2	Récepteur optique.....	13
2.2.1	Exigences imposées aux récepteurs optiques .....	13
2.2.2	Puissance minimale requise pour un photodétecteur .....	14
2.3	Critères de qualité d'une transmission optique.....	14
2.3.1	Le taux d'erreur binaire (BER) et le facteur Q .....	15
2.3.2	Diagramme de l'œil.....	15
2.4	Présentation du module de réception via OptiSystem.....	17
2.4.1	Présentation du logiciel OptiSystem .....	17
2.4.2	Conception d'une chaîne de transmission optique sous OptiSystem .....	20
2.4.3	Simulation d'un Récepteur optique.....	20

### **Chapitre 3 : Résultats et interprétations**

3.1	Introduction.....	22
3.2	Détermination de la puissance d'entrée minimale du photodétecteur.....	22
3.2.1	Puissance minimale à Photodiode PIN.....	22
3.2.2	Puissance minimale à la Photodiode APD.....	23
3.2.3	Variation de la puissance minimale du photodétecteur avec l'atténuation .....	23
3.3	Influence des sources de bruits des photodétecteur sur la qualité du signal.....	25
3.3.1	Simulation des sources de bruit dans la photodiode PIN .....	25
3.3.2	Sources de bruit dans la photodiode à avalanche (APD) .....	31
3.4	Comparaison entre les deux structure PIN et APD .....	36
3.4.1	Influence de la sensibilité .....	36
3.4.2	Influence de la puissance d'entrée .....	37
3.4.3	Influence du courant d'obscurité.....	39
3.4.4	Influence du débit de transmission.....	40

#### **Conclusion Générale**

#### **Références bibliographique**

# Liste des tableaux

Tableau (1.1) : Exemple de semi-conducteurs et des paramètres de la photodiode utilisée en télécommunication .....	7
Tableau (1.2) : Comparaison des caractéristiques des photodiodes PIN et APD.....	10
Tableau (2.1) : Valeurs du rapport signal sur bruit en fonction des différents taux d'erreurs.....	15
Tableau (2.2) : Types de signaux dans la bibliothèque du logiciel OptiSystem.....	19
Tableau (3.1) : Variation de la puissance minimale $P_{\min}$ , le BER et le facteur Q en fonction de l'Atténuation.....	24
Tableau (3.2) : Valeurs du BER et le facteur Q en fonction de bruit thermique.....	28
Tableau (3.3) : Valeurs du BER et Q en fonction du facteur de multiplication de la photodiode APD.....	34
Tableau (3.4) : Valeurs du rapport Signal/Bruit en fonction de la sensibilité pour les deux photodiodes.....	36
Tableau (3.5) : Valeurs du rapport Signal/Bruit en fonction de la puissance d'entrée des deux photodiodes (PIN & APD).....	38
Tableau (3.6) : Valeurs du rapport Signal/Bruit en fonction du courant d'obscurité pour les deux photo détecteurs (PIN & APD).....	39
Tableau (3.7) : Valeurs du rapport signal/bruit en fonction du débit de transmission pour les deux photodiodes (PIN & APD).....	41

# Liste des figures

Figure (1.1) : Principe d'un détecteur à base de semi-conducteur.....	2
Figure (1.2) : Photodiode PIN réelle.....	3
Figure (1.3) : Principe de fonctionnement de la photodiode PIN.....	4
Figure (1.4) : Photodiode APD réelle.....	5
Figure (1.5) : Schéma de principe de la Photodiode APD.....	6
Figure (1.6) : Schéma électrique équivalent à de la photodiode avec son symbole.....	7
Figure (1.7) : Réponse spectrale de la photodiode.....	9
Figure (1.8) : Schéma électrique équivalent d'une photodiode avec les différentes sources de bruit.....	12
Figure (2.1) : Schéma bloc du récepteur optique.....	13
Figure (2.2) : Exemple d'un diagramme de l'œil.....	16
Figure (2.3) : L'interface de travail sur OptiSystem.....	17
Figure (2.4) : Différents composants de la bibliothèque d'OptiSystem.....	18
Figure (2.5) : Exemple de signaux avec le code des couleurs dans l'OptiSystem.....	19
Figure (2.6) : Outils de visualisations électriques et optiques pour l'OptiSystem.....	19
Figure (2.7) : Schéma synoptique général d'une chaine de transmission optique.....	20
Figure (2.8) : Schéma d'un system de transmission par fibre optique sous le logiciel OptiSystem.....	20
Figure (3.1) : Chaine de transmission avec la photodiode PIN.....	22
Figure (3.2) : Chaine de transmission avec la photodiode APD.....	23
Figure (3.3) : Variation du Facteur Q en fonction de l'Atténuation.....	24
Figure (3.4) : Variation du BER en fonction du Facteur Q.....	25
Figure (3.6) : Source de bruit dans la photodiode PIN (bruit quantique).....	26
Figure (3.7) : Diagramme de l'œil dû au bruit quantique (PIN).....	26
Figure (3.8) : Diagramme de l'œil dû au bruit thermique (PIN).....	27
Figure (3.9) : Variation du Facteur Q en fonction du bruit thermique pour la photodiode PIN.....	28
Figure (3.10) : Variation de BER en fonction du bruit thermique dans la PIN.....	29
Figure (3.11) : Amplitude du signal de sortie pour la PIN.....	30
Figure (3.12) : Source de bruit dans la photodiode APD (bruit quantique).....	31
Figure (3.13) : Diagramme de l'œil dû au bruit Quantique (APD).....	32
Figure (3.14) : Diagramme de l'œil dû au bruit thermique dans l'APD.....	33

Figure (3.15) : Variation du facteur de qualité avec le facteur de multiplication M (APD).....	34
Figure (3.16) : Amplitude du signal de sortie pour l'APD.....	35
Figure (3.17) : Comparaison du rapport signal sur bruit des deux photodiodes (PIN & APD) en fonction de la sensibilité.....	37
Figure (3.18) : Comparaison du rapport signal sur bruit des deux photodiodes (PIN & APD) en fonction de la puissance d'entrée.....	38
Figure (3.19) : Comparaison du rapport signal sur bruit des deux photodiodes (PIN & APD) en fonction du courant d'obscurité.....	40
Figure (3.20) : Comparaison du rapport signal sur bruit des deux photodiodes (PIN & APD) en fonction du débit de transmission.....	41

# Liste des abréviations

APD ou PDA	<b>Photo</b> Diode à <b>Avalanches</b>
PIN	<b>In</b> trinsèque diode <b>PN</b>
S	<b>Sensibilité</b>
FO	<b>Fibre Optique</b>
S-C	<b>Semi-Conducteurs</b>
P	S-C dopé avec des atomes accepteurs (couche de valence possède 3 é libre).
I	Zone <b>in</b> trinsèque
N	Atomes <b>don</b> neurs.
PN	Association de deux types de semi-conducteur <b>N</b> et <b>P</b> (jonction PN).
S/N	Rapport <b>S</b> ignal Sur le <b>B</b> ruit.
BER ou TEB	<b>T</b> aux d'Erreurs par <b>B</b> its.
BP	<b>B</b> ande <b>P</b> assante
T	Réponse <b>T</b> emporel

## Résumé

Le photodétecteur qui convertit la puissance optique en courant électrique est l'un des principaux éléments fonctionnels de tout bloque de réception. En fonction des performances recherchées des systèmes de communications optiques, on peut utiliser soit la photodiode PIN soit la photodiode à Avalanche. La puissance minimale détectée par le photodétecteur dépend du bruit. L'objectif de ce travail est l'étude et la simulation des sources de bruits dans les photo détecteurs optiques, à savoir la PIN et l'APD et comparaison de leurs performances.

**Mots clés :** PIN, APD, Bruit quantique, bruit thermique.

## Abstract

The photodetector that converts optical power into electrical current is one of the main functional elements of any receive block. Depending on the desired performance of the optical communications systems, it is possible to use either the PIN photodiode or the Avalanche photodiode. The minimum power detected by the photodetector depends on the noise. The aim of this work is the study and simulation of various noise in the optical photo detectors, namely PIN and APD and comparison of their performances.

**Key words:** PIN, APD, shot noise, thermal noise.

## ملخص

يعتبر الكاشف الضوئي الذي يحول الطاقة الضوئية إلى تيار كهربائي أحد العناصر الوظيفية الرئيسية لأي جهاز استقبال. اعتمادًا على الأداء المطلوب لأنظمة الاتصالات البصرية، من الممكن استخدام إما الكاشف الضوئي PIN أو الكاشف الضوئي APD. الحد الأدنى من الطاقة التي يكتشفها جهاز الكشف الضوئي يعتمد على الضوضاء. الهدف من هذا العمل هو دراسة ومحاكاة مصادر الضوضاء في الكاشفات الضوئية الني هي PIN و APD ومقارنة أدائها.

# Introduction Générale

On estime aujourd'hui que plus de 80% des communications à longue distance, sont transportées le long de plus de 25 millions de kilomètres de câbles à fibres optiques partout dans le monde.

La transmission par fibre optique des données nécessite des conversions électrique - optique et optique - électrique du signal. L'interface optique de réception, est chargée de convertir le signal lumineux en un signal électrique, en lui apportant le minimum de dégradation. Ce rôle est assuré par un photo détecteur, qui doit être sensible, rapide et présenter le minimum de bruit.

Les photodétecteur à semi-conducteur présentent les avantages d'être très rapides et faciles à utiliser. Ces structures sont classées en deux grandes catégories : la photodiode PIN et la photodiode à avalanche [1-2].

Le photodétecteur est caractérisé par une sensibilité qui dépend de la longueur d'onde de la lumière incidente, et des matériaux utilisés. Il contribue au bruit du système (par son bruit quantique et son bruit thermique).

C'est dans ce contexte que s'inscrit notre travail qui porte sur la simulation des différentes sources de bruits dans les photodétecteurs de la liaison par fibre optique.

Notre mémoire s'articule autour de trois chapitres :

**Le premier chapitre** est consacré aux généralités sur les photodétecteurs. Nous présentons en détail la structure des photodiodes PIN et APD, leurs caractéristiques et leurs sources de bruit.

**Dans le deuxième chapitre**, nous présentons le module de réception, ainsi que les différentes méthodes utilisées pour établir le bilan de liaison via le logiciel OptiSystem.

**Le troisième chapitre** est dédié aux résultats de simulation obtenus. Nous présentons d'abord les résultats de la photodiode PIN et nous étudions l'influence du bruit thermique sur la qualité du signal transmis, puis nous présentons la même simulation avec la photodiode avalanche avec l'effet du bruit quantique. A la fin, une comparaison entre les deux structures simulées est exposée.

Une conclusion générale résume l'ensemble du travail effectué.

# *Chapitre 1*

## **LES PHOTO DÉTECTEURS OPTIQUES À SEMI-CONDUCTEURS**

## 1.1 Introduction

Ce chapitre a pour but de poser les bases générales et nécessaires, à la compréhension du fonctionnement des photodétecteur. Nous nous intéressons aux photo détecteurs optiques à base de semi-conducteurs, destinés à la transmission par fibres optiques.

Nous allons vous présenter d'abord le principe de fonctionnement d'un détecteur, ensuite nous énumérons les différents types de structures existantes : la photodiode PIN et la photodiode à Avalanche, ainsi que leurs caractéristiques. Et en fin nous décrivons l'origine de bruit dans ces structures.

## 1.2 Principe de la Photo détection

Lorsque la lumière tombe sur un détecteur à base de semi-conducteur, cela peut provoquer le passage d'électrons d'un état de la bande de valence à un état plus élevé de la bande de conduction. Dans cette dernière, les électrons moins liés deviennent libres. Le photon a donc laissé place à une paire (électron-trou), Figure (1.1).

Les porteurs ainsi générés peuvent alors recueillis vers un circuit extérieur et contribuent au passage d'un courant que l'on appel : photocourant. Le nombre de paires électron-trou est égal au nombre de photons absorbés [3].

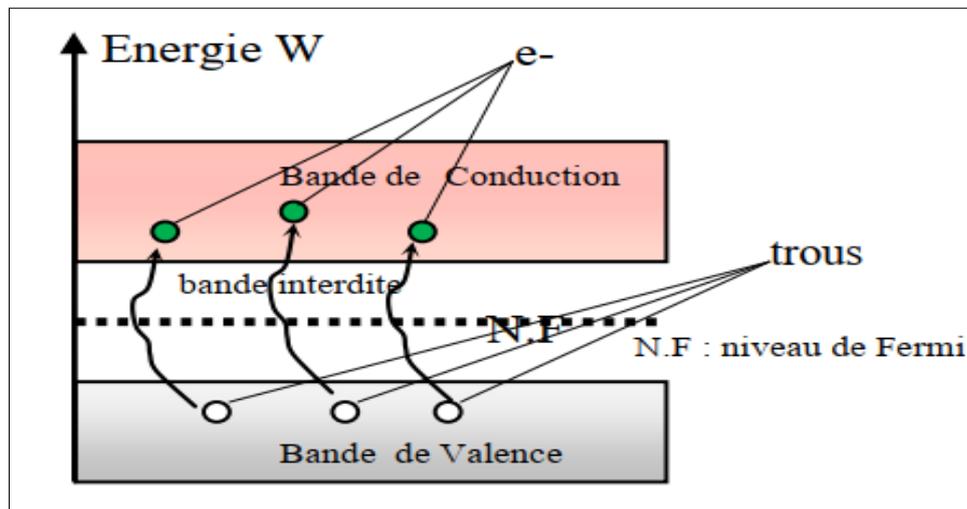


Figure (1.1) : Principe d'un détecteur à base de semi-conducteur

### 1.3 Différents types de photo détecteurs

Les photodétecteurs utilisés dans la transmission par fibre optique sont de deux types : la photodiode PIN et la photodiode à Avalanche.

#### 1.3.1 La Photodiode PIN

La structure d'une photodiode PIN est une jonction PN simple. La jonction PN est constituée de deux couches, à savoir des semi-conducteurs de type P et de type N, tandis que la photodiode PIN est constituée de trois couches, à savoir le type P, le type N et une couche d'addition appelée semi-conducteur intrinsèque (zone I), placée entre le semi-conducteur de type P et le type N.

La photodiode PIN est alors développée à partir des photodiodes à jonction PN. Le fonctionnement de la photodiode PIN est similaire à la photodiode de jonction PN, sauf que la photodiode PIN est fabriquée différemment pour améliorer ses performances. La photodiode PIN est développée pour augmenter le courant de porteurs minoritaires et la vitesse de réponse. Les photodiodes PIN génèrent plus de courant électrique que les photodiodes de jonction PN [3-4].

La figure (1.2), illustre une image de la photodiode réelle.



Figure (1.2) : Photodiode PIN réelle

- **Principe du fonctionnement de la photodiode PIN**

Elle utilise la photo détection (conversion d'un photon en une paire électron-trou, dans un semi-conducteur). Sa structure est une simple diode PN polarisée en inverse, les photons sont absorbés dans la zone intrinsèque qui, du fait de la polarisation, est vide de porteurs mobiles.

Les électrons et les trous ainsi créés ont une faible probabilité d'être recombinés, ils sont séparés par le champ électrique  $\vec{E}$  qui règne dans la zone intrinsèque et qui les dirige vers la zone N et P, où ils sont majoritaires, figure (1.3).

La zone traversée par la lumière doit être de faible épaisseur et protégée par une couche antireflet qui améliore le rendement externe et protège le matériau [4-5].

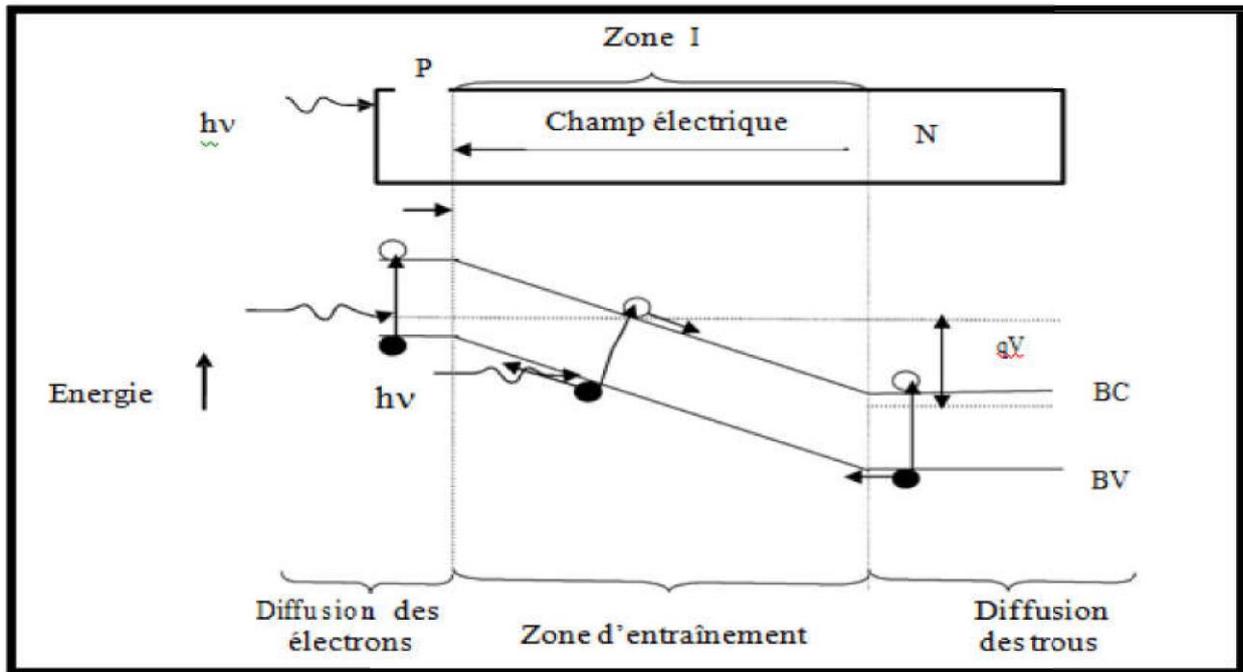


Figure (1.3) : Principe de fonctionnement de la photodiode PIN

Le courant établi dans la photodiode PIN est donné par :

$$I_{ph} = i_s + I_{obs} \quad (1.1)$$

Où :  $i_s = S \cdot P$  photo courant proportionnel à la puissance optique P et la sensibilité S.

$I_{obs}$  : Courant d'obscurité, c'est le courant qui circule dans la jonction en absence d'éclairement, il provient à la fois de courants de fuite et de génération thermique, il augmente avec la température et la tension de polarisation [5].

### 1.3.2 La Photodiode APD

La photodiode à avalanche APD (Avalanche PhotoDiode) est une photodiode PIN dans laquelle les électrons créés dans la zone intrinsèque sont multipliés par effet d'avalanche afin que le rapport signal sur bruit soit suffisamment important. L'idée d'utiliser ce phénomène de multiplication interne a été soulevée pour qu'un photon incident n'engendre plus un seul photoélectron mais plusieurs, ceci pour augmenter la puissance du signal électrique correspondant à la puissance optique incidente donnée. Du point de vue fonctionnel, elle peut être considérée comme l'analogue du tube photomultiplicateur. Le temps de réponse de la photodiode APD est plus long par rapport à celui de photodiodes PIN, car, un délai supplémentaire est dû au phénomène d'ionisation.

La figure (1.4) illustre une image réelle d'une photodiode à avalanche.

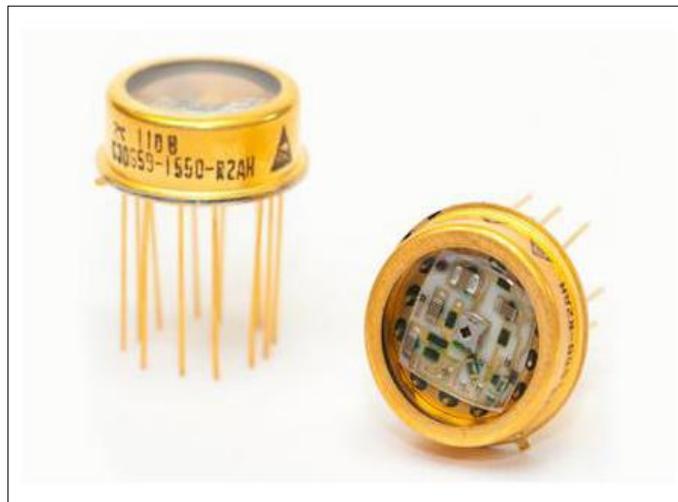


Figure (1.4) : Photodiode APD réelle

- **Principe du fonctionnement de la photodiode APD**

La tension de polarisation inverse appliquée est élevée dans le cas de photodiode à avalanche, pour obtenir une multiplication par avalanche. Les paires électron-trou générées éprouvent une force due au champ électrique de région d'épuisement et au champ électrique externe.

Chaque porteur primaire donne naissance à  $m$  porteurs secondaires, sous l'effet du champ électrique obtenu sous forte polarisation inverse, où il y a ionisation par impact, figure (1.5).

Lorsque les électrons libres se déplaçant à grande vitesse, entrent en collision avec l'atome, ils frappent plus d'électrons libres. Les électrons libres nouvellement générés sont de nouveau accélérés et entrent en collision avec d'autres atomes. En raison de cette collision continue avec les atomes, un grand nombre de porteurs minoritaires sont générés. Ainsi, les photodiodes

d'avalanche génèrent plus de porteurs de charges que la PIN. Les photodiodes d'avalanche sont utilisées dans les applications où un gain élevé est un facteur important [5].

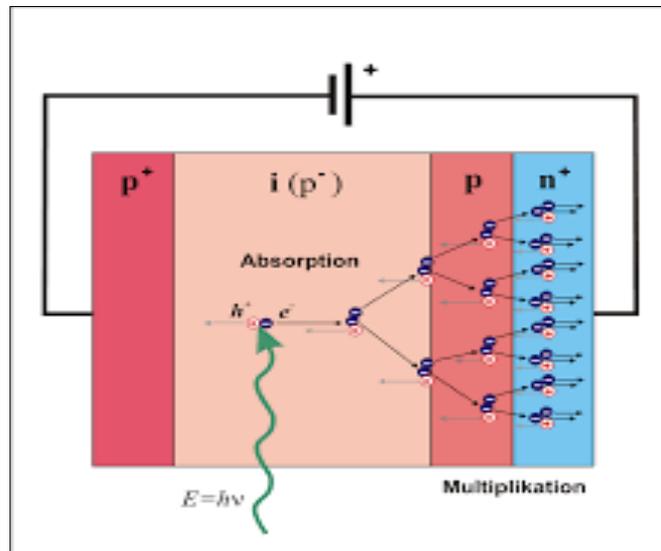


Figure (1.5) : Schéma de principe de la Photodiode APD

Le photo courant ainsi généré dans la photodiode à Avalanche est donné par :

$$i_s = M.S.P \tag{1.2}$$

Avec :

$M$  : facteur de multiplication, il est donné par

$M = 1 / (1 - (V - V_B)^{m'})$ , où  $m' = 3-6$  (selon le matériau).  $V$  : Tension en inverse.

$S$ : sensibilité ;  $P$ : puissance optique.

### 1.4 Matériaux utilisés pour la photo détection

L'émission de la lumière exige l'utilisation des semi-conducteurs à gap direct, cependant pour la détection et contrairement à l'émission, il n'est pas obligatoire que le semi-conducteur utilisé soit à gap direct, le Silicium à gap indirect est employé largement grâce à son cout faible et ses meilleures performances.

Le tableau (1.1) donne quelques exemples des semi-conducteurs utilisés en photo détection pour la transmission par fibres optiques des trois fenêtres principales :  $0.85\mu\text{m}$ ,  $1.3\mu\text{m}$  et le  $1.55\mu\text{m}$ .

Fenêtre	Première (0.85 $\mu$ m)	Deuxième (1.3 $\mu$ m)	Troisième (1.55 $\mu$ m)
Matériau	Si (Silicium)	Ge (Germanium)	GaInAs (Arséniure de Galium et d'Indium)
$S_{max}(A/W)$	0.6	0.7	0.8
$i_D(nA)$	1 à 5	500	1 à 5
$V_B(V)$	100 à 200	25	100 à 160
Gain max	100	10	20

Tableau (1.1) : Exemple de semi-conducteurs et des paramètres de la photodiode utilisée en télécommunication

## 1.5 Schéma électrique équivalent de la photodiode et caractéristiques électriques

Le circuit équivalent d'une photodiode est représenté sur la figure (1.6)

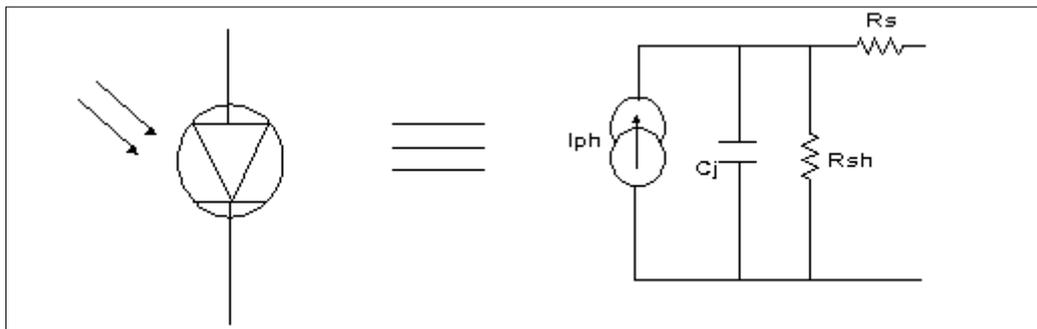


Figure (1.6) : Schéma électrique équivalent à de la photodiode avec son symbole.

Une photodiode peut être représentée par une source de courant  $I_{ph}$  (dépendant de l'éclairement), en parallèle avec la capacité de jonction  $C_j$  et une résistance de shunt  $R_{sh}$  d'une valeur élevée (caractérisant la fuite de courant), l'ensemble étant en série avec une résistance interne  $R_s$  [6].

- **Résistance de shunt** : la résistance de shunt d'une photodiode idéale est infinie. En réalité cette résistance est comprise entre 100k $\Omega$  et 1G $\Omega$  selon la qualité de la photodiode. Cette

résistance est utilisée pour calculer le courant de fuite (ou bruit) en mode photovoltaïque, c'est-à-dire sans polarisation de la photodiode.

- **Capacité de jonction** : cette capacité est due à la zone de charge ; elle est inversement proportionnelle à la largeur de charge d'espace ( $W$ ). Où  $A$  est la surface de coupe de la photodiode.  $W$  est proportionnel à la polarisation inverse et la capacité diminue si la polarisation augmente. Cette capacité oscille autour de 100 pF pour les faibles polarisations à quelques dizaines de pF pour les polarisations élevées.
- **Résistance interne** : cette résistance est essentiellement due à la résistance du substrat et aux résistances de contact.  $R_s$  peut varier entre 10 et 500Ω selon la surface de la photodiode.

## 1.6 Principales Caractéristiques de la photodiode

La photodiode est le plus souvent caractérisée par son rendement quantique interne, sa sensibilité et la bande passante.

### 1.6.1 Le Rendement quantique interne

Le rendement quantique interne désigné par ( $\eta_{int}$ ), représente le rapport du nombre de paires de porteurs photo créées et collectées au nombre de photons incidents. Il ne peut pas être supérieur à 1 et croît avec l'épaisseur de la zone absorbante. Il est souvent compris entre 0,5 et 0,9 et pour une photodiode idéale il est égal à 1.

Son expression est donnée par :

$$\eta_{int} = I \cdot h \nu / q \Phi_i$$

(1.3)

Avec :

$\Phi_i$ : flux incident en Watt ;

$I$ : courant électrique (A) ;

$h$  : constante de Planck ;

$q$ : charge de l'électron ;

$\nu$ : fréquence ;

### 1.6.2 La Sensibilité

Elle est définie comme étant le rapport du photocourant fournie par le détecteur et le flux énergétique que reçoit le détecteur, elle est désignée par  $S$ , et se mesure en (A/W).

La sensibilité augmente avec la longueur d'onde, jusqu'à une valeur où elle est maximale, puis chute brusquement à l'approche de la longueur d'onde limite  $\lambda_c = hc/Eg$ . Au delà le matériau est devient transparent. Figure (1.7).

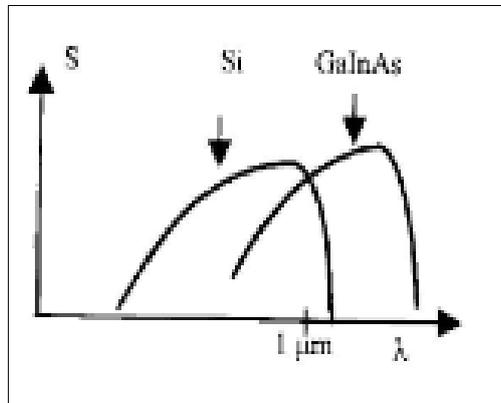


Figure (1.7) : Réponse spectrale de la photodiode

L'expression de la sensibilité est donnée par :

$$S = \eta q / h \nu \quad (1.4)$$

Avec :

$\eta$ : Rendement quantique

$q$ : Charge de l'électron

$h$  : Constante de Planck.

### 1.6.3 Le courant d'obscurité

Le courant d'obscurité est le courant circulant en l'absence de toute source lumineuse. Son origine est thermique et il augmente de 10% pour une augmentation de température de 1°C.

### 1.6.4 La Réponse temporelle $\tau$ et bande passante BP

La réponse temporelle d'un photodétecteur peut être limitée par des effets capacitifs, par le piégeage des porteurs ou par la vitesse limite de saturation des porteurs dans le semi-conducteur. La réponse temporelle d'un photo détecteur est caractérisée par le temps de déclin (ou temps de montée), qui est par définition le temps nécessaire au photo détecteur pour tomber de 90% à 10% de son maximum (ou pour monter de 10% à 90% de celui-ci).

La bande passante est liée par la réponse temporelle par la relation (1.5):

$$BP = 1 / 2. \pi. \tau \quad (1.5)$$

## 1.7 Comparaison entre les deux photodiodes

Le tableau (1.2) donne une comparaison des caractéristiques des deux photodiodes (PIN et APD).

Types de photodiode	Photodiodes	
	PIN	APD
Tension de commande(V)	Faible	Elevé
Fréquence de coupure(GHz)	>60	Quelques
Rendement quantique(%)	Faible	Elevé
Bande passante(GHz)	Large	Faible
Longueur d'onde (nm)	1300 et 1550	1300 et 1550

Tableau (1.2) : Comparaison des caractéristiques des photodiodes PIN et APD

## 1.8 Sources de bruit dans les photodétecteur

Dans les photodétecteurs, on distingue généralement trois contributions de bruit :

- Le bruit en  $1/f$
- Le bruit thermique ou de Johnson
- Le bruit de grenaille (quantique).

Pour des photodiodes fonctionnant à haute fréquence et notamment en télécommunication par fibre optique, le bruit en  $1/f$  est négligeable devant les autres composantes, il ne sera donc pas abordé.

### 1.8.1 Le bruit thermique (Johnson)

Il apparait dans la résistance équivalente composée de la résistance interne de la photodiode et d'une résistance de charge ou celle d'entrée de l'étage amplificateur. Il représente les fluctuations de la tension (du courant) aux bornes du conducteur à l'équilibre thermodynamique suite aux mouvements aléatoires des charges engendrées par la température. Un courant de bruit, de valeur moyenne nulle, prend donc naissance à l'intérieur du composant. Sa valeur quadratique moyenne, donnée par la formule de Johnson Nyquist suivante [4]:

$$I_{th} = \sqrt{\frac{4kTB}{R}} \quad (1.6)$$

Avec :

K : la constante de Boltzmann,

T : la température en Kelvin,

B : la bande passante dans laquelle le bruit est considérée.

R : Résistance : Équivalent de Thévenin d'une source de bruit thermique.

### 1.8.2 Le bruit de grenaille (Quantique)

Le bruit quantique qui est généré par les fluctuations du photocourant engendrées par les fluctuations du flux de photons détectés, ainsi que celles du courant d'obscurité produites par les fluctuations des flux de charges libres, qui peuvent être créées dans la région de charge d'espace, sous l'effet de la température extérieure en l'absence de lumière incidente.

Donc le bruit de grenaille est l'effet indirect du photocourant et du courant d'obscurité dans la photodiode.

La valeur efficace de ce bruit est donnée par la formule de Schottky :

$$I_{qu} = \sqrt{2qB(I_{ph} + I_{obs})} \quad (1.7)$$

Avec :

$I_{ph}$  : Photocourant.

$I_{obs}$  : courant d'obscurité

B : bande passante

q : la charge de l'électron.

Pour minimiser cette contribution de bruit, il convient de minimiser le courant d'obscurité des photodiodes.

Donc le bruit total dans les photo détecteurs (PIN et APD) s'écrit avec la formule (1.8).

$$I_{tot} = I_{th}^2 + I_{qu}^2 \quad (1.8)$$

La figure (1.8) donne le circuit électrique équivalent pour les sources de bruits totale dans les photodétecteurs.

Si nous considérons le bruit de la diode laser, et aussi celui des amplificateurs optiques, les sources de bruits totales s'ajoutent en parallèle.

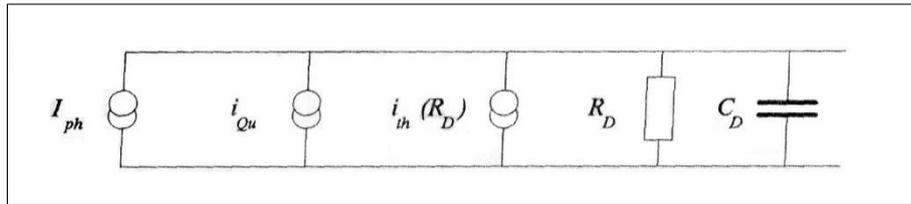


Figure (1.8) : Schéma électrique équivalent d'une photodiode avec les différentes sources de bruit

## 1.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la structure et le principe de fonctionnement des photo détecteurs (PIN et APD), qui sont des éléments essentiels dans la communication par fibre optique, leur rôle est de convertir en énergie électrique, la puissance optique reçue (photons).

Nous avons abordé également les sources de bruits qui excitent.

# *Chapitre 2*

## **PRÉSENTATION DU MODULE DE RÉCEPTION VIA LE LOGICIEL OPTISYSTEM**

## 2.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons le module de réception ainsi que l'outil de simulation utilisé dans notre travail.

La première partie sera consacrée à la présentation du récepteur optique, ces exigences et ces caractéristiques. Dans la deuxième partie, nous exposons une brève description au logiciel OptiSystem et nous décrivons les modèles conçus établis des deux types de photo détecteurs.

## 2.2 Récepteur optique

Le récepteur optique est un dispositif qui permet d'extraire l'information du signal optique reçu, il est composé de quatre parties essentielles, figure (2.1) :

- La photodiode
- Un convertisseur courant-tension
- Un amplificateur
- Un circuit de traitement d'information

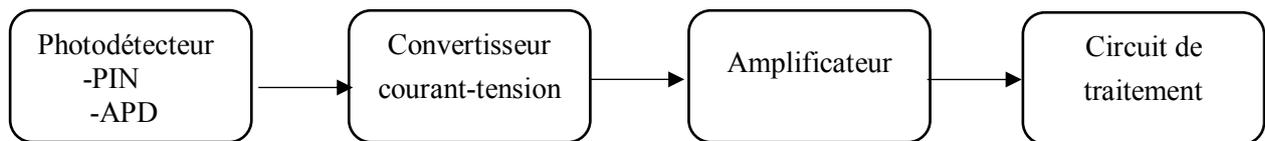


Figure (2.1) : Schéma bloc du récepteur optique

### 2.2.1 Exigences imposées aux récepteurs optiques

Lorsqu'on considère une liaison optique, les performances du système dépendent en grande partie du module de réception. Ce dernier convertit le signal optique en un signal électrique. Dans ce cadre les photodétecteurs doivent répondre aux exigences suivantes [2]:

- ✓ Avoir une grande sensibilité à la longueur d'onde utilisée (0.85  $\mu\text{m}$ , 1.3  $\mu\text{m}$  et 1.55  $\mu\text{m}$ ).
- ✓ Une réponse temporelle rapide et une bande passante convenable.
- ✓ Introduire le minimum de bruit (courant d'obscurité très faible) et une stabilité à la température.
- ✓ Une grande fiabilité pour reconstruire le signal original.
- ✓ Bon couplage avec la fibre optique et simplicité d'intégration.
- ✓ Faible coût.

### 2.2.2 Puissance minimale requise pour un photodétecteur

Lors de la conception d'une liaison par fibre optique, on calcule le bilan de liaison. Il s'agit d'analyser l'évolution de la puissance optique qui transite tout au long de la chaîne de transmission. La puissance minimale nécessaire pour le photodétecteur afin d'assurer la liaison, appelé souvent : Puissance seuil du détecteur par l'expression suivante :

$$Pr = Pe - A.L \quad (2.1)$$

Avec :

$A$  : pertes totale dans la liaison en dB ;

$L$  : longueur (portée maximale).

$Pe$  : puissance émise injectée en bout de la fibre optique

$Pr$  : puissance requise (reçue) à la sortie de la fibre optique

### 2.2.3 L'interface optique de réception

Le module de réception est le dernier étage de la chaîne de transmission, il a pour rôle la réception du signal optique provenant de la fibre puis sa conversion en un signal électrique pour en extraire les données transmises.

La récupération en sortie peut être faite de différentes façons, dont le photo détecteur reste le composant indispensable pour toute réception (conversion optique électrique). On distingue pour cela deux techniques [6]:

- La détection cohérente (détection hétérodyne), dans lesquelles la porteuse optique est modulée en amplitude, en phase ou en fréquence et démodulée dans un détecteur qui réalise une fonction de mélange.
- La détection directe où la conversion est réalisée grâce à une photodiode transformant les fluctuations de puissance optique en fluctuations de courant électrique. C'est cette deuxième méthode qui est la plus utilisée en vue de sa simplicité par rapport à la réception cohérente, surtout avec l'apparition des amplificateurs à fibre dopée et les filtres optiques permettant ainsi d'obtenir en détection directe des performances équivalentes.

## 2.3 Critères de qualité d'une transmission optique

Dans le cas des transmissions numériques, la qualité de transmission peut s'exprimée par le taux d'erreur maximum par débit d'information TEB et le facteur Q, ainsi que le digramme de l'œil.

### 2.3.1 Le taux d'erreur binaire (BER) et le facteur Q

On définit le taux d'erreur binaire comme le rapport de bits erronés sur le nombre de bits reçus.

Le rapport signal sur le bruit est défini comme le rapport de la puissance optique de la porteuse sur le bruit à la réception.

On détermine le taux d'erreur binaire à partir du rapport signal sur bruit (S/B) du signal reçu.

L'expression pour le taux d'erreur binaire est donnée par : [2]

$$BER = P(e) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{S}{2\sqrt{N}}\right) \quad (2.1)$$

Où : *erfc* : est la fonction erreur complémentaire

Le taux d'erreur binaire est exprimé à partir du facteur Q, par la relation suivante : [7]

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{e^{-\frac{Q^2}{2}}}{Q} \quad (2.2)$$

Le tableau (2.1), donne les valeurs du rapport signal sur bruit en fonction de différents taux d'erreurs calculés à l'aide des expressions théoriques précédentes.

S/B (dB)	BER
9.51	$10^{-6}$
10.4	$10^{-7}$
11.23	$10^{-8}$
12	$10^{-9}$
12.73	$10^{-10}$
13.42	$10^{-11}$
14.08	$10^{-12}$
14.71	$10^{-13}$
15.31	$10^{-14}$
15.89	$10^{-5}$

Tableau (2.1) : Valeurs du rapport signal sur bruit en fonction des différents taux d'erreurs.

### 2.3.2 Diagramme de l'œil

On utilise souvent en télécommunications, la méthode dite: diagramme de l'œil pour décrire la dégradation par le bruit et la dispersion du signal numérique. Le diagramme de l'œil permet d'une

manière très simple d'apprécier la qualité des signaux numériques reçus avant qu'ils atteignent le dispositif de démodulation. Il s'agit d'une mesure de base en transmission numérique.

Si l'on superpose des symboles successifs par paires sur un oscilloscope, on obtient le diagramme de l'œil.

Des appareils spécialisés engendrent des séquences aléatoires et comparent le signal de sortie de la liaison optique avec le signal d'entrée. Une séquence aléatoire de bits est visualisée sur un oscilloscope en mode d'accumulation en fonction du temps. La somme de tous les signaux aboutit à une forme de signal appelé œil : Sans bruit les traces se superposent exactement, quand le bruit augmente, les signaux varient et la trace s'épaissit.

La Figure (2.2) montre toute une série de paramètres observables. Le principe général est que plus l'aire centrale est grande, plus la qualité du signal reçu est bonne. La largeur est liée à la facilité à synchroniser et différencier les échantillons successifs alors que la hauteur du lobe central traduit le rapport d'énergie entre le signal original et le bruit de canal [6].

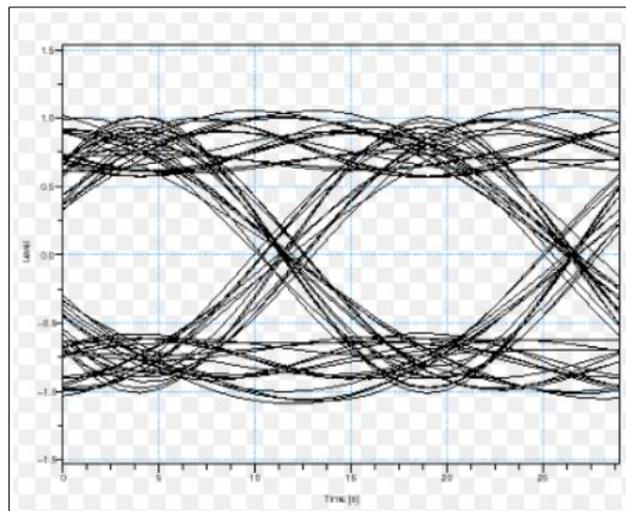


Figure (2.2) : Exemple d'un diagramme de l'œil

## 2.4 Présentation du module de réception via OptiSystem

Dans cette partie, le but recherché est de pouvoir réussir à faire la conception d'une liaison optique, en mettant l'accent sur le module de réception à travers le logiciel de simulation OptiSystem. A cet effet, dans la partie suivante, on va passer par une brève description à l'outil de simulation utilisé, puis nous présentons le schéma de simulation utilisé.

### 2.4.1 Présentation du logiciel OptiSystem

OptiSystem est un logiciel développé par une société canadienne Optiwave ; Optical Communication System Design Software. Il permet de reproduire avec fiabilité le comportement réel d'un system de transmission par fibre optique et ceci grâce aux composants virtuels qu'il dispose dans son bibliothèque.

#### ▪ L'interface de travail sur OptiSystem

La fenêtre qui apparaît après l'exécution du logiciel OptiSystem comporte (figure 2.3):

- (i) Une barre de menus (en haut de la fenêtre) : pour effectuer diverses opérations telles que l'ouverture et l'édition d'un fichier de simulation.
- (ii) A gauche se situe les composants de la bibliothèque tels que : fibres, connecteurs, modulateurs, récepteurs....
- (iii) A droite, le lay-out de conception de schéma, où on insère les différents composants d'une liaison.
- (iv) Une barre d'état (en bas de la fenêtre) : fournit les informations concernant la structure en cours (les coordonnées du curseur ainsi que le rang du mode sélectionné).

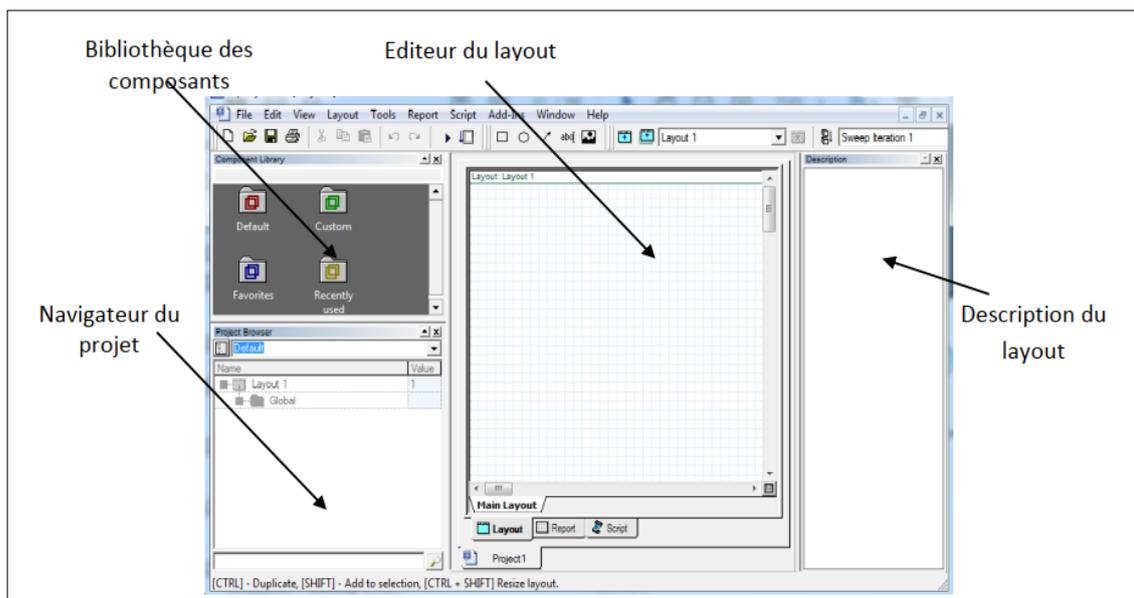


Figure (2.3) : L'interface de travail sur OptiSystem

### ▪ La bibliothèque

Elle contient tout type de modèles qui permettent de réaliser les différents schémas blocs: entrées, régénérateurs, codeurs, modulateur, filtres, ... Figure (2.4).

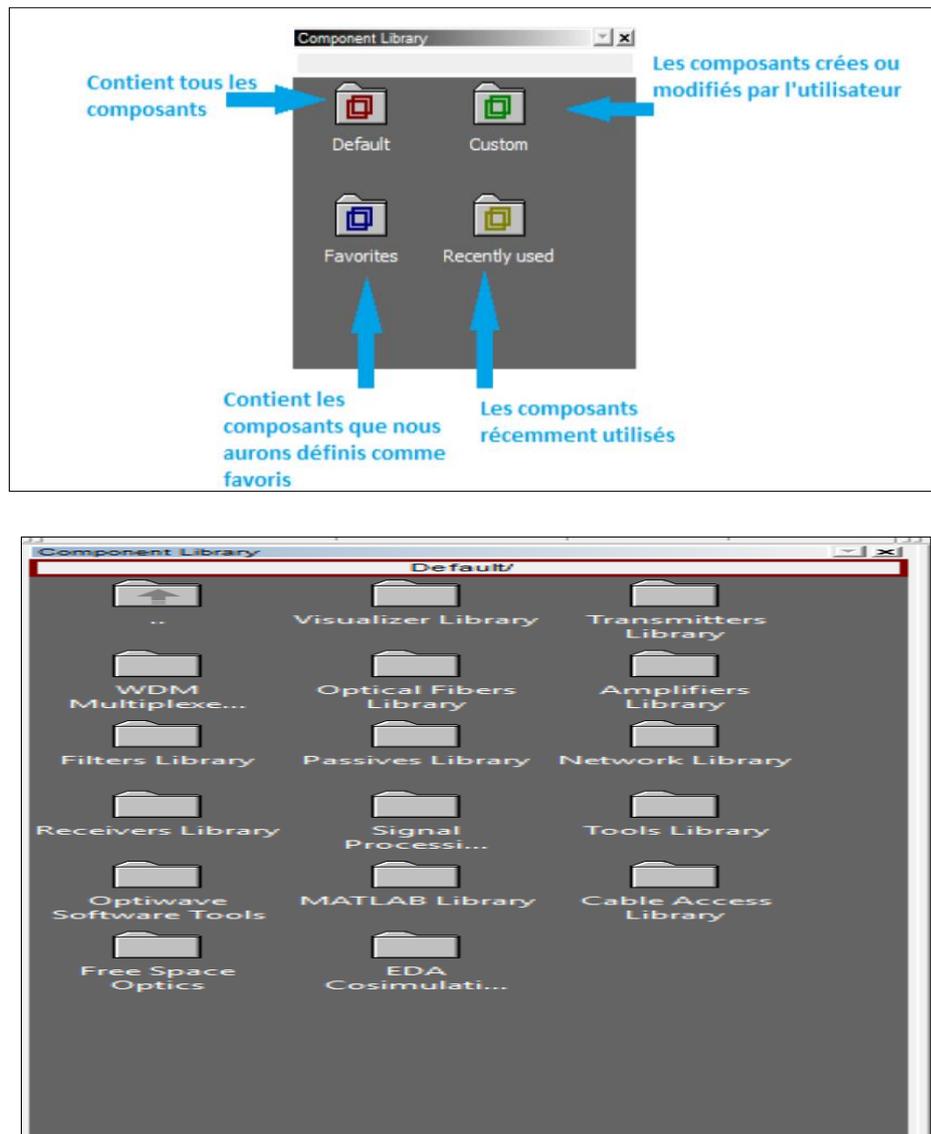


Figure (2.4) : Différents composants de la bibliothèque d'OptiSystem

### ▪ Code couleurs des signaux

Il y'a cinq types de signaux dans la bibliothèque du logiciel OptiSystem, Figure (2.5). Ils sont tous régis par un code de couleur comme le montre le tableau (2.1).

Binary	Red
M-Ary	Dark Red
Electrical	Blue
Optical	Green
Any Type	Dark Green

Tableau (2.2) : Types de signaux dans la bibliothèque du logiciel OptiSystem

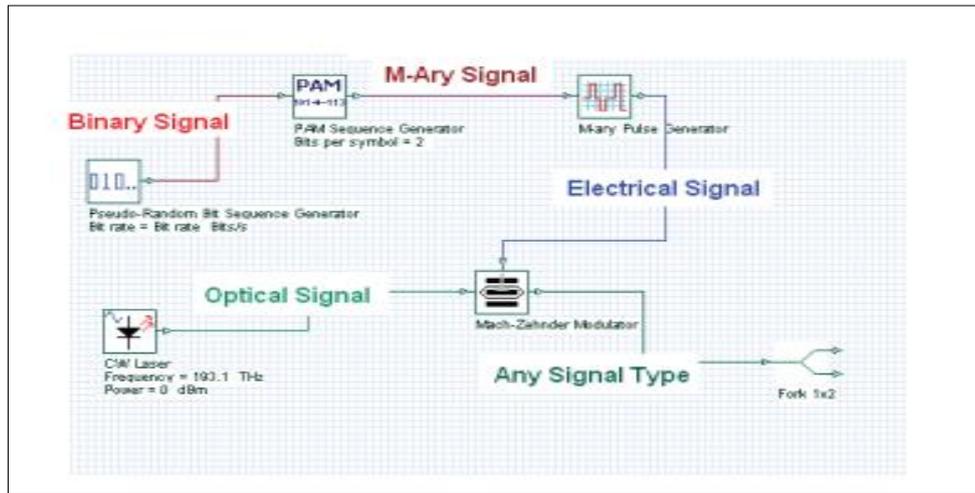


Figure (2.5) : Exemple de signaux avec le code des couleurs dans l’OptiSystem

▪ **Outils de visualisation**

OptiSystem est très riche en outils de visualisation, qui permettent d’afficher les résultats à pour chaque composant utilisé lors de la conception. On trouve les visualisateurs optiques et électriques, figure (2.6).

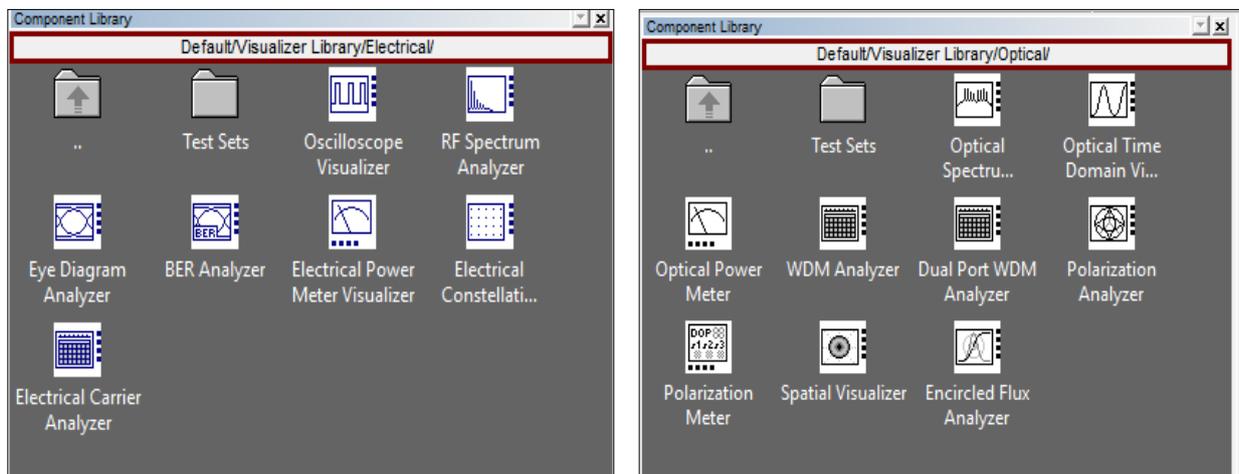


Figure (2.6) : Outils de visualisations électriques et optiques pour l’OptiSystem

### 2.4.2 Conception d'une chaîne de transmission optique sous OptiSystem

Un système de communication optique est représenté par le schéma synoptique de la figure (2.7).

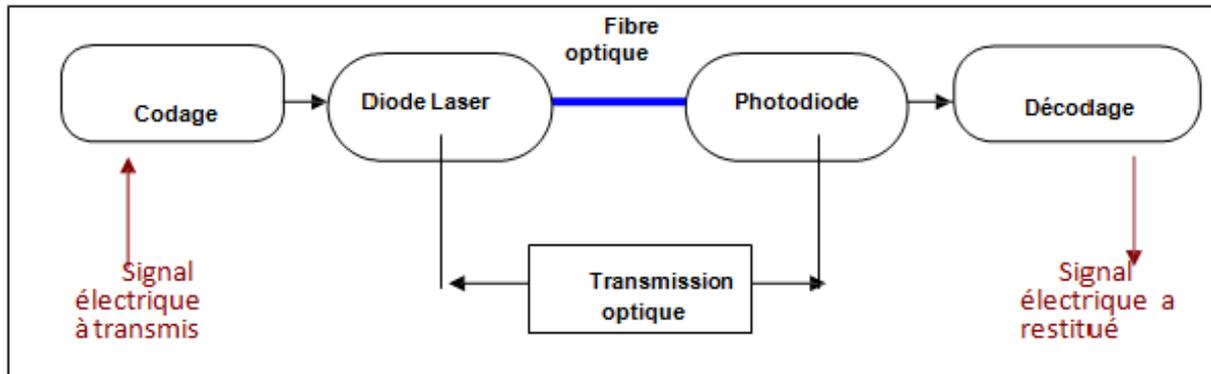


Figure (2.7) : Schéma synoptique général d'une chaîne de transmission optique

La figure (2.8), illustre un schéma de la même chaîne sous l'interface graphique du logiciel OptiSystem.

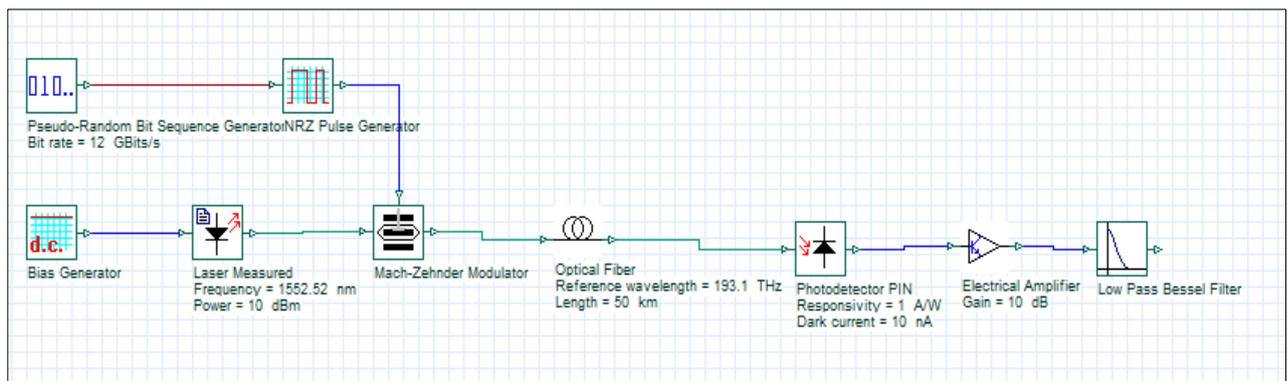


Figure (2.8) : Schéma d'un system de transmission par fibre optique sous le logiciel OptiSystem

### 2.4.3 Simulation d'un Récepteur optique

Comme le but de notre travail est la simulation des différentes sources de bruits dans les photodétecteurs, nous n'avons considéré que le bruit additionnel pour les récepteurs. C'est-à-dire, nous n'avons pas pris en considération le bruit d'intensité de la source laser. A cet effet nous avons utilisé un atténuateur à la place d'une fibre optique.

En effet, les atténuateurs optiques peuvent être utilisés dans deux cas : soit pour simuler l'atténuation d'une grande longueur de la fibre optique, soit pour atténuer un signal lumineux trop fort, envoyé par l'émetteur optique, afin que ce signal ne sature pas le récepteur.

Nous avons utilisé le même schéma pour les deux types de photo détecteurs et pour la simulation des sources de bruits, nous avons considéré à chaque fois un seul type de bruit pour voir son influence sur les performances de transmission.

Les schémas de simulations et leurs résultats correspondants, sont représentés dans le chapitre qui suit.

# *Chapitre 3*

## **RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS**

### 3.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de présenter les résultats des montages utilisés via le simulateur OptiSystem, afin d'analyser les performances des photodétecteurs utilisés.

En premier, nous avons d'abord cherché la valeur de la puissance minimale nécessaire pour le fonctionnement du photodétecteur pour la PIN et l'APD, et on a étudié l'influence de l'atténuation sur la valeur de la puissance minimale.

Par la suite, nous abordons les sources de bruits dans les photodétecteurs à savoir le bruit thermique et le bruit quantique, et nous avons étudié leur influence sur la qualité de transmission, pour les deux types de photodétecteurs. Enfin, nous présentons une comparaison des deux structures de photodiodes (PIN & APD) en termes de leurs performances.

### 3.2 Détermination de la puissance d'entrée minimale du photodétecteur

Dans cette partie, nous allons déterminer la puissance optique minimale nécessaire à un récepteur pour fonctionner de manière fiable avec un TEB de  $10^{-9}$  pour les deux types de photodétecteur (PIN et APD).

#### 3.2.1 Puissance minimale à Photodiode PIN

Cette chaîne est composée d'un générateur des bits aléatoires, une diode laser de puissance 0 dBm à la longueur d'onde de  $1.55 \mu\text{m}$  ( $f=193.1\text{GHz}$ ), un modulateur Mach Zehnder et un atténuateur de 35 dB.

A la réception on a une photodiode PIN de sensibilité ( $S=1 \text{ A/W}$ ) et un courant d'obscurité ( $I_{\text{obs}}=10\text{nA}$ ), suivie d'un filtre passe-bas. Figure (3.1).

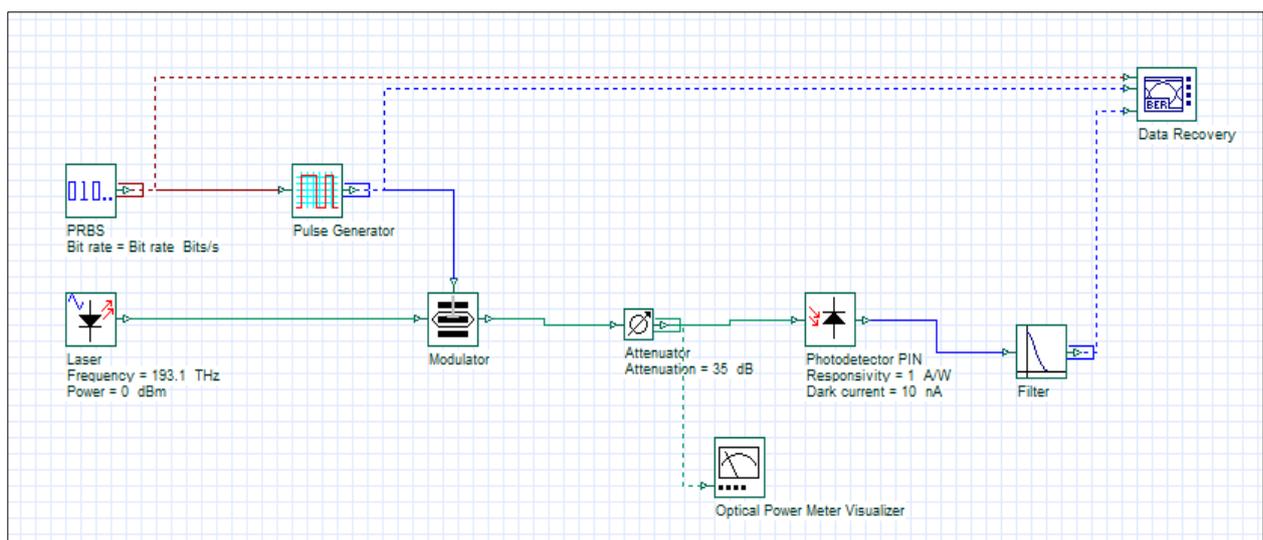


Figure (3.1) : Chaîne de transmission avec la photodiode PIN

À l'aide du power meter, nous relevons une puissance minimale de -38.2dBm.

### 3.2.2 Puissance minimale à la Photodiode APD

Cette chaîne est composée d'un générateur des bits aléatoires, une diode laser de puissance 0 dBm à la longueur d'onde de 1.55 μm (f=193.1GHz), un modulateur Mach Zhender et un atténuateur de 35 dB.

À la réception on a une photodiode APD (avec un gain 3) de sensibilité (S=1 A/W) et un courant d'obscurité (Iobs=10nA), suivie d'un filtre passe-bas. Figure (3.2).

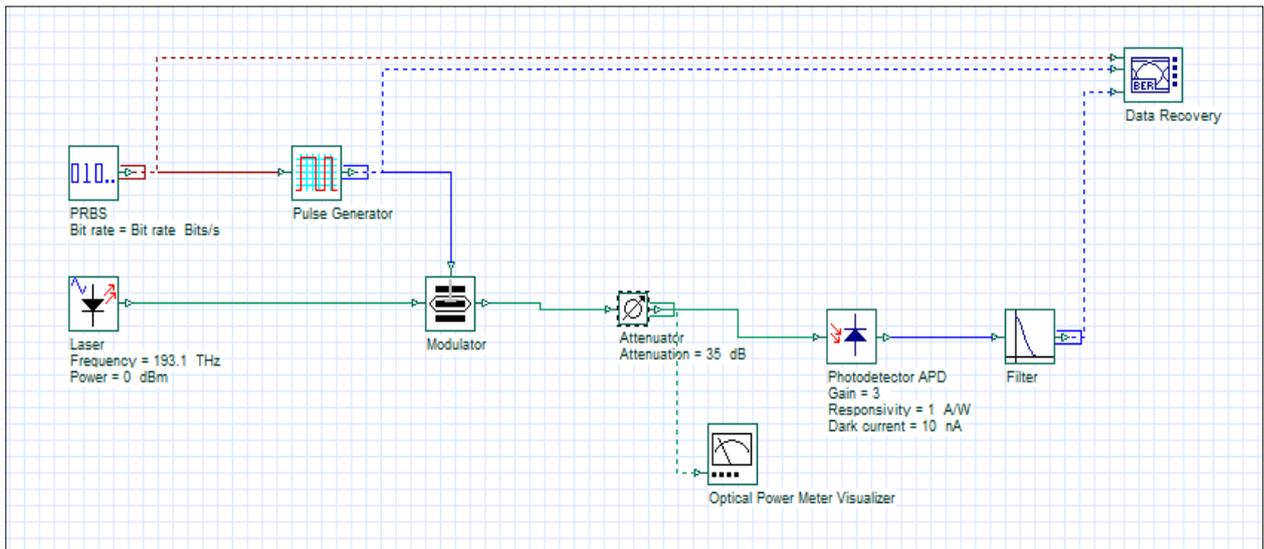


Figure (3.2) : Chaîne de transmission avec la photodiode APD

Le power meter indique une puissance minimale de l'APD qui vaut : -41,4 dBm.

- On constate que chaque type de photorécepteur exige une puissance minimale qui est nécessaire à son bon fonctionnement. Cette puissance minimale requise dépend de l'atténuation et des sources de bruits apportés dans la liaison.

### 3.2.3 Variation de la puissance minimale du photodétecteur avec l'atténuation

Pour voir l'effet de l'atténuation sur la puissance optique requise d'un photodétecteur, nous avons varié l'atténuation de 27dB à 35dB, et à chaque fois en relevant la puissance reçue au niveau du récepteur, ainsi que le BER et le Q qui conviennent.

Le tableau (3.1) résume les différents résultats obtenus.

Atténuation (dB)	$P_{\min}$ (dBm)	BER	Facteur Q
27	-30.148	$5.89545 \cdot 10^{-51}$	14.9657
28	-31.148	$4.63658 \cdot 10^{-36}$	12.4803
29	-32.148	$2.47335 \cdot 10^{-25}$	10.3318
30	-33.148	$9.61168 \cdot 10^{-18}$	8.49645
31	-34.148	$1.87298 \cdot 10^{-12}$	6.94475
32	-35.148	$6.08629 \cdot 10^{-10}$	6.07575
33	-36.148	$4.03643 \cdot 10^{-7}$	4.93141
34	-37.148	$3.24907 \cdot 10^{-5}$	3.99175
35	-38.148	$6.27191 \cdot 10^{-4}$	3.22399

Tableau (3.1) : Variation de la puissance minimale  $P_{\min}$ , le BER et le facteur Q en fonction de l'Atténuation

➤ Nous constatons que la puissance requise diminue quand l'atténuation augmente.

Nous avons exploité les résultats du tableau ci-dessus dans un logiciel de graphisme (Microcal Origin). La figure (3.3) montre la variation du facteur de qualité en fonction de l'atténuation.

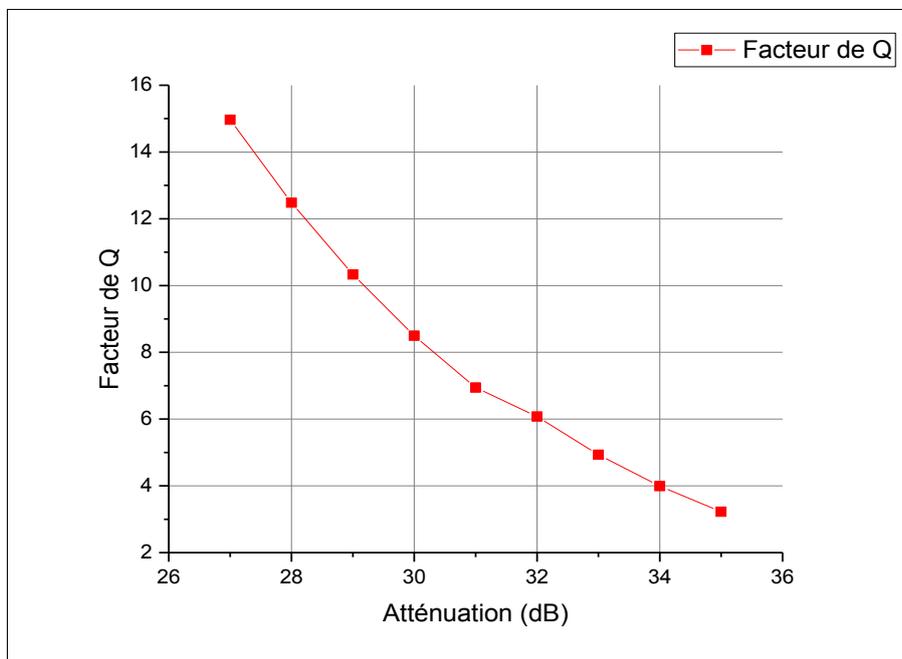


Figure (3.3) : Variation du Facteur Q en fonction de l'Atténuation

- Nous constatons que le facteur de qualité diminue quand l'atténuation augmente, ce qui influe sur la qualité de transmission. Nous pouvons déduire que l'atténuation acceptée et permettant d'avoir un facteur de qualité de 6, est de l'ordre de 32dB.

La figure (3.4) monte la variation du BER en fonction du facteur de qualité Q.

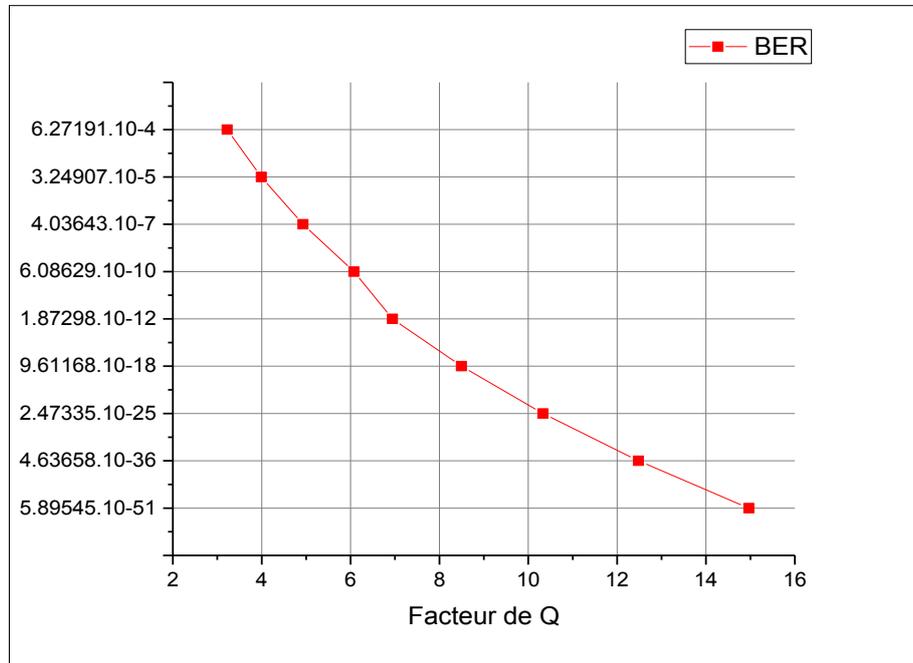


Figure (3.4) : Variation du BER en fonction du Facteur Q

### 3.3 Influence des sources de bruits des photodétecteur sur la qualité du signal

Comme nous avons vu au chapitre 1, il existe principalement deux sources de bruit dans les photodétecteurs : le bruit thermique et le bruit quantique (grenaille).

Cette partie de simulation concerne la simulation sous OptiSystem des sources de bruit dans la photodiodes (PIN & APD) séparément. Le but est d'avoir leur influence sur la dégradation du signal. Le filtre passe bas à une fréquence de coupure avec la même valeur que le débit.

#### 3.3.1 Simulation des sources de bruit dans la photodiode PIN

##### 3.3.1.1 Le bruit quantique (shot noise)

On considère en premier lieu que la photodiode est sans bruit thermique et que la seule source de bruit est celle du bruit quantique.

Le montage suivant illustre le schéma de simulation utilisé pour la photodiode PIN, figure (3.6).

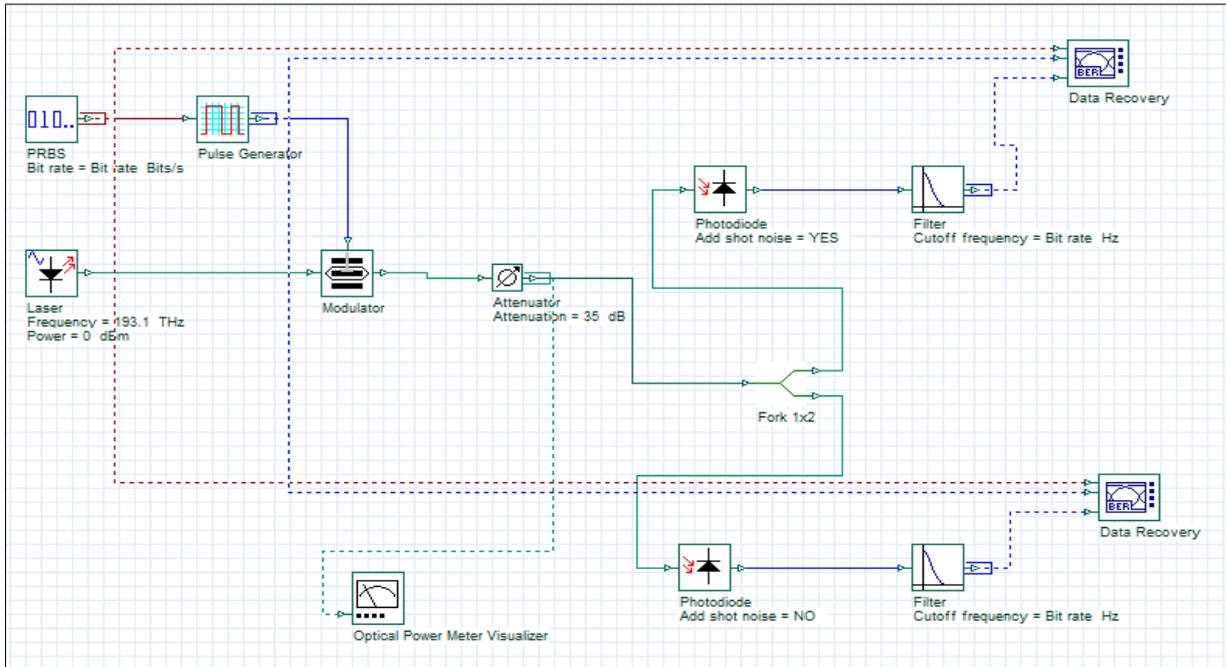


Figure (3.6) : Source de bruit dans la photodiode PIN (bruit quantique)

La figure (3.7) représente le diagramme de l'œil obtenu en considérant que le bruit quantique dans la photodiode PIN.

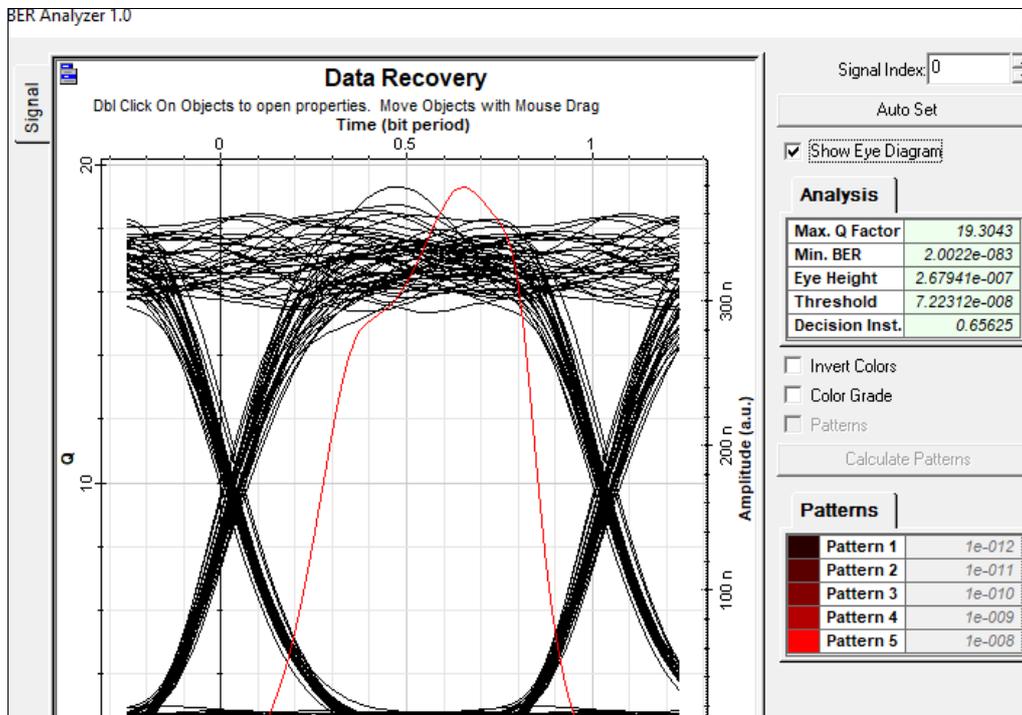


Figure (3.7) : Diagramme de l'œil dû au bruit quantique (PIN)

- Nous constatons que le bruit quantique est indépendant de l'amplitude du signal et que le facteur Q vaut 19.30.

### 3.3.1.2 Le bruit thermique

En second lieu, nous considérons la photodiode sans le bruit quantique, et que la seule source de bruit est celle du bruit thermique, en utilisant le même schéma de simulation de la figure (3.6). Dans ce cas, le digramme de l'œil obtenu dans est représenté par la figure (3.8).

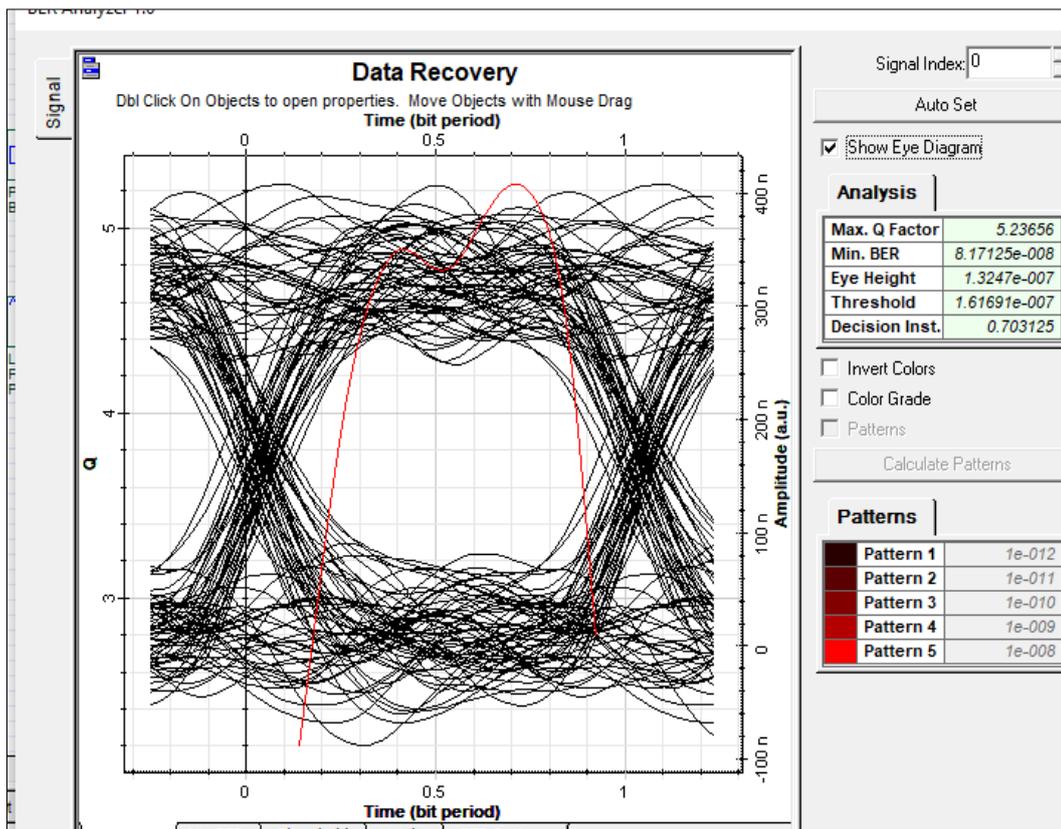


Figure (3.8) : Diagramme de l'œil dû au bruit thermique (PIN)

- On constate dans ce cas, que le bruit thermique dépend de l'amplitude du signal et que le facteur Q vaut 5.23.

Comme le bruit thermique est le plus prononcé, nous avons varié la valeur de ce bruit afin d'avoir la dégradation sur le signal.

#### 3.3.1.2.1 Influence du bruit thermique sur la photodiode PIN

Nous avons considéré le même schéma de simulation où on a considéré que le bruit thermique, et nous avons varié ça valeur et relever à chaque fois la valeur du BER ainsi que le Q.

Le tableau (3.2) résume les valeurs obtenues.

Bruit Thermique ( W/Hz)	BER	Facteur Q
$1.85 \cdot 10^{-25}$	$8.17125 \cdot 10^{-8}$	5.23656
$1.80 \cdot 10^{-25}$	$5.47352 \cdot 10^{-8}$	5.31006
$1.75 \cdot 10^{-25}$	$3.58439 \cdot 10^{-8}$	5.3867
$1.70 \cdot 10^{-25}$	$2.29017 \cdot 10^{-8}$	5.46669
$1.65 \cdot 10^{-25}$	$1.42449 \cdot 10^{-8}$	5.55029
$1.60 \cdot 10^{-25}$	$8.60338 \cdot 10^{-9}$	5.63778
$1.55 \cdot 10^{-25}$	$5.03208 \cdot 10^{-9}$	5.72947
$1.50 \cdot 10^{-25}$	$2.84068 \cdot 10^{-9}$	5.8257
$1.45 \cdot 10^{-25}$	$1.5428 \cdot 10^{-9}$	5.92687
$1.40 \cdot 10^{-25}$	$8.01808 \cdot 10^{-10}$	6.03342
$1.35 \cdot 10^{-25}$	$3.97329 \cdot 10^{-10}$	6.14582
$1.30 \cdot 10^{-25}$	$1.86626 \cdot 10^{-10}$	6.26466
$1.25 \cdot 10^{-25}$	$8.25533 \cdot 10^{-11}$	6.39055
$1.20 \cdot 10^{-25}$	$3.41389 \cdot 10^{-11}$	6.52424
$1.15 \cdot 10^{-25}$	$1.30811 \cdot 10^{-11}$	6.66654
$1.10 \cdot 10^{-25}$	$4.5966 \cdot 10^{-12}$	6.81845

Tableau (3.2) : Valeurs du BER et le facteur Q en fonction de bruit thermique

La figure (3.9) montre l'influence du bruit thermique sur le facteur Q

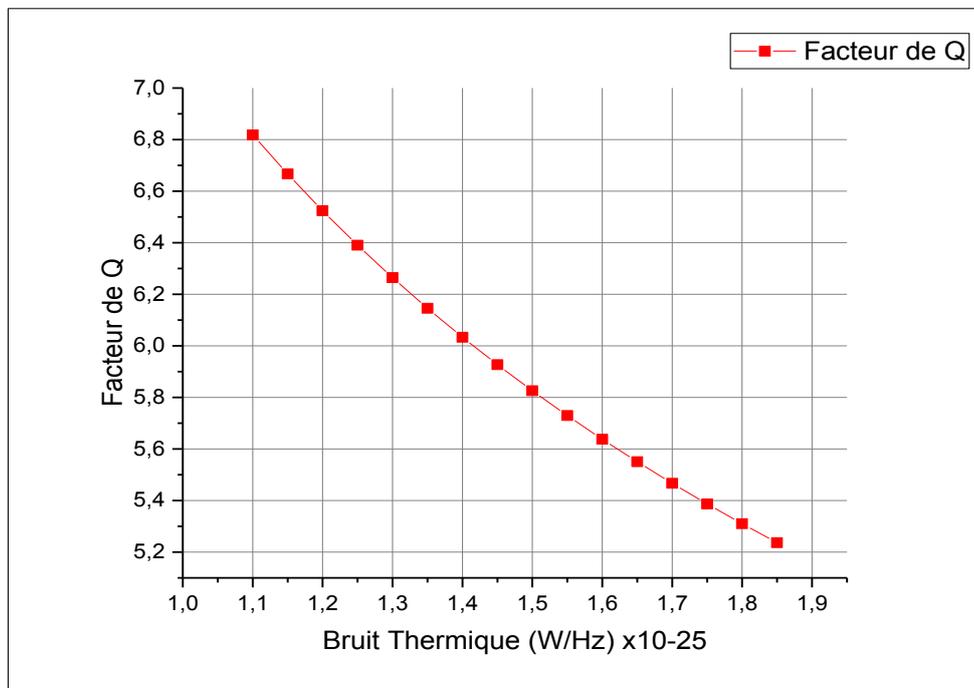


Figure (3.9) : Variation du Facteur Q en fonction du bruit thermique pour la photodiode PIN

La figure (3.10) montre l'influence du bruit thermique sur le taux d'erreur binaire (BER).

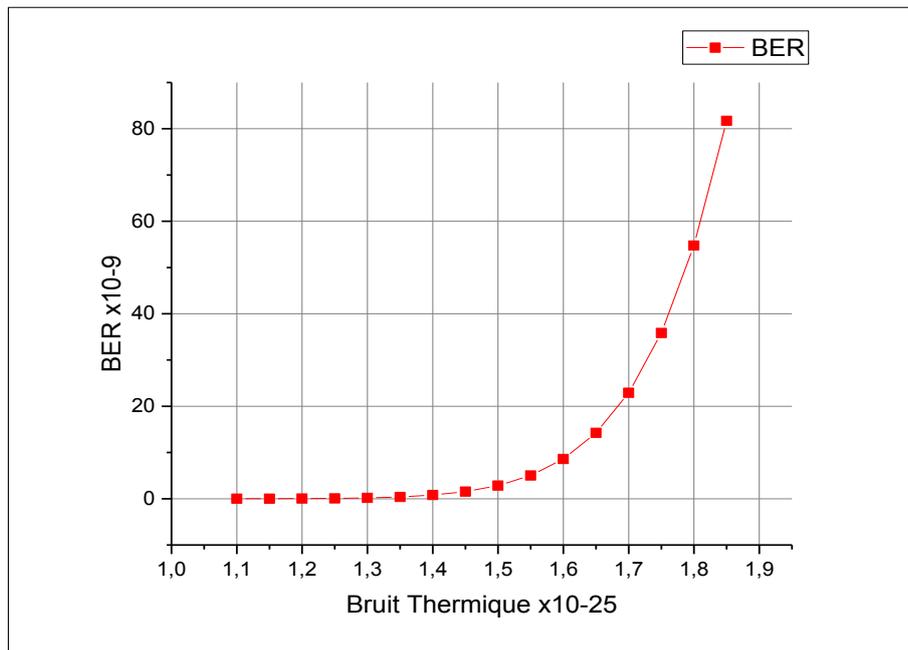
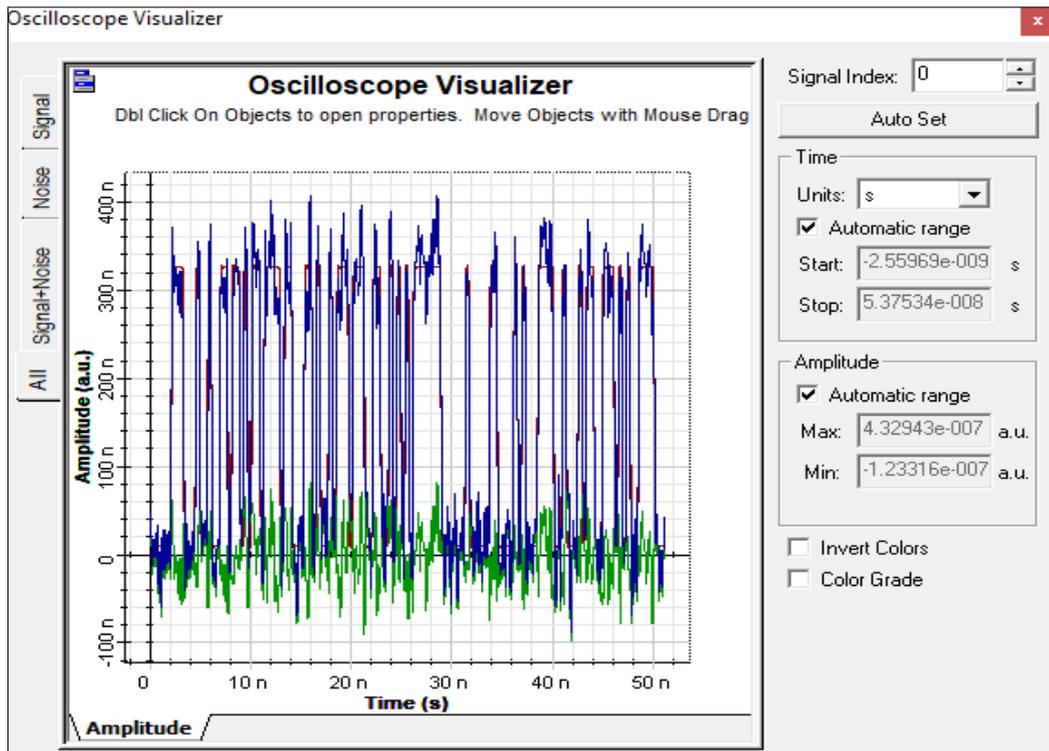


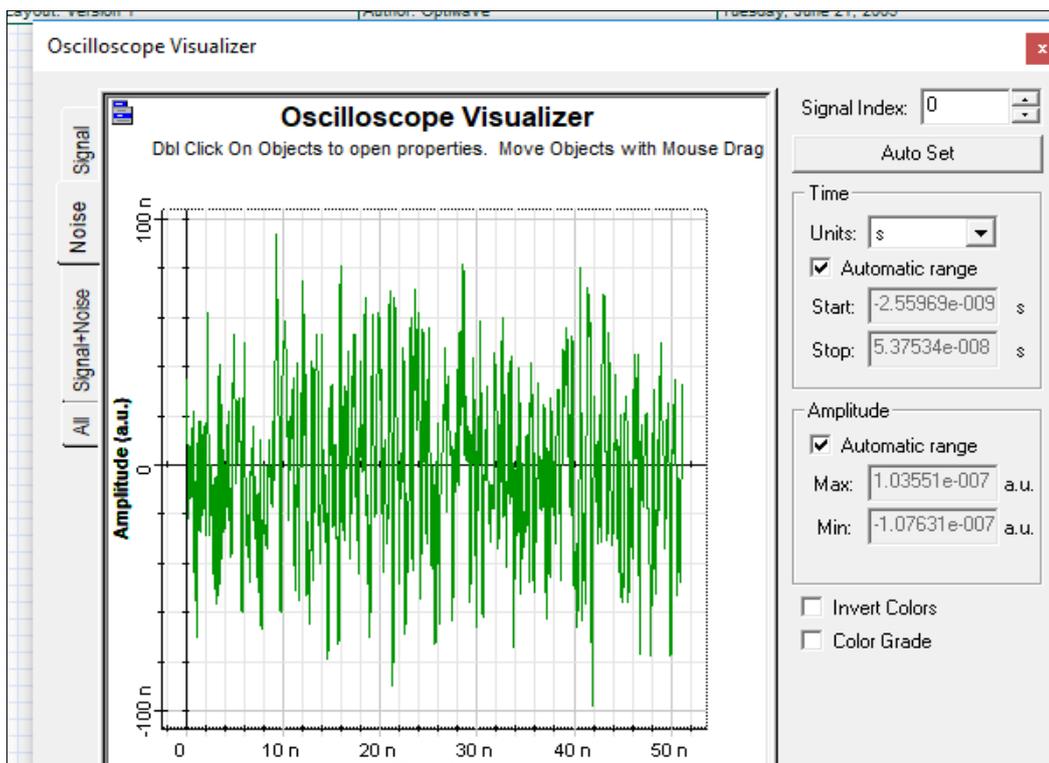
Figure (3.10) : Variation de BER en fonction du bruit thermique dans la PIN

- Nous constatons clairement que le facteur de qualité diminue et le BER augmente à chaque fois que le bruit thermique augmente.

Pour mieux visualisé l'influence du bruit thermique sur la qualité du signal, nous présentons dans la figure (3.11), le signal obtenu ainsi que le bruit thermique seul pour la photodiode PIN.



a)



b)

Figure (3.11) : Amplitude du signal de sortie pour la PIN

a) : Signal avec bruit, b) bruit thermique seul

### 3.3.2 Sources de bruit dans la photodiode à avalanche (APD)

#### 3.3.2.1 Le bruit quantique (shot noise)

On considère en premier lieu que la photodiode APD est sans bruit thermique et que la seule source de bruit est celle du bruit quantique.

Le montage de la figure (3.12), décrit le schéma de simulation utilisé pour la photodiode APD de gain 3.

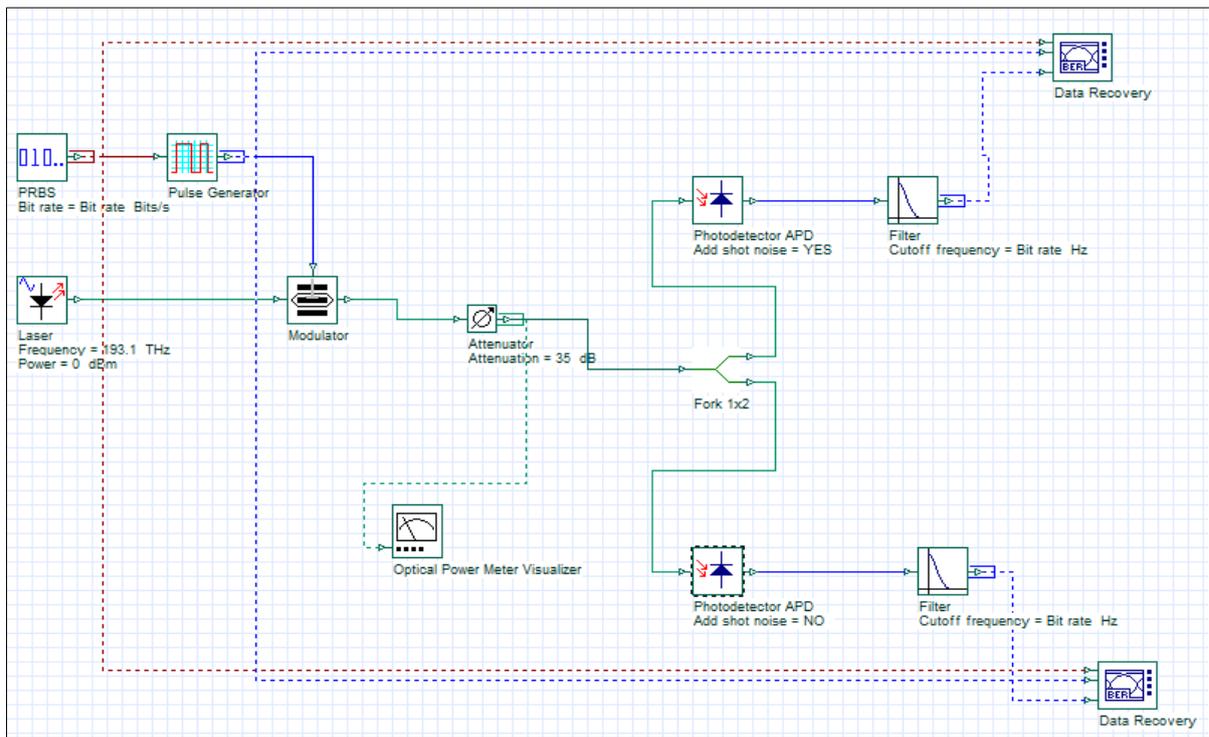


Figure (3.12) : Source de bruit dans la photodiode APD (bruit quantique)

La figure (3.13) représente le diagramme de l’œil obtenu en considérant que le bruit quantique dans la photodiode APD.

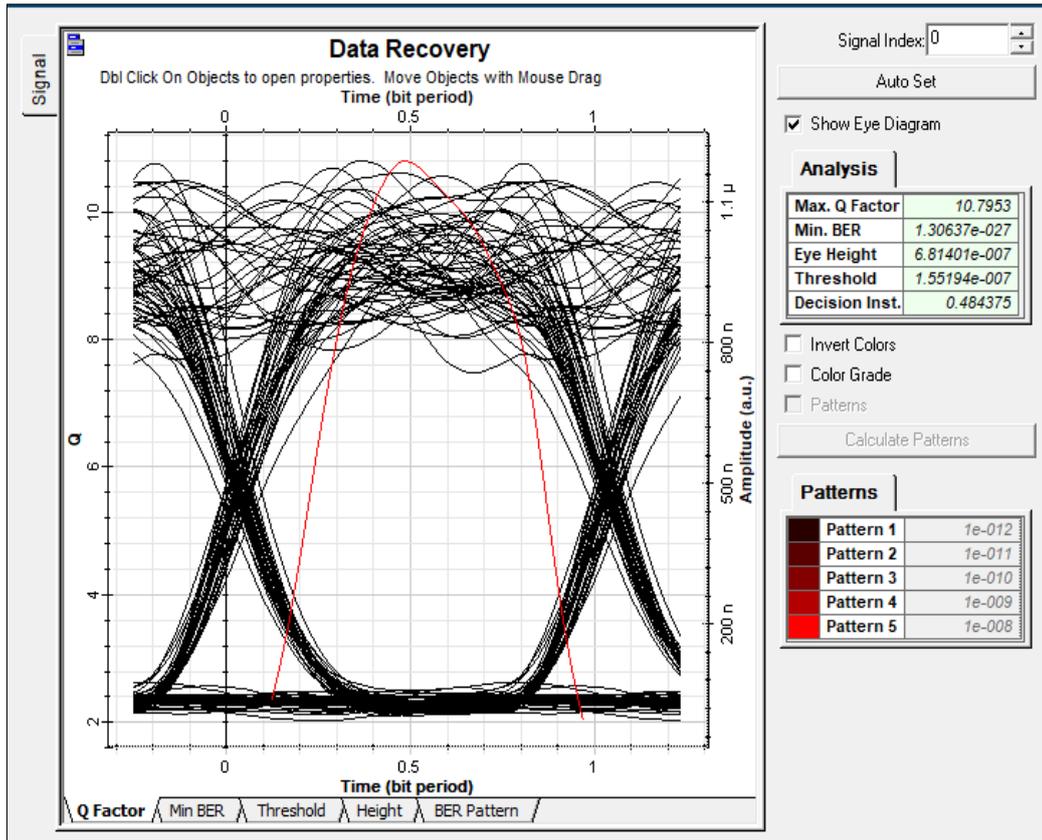


Figure (3.13) : Diagramme de l’œil dû au bruit Quantique (APD)

- Nous constatons que le bruit quantique dépend de l’amplitude de signal et le facteur Q vaut 10.79.

### 3.3.2.2 Le bruit thermique

En second lieu, nous considérons la photodiode APD est sans bruit quantique, et que la seule source de bruit est celle du bruit thermique.

Dans ce cas, le digramme de l’œil obtenu dans est représenté par la figure (3.14).

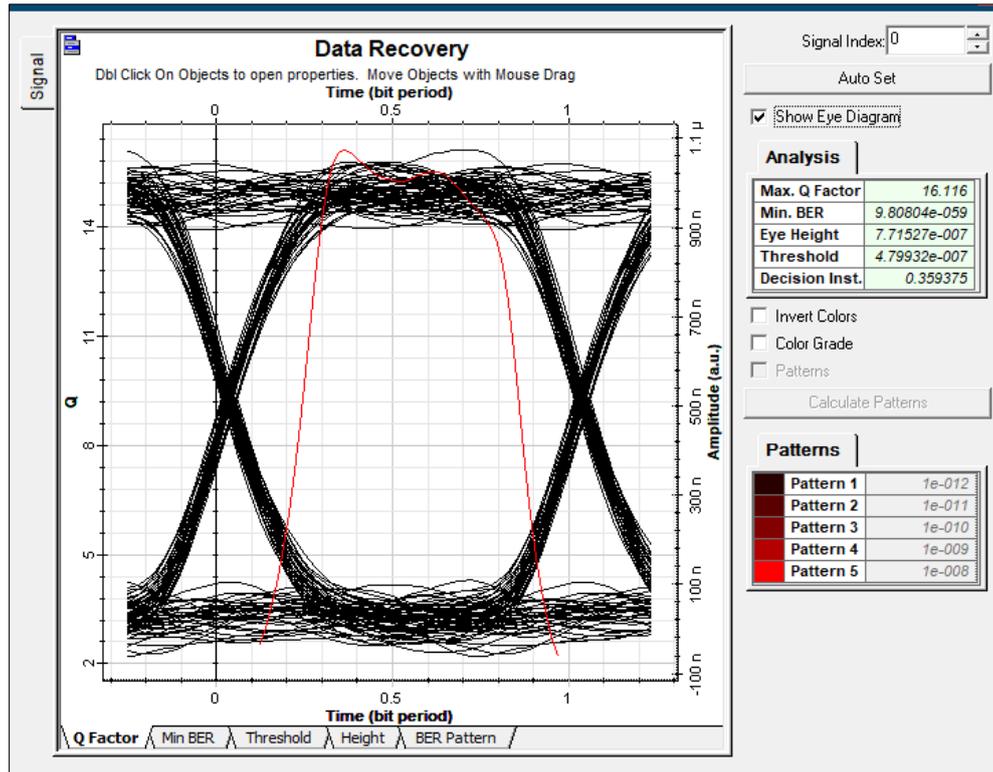


Figure (3.14) : Diagramme de l’œil dû au bruit thermique dans l’APD

- On constate dans ce cas que le bruit thermique est indépendant de l’amplitude du signal et la valeur du facteur Q vaut 16.

Comme le bruit quantique est le plus prononcé, nous avons étudié l’influence de ce bruit sur la qualité du signal.

### 3.3.2.2.1 Influence du bruit quantique (shot noise) sur la photodiode à avalanche

Nous avons fait varier le facteur de multiplication (Gain), de la photodiode APD de 3 à 21.

Nous relevons à chaque fois la valeur du taux d’erreur binaire correspondant ainsi que le facteur Q. Le but recherché est l’influence du bruit quantique de la photodiode APD sur la qualité de transmission du modèle établis.

Le tableau (3.3) résume les valeurs obtenues pour le BER et le facteur Q.

Facteur de multiplication (M)	BER	Facteur Q
3	$5.71.10^{-20}$	9.06761
5	$3.90978.10^{-17}$	8.31517
7	$8.04541.10^{-14}$	7.34957
9	$1.77835.10^{-11}$	6.58598
11	$7.80932.10^{-10}$	5.99651
13	$1.21701.10^{-8}$	5.53161
15	$9.64225.10^{-8}$	5.15539
17	$4.82764.10^{-7}$	4.84385
19	$1.7492.10^{-6}$	4.58081
23	$1.20181.10^{-5}$	4.15873

Tableau (3.3) : Valeurs du BER et Q en fonction du facteur de multiplication de la photodiode APD

La figure (3.15) montre la variation du facteur Q en fonction du bruit quantique de la photodiode APD.

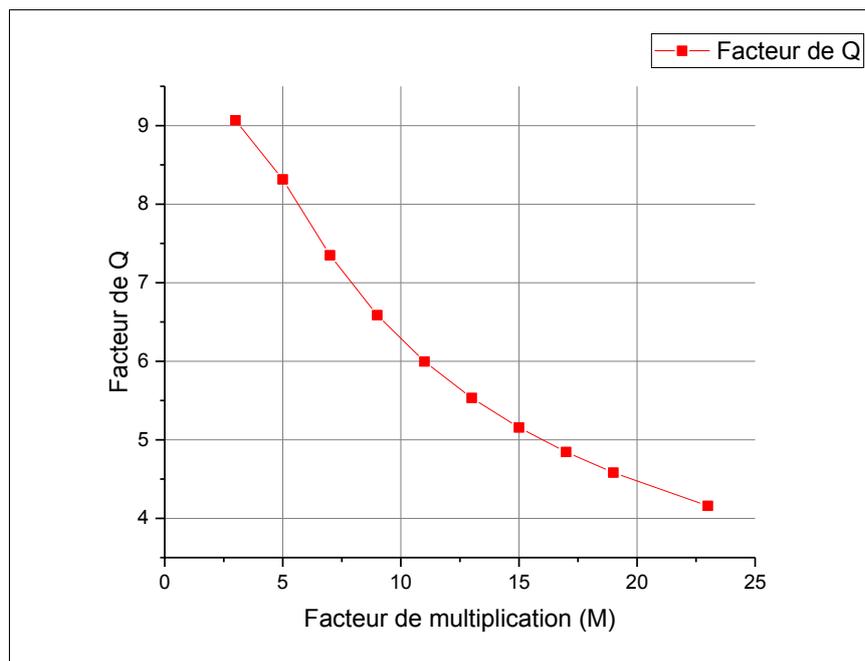
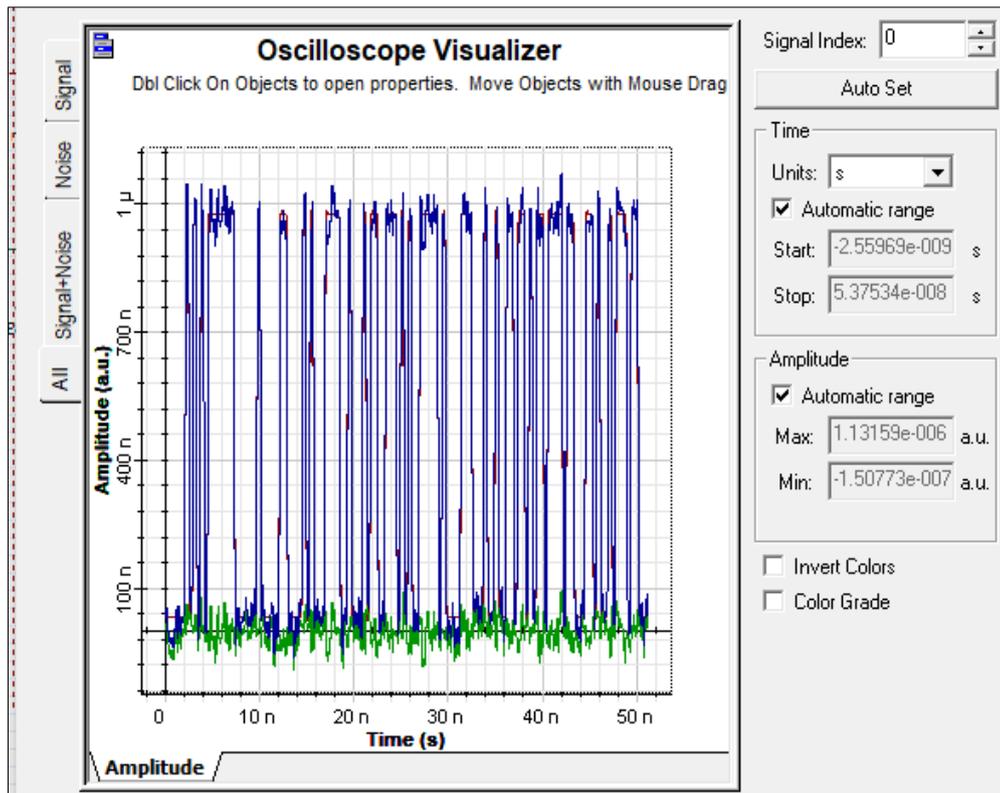


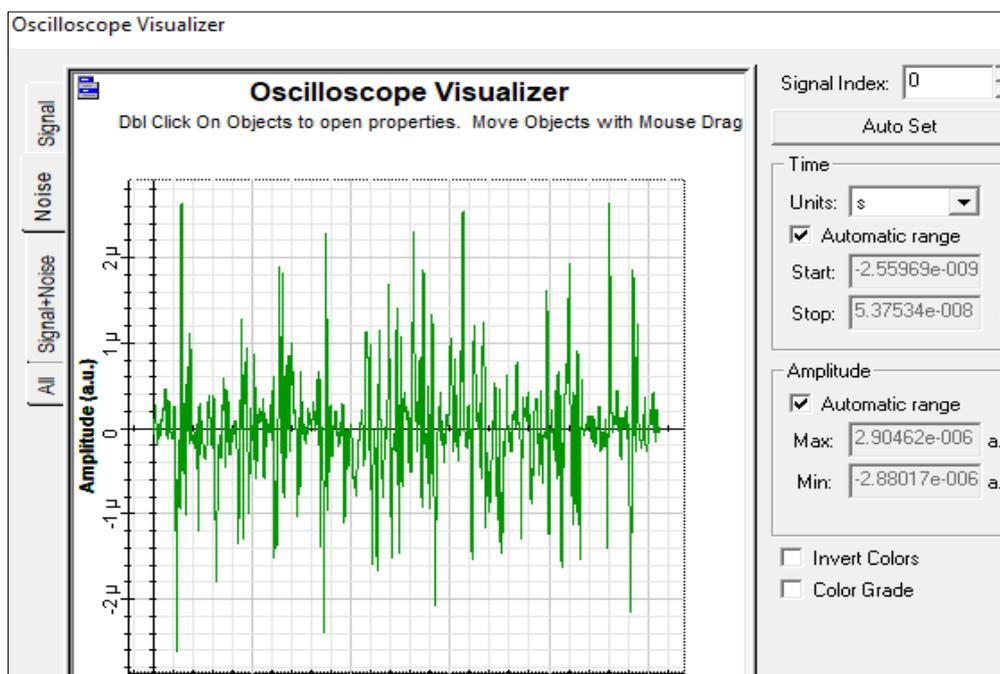
Figure (3.15) : Variation du facteur de qualité avec le facteur de multiplication M (APD)

- On constate que le facteur de qualité diminue quand le facteur de multiplication (M) augmente. Ceci est la conséquence du bruit quantique.

Pour mieux voir l'influence du bruit quantique sur le signal obtenu, on vous présente le résultat affiché par l'outil de visualisation du logiciel OptiSystem, figure (3.16).



a)



b)

Figure (3.16) : Amplitude du signal de sortie pour l'APD

a) signal avec bruit, b) : bruit quantique seul

### 3.4 Comparaison entre les deux structure PIN et APD

Nous avons effectué une étude comparative entre les deux types de photo détecteurs simulés : la photodiode PIN et la photodiode à avalanche. On a utilisé un coupleur passif qui fait envoyer le même signal une fois sur la photodiode PIN et l'APD respectivement. Le but de cette simulation est de comparer leurs performances en termes de sensibilité, bruit d'obscurité, la puissance d'entrée et le débit de transmission.

#### 3.4.1 Influence de la sensibilité

Nous avons varié la sensibilité  $S$  de 0.1 à 1 A/W pour les deux types de photodétecteurs, et pour chaque valeur considérée, nous avons pris les valeurs du rapport signal sur bruit depuis les outils de visualisation électrique. Nous avons pris une puissance d'entrée de 0dBm.

Le tableau (3.4) résume les résultats ainsi obtenus.

	PIN	APD
Sensibilité (A/W)	Signal/Bruit (dBm)	Signal/Bruit (dBm)
0.1	-54.452	-44.970
0.2	-48.492	-38.962
0.3	-44.982	-35.444
0.4	-42.487	-32.947
0.5	-40.551	-31.010
0.6	-38.969	-29.427
0.7	-37.630	-28.088
0.8	-36.471	-26.928
0.9	-35.445	-25.906
1	-34.533	-24.991

Tableau (3.4) : Valeurs du rapport Signal/Bruit en fonction de la sensibilité pour les deux photodiodes.

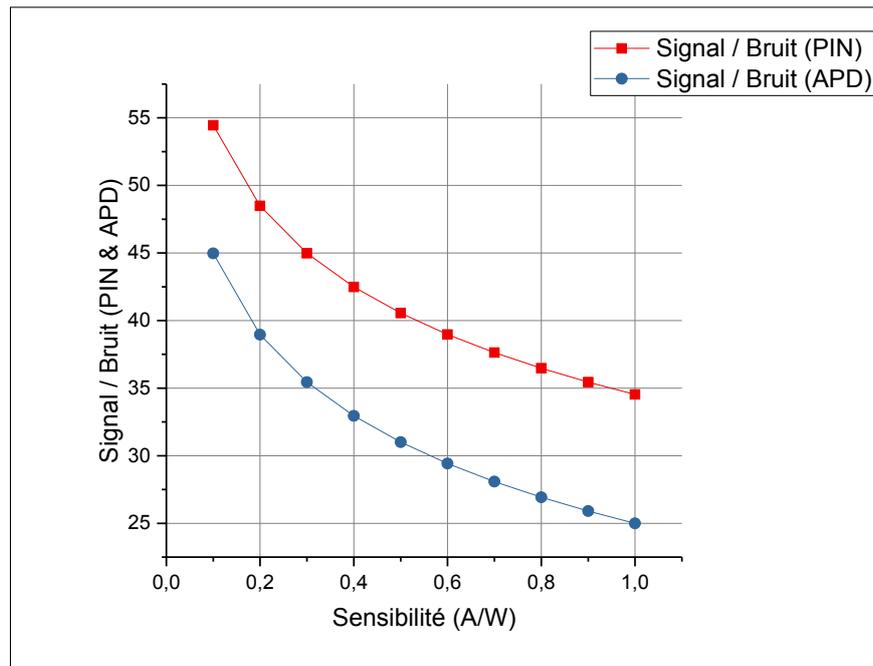


Figure (3.17) : Comparaison du rapport signal sur bruit des deux photodiodes (PIN & APD) en fonction de la sensibilité.

- Nous constatons une proportionnalité entre la sensibilité et le rapport signal sur bruit : le rapport signal sur bruit diminue quand la sensibilité augmente.
- Nous pouvons déduire que le rapport signal sur bruit devient considérable, pour une valeur de sensibilité supérieure ou égale à 0,8 A/W.

### 3.4.2 Influence de la puissance d'entrée

Nous avons varié la puissance d'entrée (puissance de la diode laser notée  $P_e$ ), de 5 à 50 mW pour les deux types de photodétecteurs, et pour chaque valeur, nous relevons les valeurs du rapport signal sur bruit depuis le visualisateur électrique du logiciel OptiSystem. Nous reportons les résultats obtenus sur le tableau (3.5).

	PIN	APD
Puissance d'entrée (mW)	Signal/Bruit (dBm)	Signal/Bruit (dBm)
5	-42.374	-32.834
10	-36.471	-26.928
15	-32.979	-23.438
20	-30.485	-20.942
25	-28.538	-18.997
30	-26.943	-17.400
35	-25.587	-16.044
40	-24.407	-14.864
45	-23.361	-13.818
50	-22.42	-12.877

Tableau (3.5) : Valeurs du rapport Signal/Bruit en fonction de la puissance d'entrée des deux photodiodes (PIN & APD)

La figure (3.18) montre l'influence de la puissance d'entrée sur le rapport signal sur bruit pour les deux photodiodes.

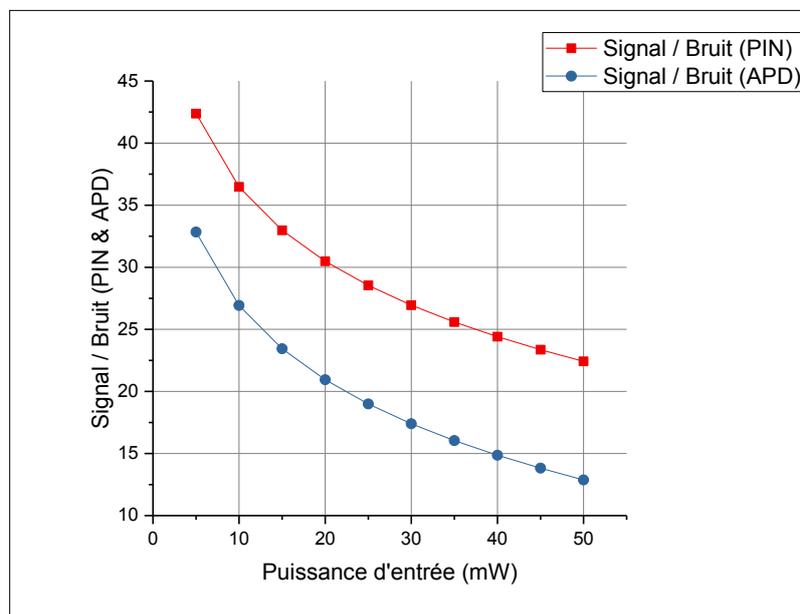


Figure (3.18) : Comparaison du rapport signal sur bruit des deux photodiodes (PIN & APD) en fonction de la puissance d'entrée.

- Nous constatons que le rapport signal sur bruit diminue quand la puissance d'entrée augmente.

- En comparant la PIN et l'APD, nous constatons que la photodiode PIN est mieux adaptée aux faibles puissances que la photodiode APD, car l'influence du bruit thermique devient négligeable. Aux fortes puissances, c'est l'APD qui devient avantageuse par rapport à la photodiode PIN.

### 3.4.3 Influence du courant d'obscurité

Nous avons varié le courant d'obscurité noté  $I_d$  de 1 à 10 nA pour les deux types de photo détecteurs. Le tableau (3.6) résume les valeurs du rapport signal sur bruit obtenus.

	PIN	APD
Courant D'obscurité (nA)	Signal/Bruit (dBm)	Signal/Bruit (dBm)
1	-36.471	-26.928
2	-36.471	-26.928
3	-36.471	-26.928
4	-36.471	-26.928
5	-36.471	-26.928
6	-36.471	-26.928
7	-36.471	-26.928
8	-36.471	-26.928
9	-36.471	-26.928
10	-36.471	-26.928

Tableau (3.6) : Valeurs du rapport Signal/Bruit en fonction du courant d'obscurité pour les deux photo détecteurs (PIN & APD).

La figure (3.19) illustre la variation du rapport signal sur bruit en fonction du courant d'obscurité pour les deux photodiodes.

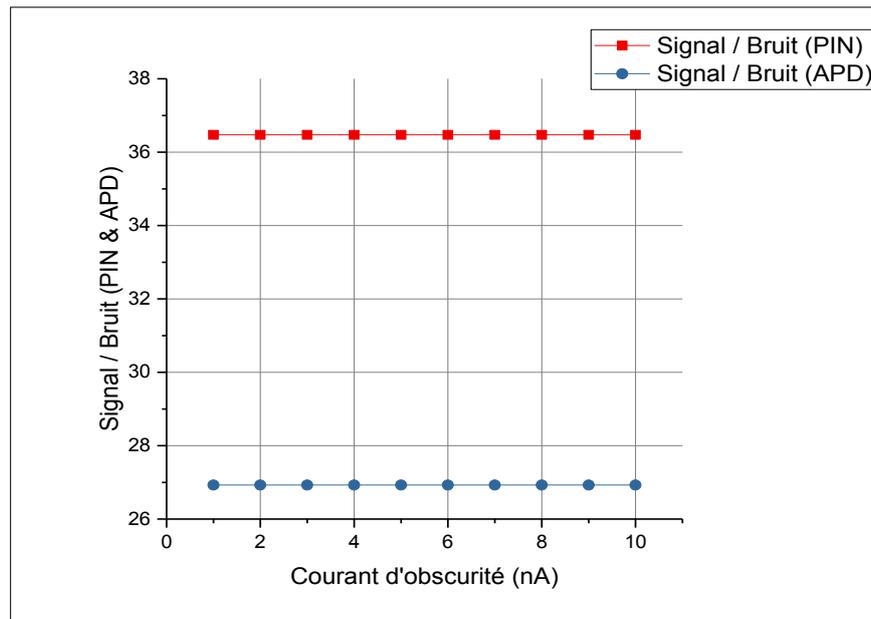


Figure (3.19) : Comparaison du rapport signal sur bruit des deux photodiodes (PIN & APD) en fonction du courant d'obscurité.

- Concernant l'influence du courant d'obscurité, nous constatons que malgré l'augmentation du courant d'obscurité, le rapport signal à bruit reste toujours constant.
- Nous pouvons déduire aussi que le courant d'obscurité est négligeable dans la photodiode APD plus que dans la PIN.

#### 3.4.4 Influence du débit de transmission

Nous avons varié le débit de transmission noté (D), de 0.5 à 40 Gbit/s, puis nous relevons à chaque fois les valeurs du rapport signal sur bruit pour les deux types de photodiodes.

Le tableau (3.7) résume les valeurs obtenues.

Débit (Gbit/s)	PIN	APD
	Signal/Bruit (dBm)	Signal/Bruit (dBm)
0.5	-57.689	-48.273
0.7	-41.398	-31.857
0.9	-39.514	-29.972
2.5	-36.471	-26.928
5	-35.783	-26.240
15	-35.446	-25.902
20	-35.411	-25.868
25	-35.542	-25.999
30	-35.559	-26.015
40	-35.479	-25.937

Tableau (3.7) : Valeurs du rapport signal/bruit en fonction du débit de transmission pour les deux photodiodes (PIN & APD)

La figure (3.20) illustre la variation du rapport signal sur bruit en fonction du débit de transmission pour les deux photodiodes.

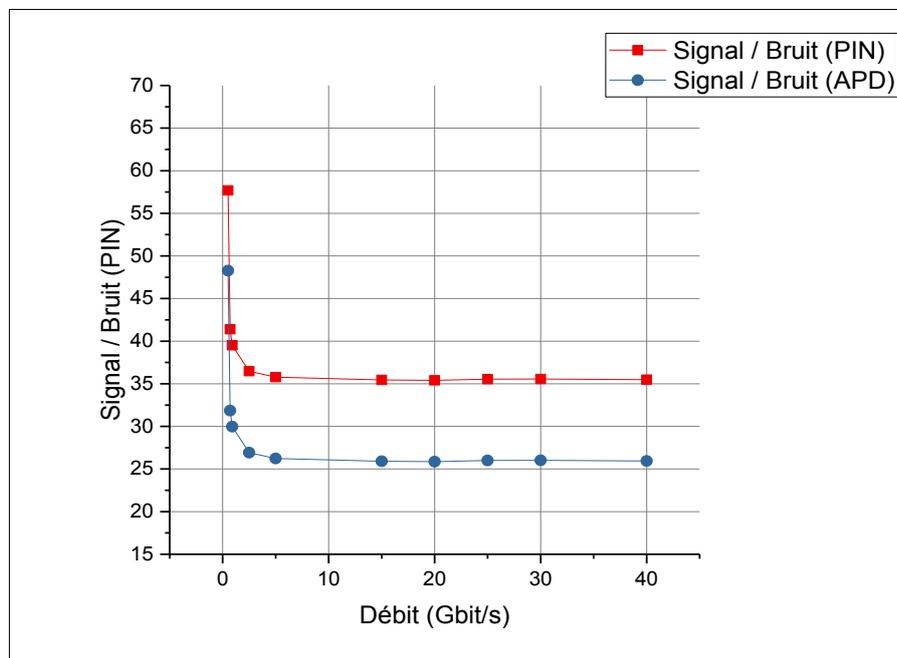


Figure (3.20) : Comparaison du rapport signal sur bruit des deux photodiodes (PIN & APD) en fonction du débit de transmission.

- L'augmentation du débit d'entrée mène à la diminution du rapport signal sur bruit.

- Pour garder les bonnes conditions de fonctionnement du système étudié, il ne faut pas dépasser la valeur de 2.5 Gbits/s.
- La photodiode APD est mieux adaptée aux forts débits que la photodiode PIN.

*Conclusion*

*Générale*

## Conclusion générale

Le travail présenté dans ce manuscrit concerne la simulation des sources de bruit dans les photo détecteurs optiques. Ces derniers sont des éléments essentiels dans la communication par fibre optique, leur rôle est de convertir en énergie électrique, la puissance optique reçue (photons). Les photodétecteurs sont de deux types : la photodiode Pin et la photodiode APD.

Le principe de toute transmission de données est de faire circuler des informations entre un émetteur et un récepteur, en minimisant les risques de déformation du signal reçu, ainsi que les sources de bruits.

En fonction des performances des systèmes de transmissions optiques, on peut utiliser soit une photodiode PIN, soit une photodiode à avalanche (APD).

Pour effectuer la simulation de tels dispositifs, nous avons utilisé le logiciel OptiSystem, qui est le plus adapté à l'analyse et à la conception des systèmes de transmissions par fibres optiques.

Pour mener à bien ce modeste travail, nous sommes tout d'abord passés par une étude théorique, qui nous a permis de se familiariser avec le sujet et de connaître les paramètres caractéristiques des structures étudiées, ainsi que les sources de bruits qui existantes : bruit quantique et bruit thermique.

On a étudié l'influence des différents types de bruits sur la qualité du signal transmis, pour les deux types de photo détecteurs PIN et APD.

Nous avons présenté une comparaison entre les deux structures : la photodiode PIN et la photodiode à avalanche, en termes de leurs principales caractéristiques.

Selon les résultats obtenus, nous avons remarqué que selon les performances recherchées de chaque type de réseau, l'utilisation de l'une ou l'autre des deux structures était préférable.

# Références bibliographiques

## Bibliographie

- [1] Pierre Lecoy, Télécommunications sur fibres optiques, Lavoisier 2009.
- [2] Jean.Michel Mur, les fibres optiques : notions fondamentales (câbles, connectique, composant, protocole, réseaux...), emi/Epsilon.
- [3] Z.sidi Ali Mebarek, Télécommunications optiques, sources, fibres et détecteurs (avec exercices corrigés), office des publications universitaires.
- [4] Houda BRAHIMI. « Etude en bruit de systèmes optiques hyperfréquences Modélisation, caractérisation et application à la métrologie en bruit de phase et à la génération de fréquence », thèse Doctorat Université Paul Sabatier – Toulouse III.
- [5] Benzeghda Sabah. ‘Etude d’un photodétecteur PIN en Germanium et en alliage SiGe, université de Constantine.
- [6] F. BRIK, Support de cours Optoélectronique, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2017.
- [7] BOUGHAR Souad et ELOTREUCH Refka, Optimisation d’une Photodiode dans une Chaîne de Transmission par Fibre Optique, université de KHEMIS MILIANA.
- [8] REBIAI- BENAHMED Saïda, Composants Optoélectroniques,
- [9] André Moliton, ‘‘Electronique et photo-électronique des matériaux et composants 2’’, Lavoisier, Paris 2009.
- [10] Taleb Ihsen Yasser, ‘‘Etude des propriétés de quelques nitrures : Application aux photodiodes’’, mémoire de magister, université ABOU BAKR BELKAÏD – TLEMEN, 2012.
- [11] Olivier MENARD, ‘‘Développement de briques technologiques pour la réalisation de diodes Schottky sur nitrure de gallium’’, thèse doctorat, université FRANÇOIS-RABELAIS DE TOURS, 2010.
- [12] Sarrah Benameur, La mise en œuvre, dans une chaîne de transmission optique, à haut débit, de filtres optiques à longueur d’onde centrale réglable, thèse de Doctorat, université de Limoge, 2015.

[13] BOUDKHILA & al, ' Introduction of the optical communications by simulating an optical high debit transmission chain using optisystem with comparaisn of optical windows', International journal of computer network and communications security, Vol.3, n°2, [2015].

## **webographie**

[14]:<http://www.physicsandradioelectronics.com/electronicdevicesandcircuits/semiconductoriodes/photodiodesymboltypes.html>

[15]:<http://lewebpedagogique.com/estechno/files/2016/02/LA-JONCTION-PN.pdf>