

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA**

**FACULTE DE TECHNOLOGIE**  
**DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE**

**N° d'ordre : 2018/INST06/87**



**DOMAINE : ELECTRONIQUE**  
**FILIERE : ELECTRONIQUE**  
**OPTION : INSTRUMENTATION**

**Mémoire présenté pour l'obtention**  
**Du diplôme de Master Académique**

**Par: ROUIBI Leila et SALMI Hadda**

**Intitulé**

**Optimisation des paramètres électriques des**  
**photodiodes à avalanche en utilisant les**  
**algorithmes génétiques multi-objectifs**

**Soutenu devant le jury composé de:**

Dr. KOUDA Souhil	Université de M'sila	Président
Dr. BENDIB Toufik	Université de M'sila	Rapporteur
Dr. BOUANAKA Fouzi	Université de M'sila	Examineur

**Année universitaire : 2017 /2018**

## Résumé :

Les photodiodes à avalanche (APD) sont largement utilisées dans plusieurs applications telles que l'instrumentation, la médecine nucléaire et l'aérospatiale, grâce à leur haute vitesse de réponse et à leur haute sensibilité. Donc, nouveaux modèles, designs, et de nouvelles approches sont nécessaires afin d'obtenir une vue globale sur les APDs et de mieux comprendre leurs performances (électriques et géométrique) et d'étudier leurs effet sur le comportement et le fonctionnement des circuits photoniques notamment les circuits à photodiodes.

L'objectif de ce travail est d'optimiser les caractéristiques nécessaires de la photodiode à avalanche en utilisant les algorithmes génétiques multi-objectifs (MOGA) afin d'améliorer leurs performances. En effet, le calcul des performances optimales de l'APD telle que le gain de multiplication et le facteur de bruit en utilisant MOGA permet au designer de prédire les paramètres technologiques électriques optimaux tel que le profile de dopage et la tension de polarisation.

**Mots clés :** Photodiode à avalanche, MOGA, gain de multiplication, le facteur de bruit.

## Abstrat :

Avalanche photodiodes (APD) are widely used in several applications such as instrumentation, nuclear medicine and aerospace, thanks to their high speed response and high sensitivity. Therefore, new models, designs, and new approaches are dedeed to obtain a global view of APDs and to better understand their performance (électrical and géométric) and to study their effect on the behavior and functioning of photonic circuits in particular photodiode circuits.

The objective of this work is to optimize the necessary characteristics of the avalanche photodiode by using multi-objective genetic algorithms (MOGA) method in order to improve their performances such as the multiplication gain and the noise factor. Using MOGA allows the designer to predict the optimal electrical technological parameters such as the doping profile and the polarization voltage.

**Keywords :** Avalanche photodiode, MOGA, multiplication gain, the noise factor.

## ملخص:

تستخدم الثنائيات الثنائية الضوئية (APD) على نطاق واسع في العديد من التطبيقات مثل الاجهزة، و الطب النووي، والفضاء الجوي، وذلك بفضل استجابتها العالية السرعة و الحساسية العالية، لذلك، النماذج الجديدة و التصاميم الجديدة، هناك حاجة الى مقاربات للحصول على رؤية عالمية لل APDs وفهم ادائها بشكل افضل (كهربائي و هندسي) ودراسة تأثيرها على سلوك وتشغيل الدارات الضوئية بما في ذلك الثنائيات الضوئية.

الهدف من هذا العمل هو تحسين الخصائص اللازمة للثنائية الضوئية باستخدام خوارزميات جينية متعددة الأهداف (MOGA) من اجل تحسين أدائها. في الواقع، وحساب الأداء الأمثل للمساعدة الإنمائية الرسمية في كسب الشحنات و عامل الضوضاء باستخدام MOGA يسمح المصمم للتنبؤ بالمعلمات العملية الكهربائية المثلى مثل تركيز المنشطات وتوتر الإستقطاب.

**الكلمات المفتاحية :** الإنهيار الثنائي الضوئي، MOGA، كسب الشحنات ، عامل الضوضاء.

## *Dédicace*

*Je remercie Allah pour m'avoir donné la force d'accomplir ce travail pour aller plus loin.*

*Je dédie ce travail à ma chère mère pour ses encouragements et ses prières tout au long de mes études Je demande à Allah que Vous donne une longue vie, mon père pour tous ce qu'il avait fait pour avoir ce résultat.*

*Je le dédie à mes frères Bilal, Abdelouheb, Walid, Kotaiba et ma sœur Faten, et je les remercie pour leurs encouragements et leurs aides ainsi que toute ma grande famille.*

*Je dédie aussi cette modeste réalisation à :*

*A mon père Mohamed et mon frère Sami, Allah aura pitié d'eux.*

*A mon encadreur Dr. BENDIB Toufik,*

*A tous mes amis sans citer les noms.*

*A mes collègues de la promotion 2017-2018.*

*Surtout mes chères Hadda et Safa.*

*A tous ceux qui aiment Leila et ceux qui Leila aime.*

**ROUIBI Leila**

## *Dédicace*

*Je dédie ce mémoire à mes très chères parents qui m'ont soutenu pendant mes études et qui m'ont donné la force et le courage de les accomplir.*

*À mes frères, à mes sœurs, ainsi qu'à tous mes amis.*

*À celle que sans elle je n'aurais accompli ce modeste travail, ma chère amie avant d'être mon amie Leila,*

*À tous ceux qui m'aiment et ceux que j'aime.*

*SALMI Hadda*

# Remerciement

*Avant tout, nous remercions **ALLAH**, le tout puissant, l'omnipotent, pour le courage et la volonté qu'il nous a inspiré.*

*Nous adresse tout particulièrement Monsieur **Dr. BENDIB Toufik** notre encadreur, nos sincères reconnaissances et nos remerciements les plus vifs, de nous avoir dirigé et guidé tout le long de ce travail. Ses critiques constructives, avec qui nous avons eu la chance de travailler, d'être dirigé, d'être enseigné.*

*Nous sommes très reconnaissantes aux membres du jury, qui nous ont fait l'honneur d'examiner notre travail. Nous les remercions pour le temps et de l'attention qu'ils ont consacrés à la lecture de notre manuscrit et pour les nombreuses améliorations qu'ils y ont apportées.*

*Nos remerciements les plus distinguées à nos chers parents dont le soutien aussi bien moral que matériel ne nous a jamais fait défaut. Pour finir, nous tenons remercier toute personne qui a contribué de près ou de loin à la réussite de ce travail.*

**L. ROUIBI**

**H. SALMI**

# Sommaire

Résumé	
Remerciements	
Dédicaces	
Sommaire.....	iv
Liste des figures.....	vii
Liste des tableaux.....	x
Liste des abréviations.....	xi
Introduction générale.....	1

## Chapitre I : Les photodiodes à avalanche

I.1 Introduction	3
I.2 Généralité sur les photodiodes à avalanches .....	3
I.2.1 Définition .....	3
I.2.2 Structure schématique d'une PDA .....	3
I.3 Physique des Photodiodes à Avalanche .....	5
I.3.1 Effet d'avalanche .....	5
I.3.2 Ionisation par impact .....	5
I.3.3 Energie de seuil d'ionisation .....	5
I.3.4 Modèles d'ionisation par impact.....	6
I.3.4.1 Modèle de Selberherr	6
I.3.4.2 Modèle de Grant.	7
I.3.4.3 Modèle d'Okuto.	7
I.3.4.4 Modèle de Toyabe .....	7
I.4 Principe du fonctionnement de la photodiode à avalanche PDA .....	8

I.5 Caractéristiques de la photodiode à avalanche .....	9
I.5.1 Gain de multiplication .....	9
I.5.2 Facteur d'excès de bruit .....	11
I.5.3 Avantages et les inconvénients de la photodiode à avalanche.....	12
I.6 Autre types des photodiodes .....	12
I.6.1 Photodiode PN .....	12
I.6.2 Photodiode PIN .....	13
I.6.3 Photodiode à cavité résonante .....	15
I.6.4 SiPM .....	15
I.7 Conclusion	16

## Chapitre II : Les algorithmes génétiques

II.1 Introduction	17
II.2 Historique et définitions des AGs	17
II.2.1 Historique .....	17
II.2.2 Définition .....	17
II.3 Domaines et application des Algorithmes Génétiques	18
II.3.1 Domaines des AGs .....	18
II.3.2 Application des AGs .....	18
II.4 Principe de fonctionnement des algorithmes génétiques Ags.....	18
II.5 Caractéristiques des algorithmes génétiques .....	20
II.5.1 Codage .....	20
II.5.1.1 Codage binaire .....	21
II.5.1.2 Codage réel .....	21
II.5.1.3 Codage de gray .....	21
II.5.2 Génération de la population initiale .....	22

II.5.2.1 Fonction d'évaluation .....	22
II.6 Opérateurs génétiques.....	22
II.6.1 Opérateur de sélection	22
II.6.2 Opérateur de croisement	24
II.6.3 Opérateur de mutation.....	25
II.6.4 Opérateur de remplacement	25
II.7 Critères de convergence	25
II.8 Grandes étapes de l'algorithme génétique	26
II.9 Avantages et inconvénients des Algorithmes génétiques	27
II.9.1 Avantages	27
II.9.2 Inconvénients	27
II.10 Conclusion	28

## **Chapitre III: simulation analytique de l'APD avec MATLAB**

III.1 Introduction	29
III.2 Description de la structure étudiée (photodiode à avalanche)	29
III.2.1 Principe de fonctionnement	29
III.2.2 Caractéristiques électriques	30
III.3 Résultat et discussion	32
III.4 Comparaison entre les modèles d'ionisation par impact (Selberherr et Grant)	37
III.4.1 Modèle de Selberherr	37
III.4.2 Modèle de Grant	38
III.5 Conclusion	41

## **Chapitre IV : Optimisation des paramètres électriques des photodiodes à avalanches en utilisant les algorithmes génétiques.**

IV.1.Introduction	42
IV.2 Influence des paramètres caractéristiques (dopage et température).....	42
IV.2.1 Effet du dopage .....	42
IV.2.1.1 Etude du champ électrique	42
IV.2.1.2 Etude de gain de multiplication, facteur de bruit et la tension de claquage.....	43
IV.4 Effet de la température .....	46
IV.4.1 Principe de la simulation .....	46
IV.4.2 Etude du gain de multiplication, la facteur de bruit et la tension de claquage	47
IV.5 Sensibilité des paramètres électriques à la température.....	49
IV.5 Identification des paramètres électriques en utilisant les algorithmes génétiques ...	51
IV.5.1 Méthodologie de calcul .....	51
IV.5.2 Définition des paramètres électriques .....	52
IV.5.3 Implémentation des paramètres de la technique (AG).....	53
IV.6 Optimisation multi-objectifs des paramètres électriques .....	54
IV.7 Résultat et discussion .....	55
IV.6 Conclusion	57
Conclusion générale	59
Bibliographie	

# Liste des figures

## Chapitre I

<b>Figure I.1</b> : photodiode PDA.....	4
<b>Figure I.2</b> : photodiode.....	4
<b>Figure I.3</b> : Symbole for photodiode.....	4
<b>Figure I.4</b> : Structure schématique d'une photodiode à avalanche avec les zones d'absorption et de multiplication séparées et allure du champs électronique dans la structure .....	4
<b>Figure I.5</b> : Processus d'ionisation par impact: (a) Etat initial avant ionisation et (b) après ionisation.....	6
<b>Figure I.6</b> : Structure d'une photodiode à avalanche. ....	9
<b>Figure I.7</b> : Représentation de la zone de multiplication pour la détermination du gain. ....	9
<b>Figure I.8</b> : Principe de fonctionnement d'une photodiode PN . ....	13
<b>Figure I.9</b> : Schéma d'une photodiode PIN classique à éclairage vertical, et photographie.....	13
<b>Figure I.10</b> : Schéma électrique équivalent d'une photodiode p-i-n .....	14
<b>Figure I.11</b> : Symbole de photodiode PIN. ....	14
<b>Figure I.12</b> : Principe de fonctionnement d'une photodiode PIN.....	15
<b>Figure I.13</b> : Structure d'une photodiode à cavité résonante SiGe – Si.....	15
<b>Figure I.14</b> : un SiPM avec la cathode (cadre interne) et l'anode (cadre externe).....	16

## Chapitre II

<b>Figure II.1</b> : Principe général des algorithmes génétiques.....	19
<b>Figure II.2</b> : Fonctionnement d'un algorithme génétique .....	20
<b>Figure II.3</b> : Illustration schématique du codage des variables réelles .....	21

<b>Figure II.4:</b> Opérateur Croisement a un point.....	24
<b>Figure.II.5 :</b> Une mutation .....	25
<b>Figure.II.6 :</b> Critère de convergence .....	26

### Chapitre III

<b>Figure III.1:</b> Principe de fonctionnement de la jonction.....	30
<b>Figure.III.2 :</b> Distribution de la charge et le champ électrique dans la jonction ..	31
<b>Figure III.3 :</b> Distribution du champ électrique dans la zone de multiplication.....	32
<b>Figure III.4 :</b> Coefficients d'ionisation (alpha et beta) dans la zone de multiplication. ....	33
<b>Figure III.5 :</b> Gain de multiplication en fonction de la tension de polarisation(injection par électron et injection par trous).....	34
<b>Figure III.6 :</b> Facteur de bruit en fonction de la tension de polarisation(injection par électron et injection par trous).....	35
<b>Figure III.7 :</b> Facteur de bruit en fonction de gain de multiplication (injection par électron et injection par trous)..	36
<b>Figure III.8 :</b> Gain de multiplication en fonction de la tension de la polarisation pour les deux modèles d'ionisation (Selberherr et Grant). ....	39
<b>Figure III.9 :</b> Facteur de bruit de multiplication en fonction de la tension de la polarisation pour les deux modèles d'ionisation (Selberherr et Grant).....	40
<b>Figure III.10 :</b> Facteur de bruit en fonction de gain de multiplication pour les deux modèles d'ionisation (Selberherr et Grant). ....	40

### Chapitre IV

<b>Figure IV.1 :</b> Distribution du champ électrique dans la zone de multiplication. ....	43
--------------------------------------------------------------------------------------------	----

<b>Figure IV.2 :</b> Gain de multiplication en fonction de la tension de la polarisation pour différente valeur de la concentration de dopage $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , $10^{17}$ $\text{cm}^{-3}$ .....	44
<b>Figure IV.3 :</b> Facteur de bruit en fonction de la tension de la polarisation pour différente valeur de la concentration de dopage $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . .....	44
<b>Figure IV.4 :</b> Facteur de bruit en fonction de la tension de gain de multiplication pour différente valeur de la concentration de dopage $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , $10^{17}$ $\text{cm}^{-3}$ .....	45
<b>Figure IV.5 :</b> Tension en fonction la concentration du dopage.....	46
<b>Figure IV.6 :</b> Gain de multiplication en fonction de la tension de la polarisation pour différente valeur de température 100k , 300k et 500k.....	47
<b>Figure IV.7 :</b> Facteur de bruit de multiplication en fonction de la tension de la polarisation pour différente valeur de température 100k , 300k et 500k .....	48
<b>Figure IV.8 :</b> Facteur de bruit en fonction de la tension de gain de multiplication pour différente valeur de température 100k , 300k et 500k.....	49
<b>Figure IV.9 :</b> Tension de claquage en fonction de la température .....	50
<b>Figure IV.10 :</b> Gain de multiplication et facteur de bruit en fonction de la temperature T(°K) à une tension de polarisation fixe .....	51
<b>Figure IV.11 :</b> Organigramme de l'approche évolutionnaire proposée pour la détermination des paramètres électriques de l'APD.....	52
<b>Figure IV.12 :</b> Outil d'optimisation GA-Tool.....	53
<b>Figure IV.13 :</b> Front Pareto (injection par électron) .....	55
<b>Figure IV.14 :</b> Front Pareto (injection par trou).....	56

# Liste des tableaux

**Chapitre III Erreur ! Signet non défini.  
Simulation analytique de l'APD avec MATLAB**

**Tableau III.1** : Paramètres définissant le modèle d'ionisation par impact de Selberherr... 38

**Chapitre IV  
Optimisation des paramètres électriques des photodiodes à  
avalanche en utilisant les algorithmes génétiques**

**Tableau IV.1** : Sensibilité de la tension de claquage à la concentration du dopage..... 46

**Tableau IV.2** : Sensibilité de la tension de claquage à la température..... 49

**Tableau IV.3** : Gain de multiplication et facteur de bruit en fonction de la température ... 50

**Tableau IV.4** : Paramètres de GA utilisés dans cette application. .... 54

**Tableau IV.5** : Comparaison des paramètres de l'PAD (injection par électron)..... 56

**Tableau IV.6** : Comparaison des paramètres de l'PAD (injection par trou) ..... 57

## Liste des abréviations

<b>APD :</b>	PhotoDiode à Avalanche.
<b>AGs :</b>	Algorithmes Génétiques.
<b>F:</b>	Facteur de bruit.
<b>M :</b>	Gain de multiplication.
<b>E :</b>	Champ électrique.
<b><math>E_{th}</math> :</b>	L'énergie de seuil.
<b><math>F_{th}</math> :</b>	L'énergie de seuil d'ionisaion.
<b><math>\alpha, \beta</math> :</b>	Coefficients d'ionisation.
<b>ZCE :</b>	Zone de Charge d'espace

**Intouduction**  
**Générale**

# **Chapitre I**

## **Les photodiodes à avalanche**

# **Chapitre II**

## **Les algorithmes génétiques**

# **Chapitre III**

## **Simulation Analytique de l'APD avec MATLAB**

## **Chapitre IV**

**Optimisation des paramètres  
électriques des photodiodes à  
avalanches en utilisant les  
algorithmes génétiques**

# **Bibliographie**

# **Inroduction Générale**

## **Conclusion Générale**

## Introduction générale

L'industrielle de l'électronique a grandi et devenu l'un des plus grand du monde. La demande croissante de petits dispositif électroniques avec une meilleure performance à moindre coût pousser la technologie pour satisfaire aux exigences de l'industrielle et d'étendre les applications des dispositifs à semi-conducteurs, les composants électroniques, les technologies et les applications se développent constamment. Les technologies poussent les applications à se diversifier et les applications orientent les technologies vers le développement et l'amélioration [1].

Les photodiodes à avalanche APD, ont été étudiées depuis les débuts de la microélectronique et sont déjà utilisée dans des applications de télécommunication longue distance, où le signal optique à détecter est de faible puissance [2].

Il est cependant nécessaire dans un premier temps d'étudier la physique de ce type de dispositifs, ce qui nous intéresse dans ce travail, et de comprendre l'impact des différents paramètres physiques sur leur fonctionnement. A partir de la compréhension de la physique des dispositifs à avalanche, différentes structures de photodiodes à avalanche en Si ont pu être étudiées, notamment les photodiodes qui présentant une des différentes couches de multiplication [3].

Résoudre un problème d'optimisation consiste à trouver la ou les meilleures solutions vérifiant un ensemble de contraintes et d'objectifs définis par l'utilisateur. Pour déterminer si une solution est meilleure qu'une autre, il est nécessaire que le problème introduise un critère de comparaison. Ainsi, la meilleure solution, appelée aussi solution optimale, est la solution ayant obtenu la meilleure évaluation au regard du critère défini. Les problèmes d'optimisation sont utilisés pour modéliser de nombreux problèmes appliqués dans la conception des systèmes de l'industrie, le traitement d'images, les problèmes rencontrés dans les réseaux industriels, la conception d'emplois du temps,.. etc. La majorité de ces problèmes sont qualifiés de difficiles, car leur résolution nécessite l'utilisation des algorithmes évolués, et il n'est en général pas possible de fournir dans tous les cas une solution optimale dans un temps raisonnable [4].

Dans ce travail, nous allons ajuster les paramètres électriques de la photodiode à avalanche APD en utilisant les algorithmes génétiques AGs afin d'améliorer les performances électrique de la photodiode tel que le gain de multiplication et le facteur de bruit.

Ce travail est organisé en quatre chapitres comme suit :

Dans le premier chapitre, nous allons présenter le principe de fonctionnement des photodiode à avalanche, ensuite leurs différents types et détailler les principales caractéristiques électriques de la photodiode à avalanche APD. Par la suite, nous aborderons l'influence de la concentration de dopage et de la température sur les performances électriques des photodiodes à avalanche APD.

Nous allons exposer dans le deuxième chapitre, l'historique et la définition des algorithmes génétiques AGs, présenter ensuite leur domaines d'application. Après, nous allons également présenter leur principe de fonctionnement et leurs caractéristiques principales, puis nous aborderons les opérateurs génétiques. Enfin, nous décrirons les avantages et les inconvénients des algorithmes génétiques AGs.

Dans le troisième chapitre, la première partie de nos résultats est présentée et discutée. D'abord, on présente le modèle électrique de McIntyre d'une photodiode à avalanche APD. Ensuite, on décrit les paramètres électriques, afin de pouvoir connaître l'effet de ces paramètres sur le comportement électrique de la photodiode à avalanche APD. Les simulations sont effectuées à l'aide du Matlab.

Le quatrième chapitre présente la deuxième partie des résultats. En premier lieu, nous allons présenter l'effet de la température et la concentration du dopage sur la tension de claquage, le gain de multiplication et le facteur de bruit dans les APDs de silicium. Après, nous allons ajuster les paramètres électrique de la photodiode à avalanche en utilisant les AGs. Les résultats obtenus par les simulations réalisés seront présentés et discutés.

Enfin, pour conclure notre mémoire, nous terminons par une conclusion générale et des perspectives concernant notre travail.

## I.1 Introduction

Dans ce chapitre, des éléments importants liés à la photodiode à avalanche seront présentés. En premier lieu, nous allons présenter la structure et la physique des photodiodes à avalanche. Ensuite, nous allons évoquer leurs principe de fonctionnement et leurs paramètres caractéristiques tel que : le gain de multiplication et le facteur de bruit. Finalement, ce chapitre se termine par présentation des autres types de photodiodes.

## I.2 Généralité sur les photodiodes à avalanches

### I.2.1 Définition

Les photodiodes avalanche (APD) sont des jonctions p-n polarisées en inverse qui exploitent le phénomène d'ionisation par impact pour obtenir un gain interne du signal. Dans toute diode polarisée en inverse, il existe toujours un courant de porteurs minoritaires traversant la jonction. Ces porteurs sont générés par et thermique dans les centres [5].

Une photodiode à avalanche est avant tout une structure PIN, à laquelle on applique une polarisation inverse proche (mais inférieure en valeur absolue) à la tension de claquage. Les photo porteurs créés dans la zone de charge d'espace sont alors multipliés par l'effet d'avalanche. Les photodiodes à avalanche sont des dispositifs attractifs car ils bénéficient d'un gain interne dû à la multiplication des porteurs générés par l'absorption de la lumière incidente. En effet, lorsque ces porteurs traversent une région où règne un champ électrique élevé ( $>10^5$  V/cm), ils peuvent acquérir une énergie suffisante pour ioniser les atomes du réseau cristallin créant ainsi de nouvelles paires électron trou qui immédiatement dissociées, pourront à leur tour créer d'autres paires électron trou, entraînant juste une amplification du photocourant primaire [6].

### I.2.2 Structure schématique d'une APD

La technologie de photodiode à avalanche est utilisée dans les zones de faible luminosité. La photodiode à avalanche offre des niveaux de gain très élevés, mais par contre elle présente des niveaux de bruit élevés. Donc cette technologie de photodiode n'est pas adaptée à toutes les applications et tend à être utilisée [7].



Figure I.1: photodiode APD.



Figure I.2: photodiode.



Figure I.3: Symbole for photodiode.

Contrairement à la photodiode p-i-n, la photodiode à avalanche (APD) est un dispositif avec un gain important, c'est-à-dire que le nombre de paires électron-trou collectées est supérieur au nombre de photons absorbés. Le mécanisme de multiplication est lié au phénomène d'ionisation par impact : dans une zone à très fort champ électrique, les porteurs peuvent acquérir une énergie cinétique suffisante pour ioniser – ou exciter – d'autres paires électron-trou qui, à leur tour, peuvent en faire autant. Ce mécanisme est à la base du claquage par effet avalanche des diodes polarisées en inverse.

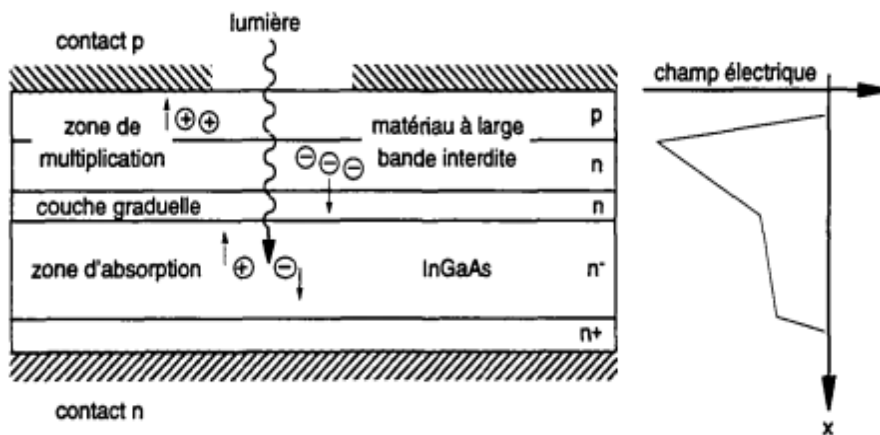


Figure I.4 : Structure schématique d'une photodiode à avalanche avec les zones d'absorption et de multiplication séparées et allure du champs électronique dans la structure[8].

### I.3 Physique des Photodiodes à Avalanche

Dans ce chapitre, la physique mise en jeu dans les photo-détecteurs à avalanche, sera étudiée et présentée, et les paramètres importants pour la compréhension et la réalisation de photodiodes à avalanche seront détaillés et discutés.

#### I.3.1 Effet d'avalanche

Lorsque le champ électrique dans la zone de charge d'espace est suffisamment élevé ( $>10^5 \text{V/cm}$ ), les porteurs libres entraînés par le champ peuvent acquérir une énergie cinétique suffisante pour créer une paire électron-trou supplémentaire par collision avec un électron de valence (ionisation par choc). Les porteurs supplémentaires peuvent à leur tour acquérir une énergie permettant la création de paires additionnelles, il y a alors multiplication des porteurs et la diode devient le siège d'un phénomène d'avalanche qui est linéaire au courant d'origine et multiplié par un facteur M-gain-contrôlable par la tension inverse  $V_{inv}=V_d$ :  $M=[1 - (V_{inv}/V_c)^m]^{-1}$  Où M un nombre dépendant du matériau et de la diode [9].

#### I.3.2 Ionisation par impact

En présence d'un champ électrique dans un semi-conducteur, les porteurs sont accélérés et s'ils acquièrent suffisamment d'énergie, ils peuvent alors, lors d'une collision avec un atome de la maille cristalline, transférer une partie de cette énergie pour faire passer un électron de la bande de valence vers la bande de conduction. C'est ce qu'on appelle l'ionisation par impact. Cet effet, ne peut avoir lieu que si le champ électrique est suffisamment élevé, et dépend de la température et de l'énergie du gap du matériau considéré. L'énergie minimum nécessaire pour ioniser par impact est alors appelée l'énergie de seuil, notée ici  $E_{th}$ . Il en résulte une distance moyenne que les porteurs doivent parcourir avant de pouvoir ioniser par impact [10].

#### I.3.3.Énergie de seuil d'ionisation

L'énergie de seuil d'ionisation dépend de la structure de bande du semi-conducteur, et seul un calcul précis de cette structure permet d'obtenir les valeurs de  $F_{th}$ . Différentes méthodes permettent le calcul de cette structure et l'estimation de  $F_{th}$ , comme la méthode du pseudo potentiel non-local et plus récemment la méthode k.p.

Si l'on considère le processus typique d'ionisation par impact de la (Figure I-5): un électron initialement présent dans la bande de conduction de vecteur d'onde  $\vec{k}_1$  ionise par impact un électron de la bande de valence de vecteur d'onde  $\vec{k}_3$ , et lui transfère donc

suffisamment d'énergie pour le faire passer dans la bande de conduction, son vecteur d'onde devenant  $\vec{k}_2$  et celui de l'électron initial  $\vec{k}_1$ .

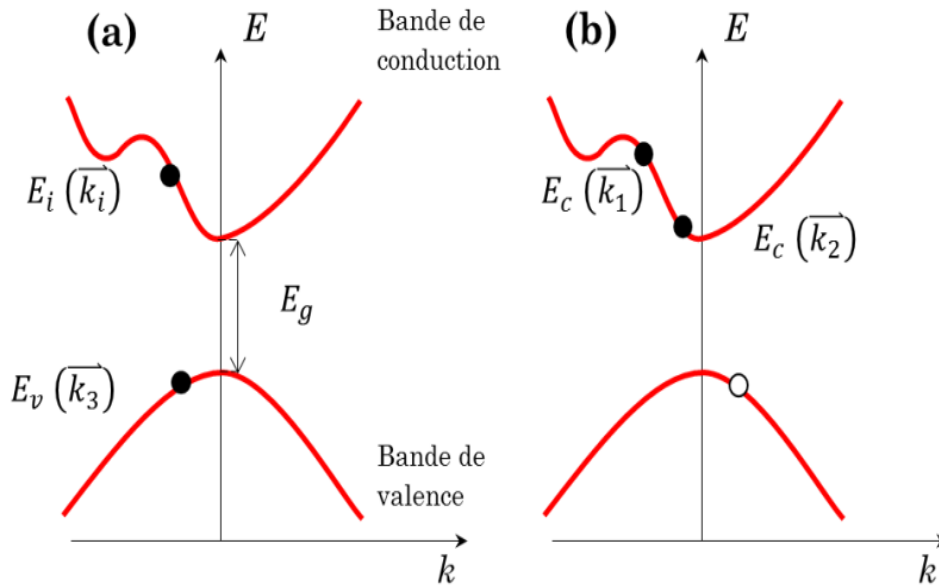


Figure .I.5 : Processus d'ionisation par impact: (a) Etat initial avant ionisation et (b) après ionisation.

### I.3.4 Modèles d'ionisation par impact

#### I.3.4.1 Modèle de Selberherr

Le modèle de d'ionisation par impoact proposé par Selberherr est une variante du modèle classique de Chynoweth. Il est basé sur les expressions suivantes :

$$\alpha_n = ANexp \left[ - \left( \frac{BN}{E} \right)^{BETAN} \right] \tag{I.1}$$

$$\alpha_p = APexp \left[ - \left( \frac{BP}{E} \right)^{BETAP} \right] \tag{I.2}$$

Où  $E$  est le champ électrique dans la direction du courant parcourant à une position particulière dans la structure APD. Les paramètres  $AN$ ,  $AP$ ,  $BN$ ,  $BP$ ,  $BETAN$  et  $BETAP$  sont définis par défaut comme constantes[11]. Les paramètres  $AN$ ,  $AP$ ,  $BN$  et  $BP$  sont également définis selon la valeur du champ électrique  $EGRAN$  (V/cm), où pour les champs électriques faibles  $< EGRAN$ , les paramètres sont  $AN1$ ,  $AP1$ ,  $BN1$ ,  $BP1$ . Par contre, pour les champs électriques intenses  $> EGRAN$ , les paramètres deviennent  $AN2$ ,  $AP2$ ,  $BN2$  et  $BP2$ .

### I.3.4.2 Modèle de Grant

Le deuxième modèle d'ionisation, modèle de Grant, a la même forme que le modèle de Selberherr mais l'implémentation est plus simple :

$$\alpha_n = AN \exp \left[ - \left( \frac{BN}{E} \right) \right] \quad (I.3)$$

$$\alpha_p = AP \exp \left[ - \left( \frac{BP}{E} \right) \right] \quad (I.4)$$

Cette implémentation a trois différences clés:

- le modèle a un champ faible, un champ intermédiaire et un champ élevé
- les coefficients pour le matériau silicium sont différents.
- il n'y a pas de dépendance à la température.

Ce modèle a été développé après des recherches de Baraff qui a suggéré l'existence d'une région de réponse de champ faible, intermédiaire et élevé pour les taux d'ionisation des électrons et des trous. Les coefficients implémentés dans ce modèle correspondent aux données expérimentales de Grant qui suggéraient que les trois différentes régions existaient[11].

### I.3.4.3 Modèle d'Okuto

Le modèle d'Okuto parmi les modèles implémentés sur les simulateurs électroniques. Il est adapté pour la simulation des composants semi-conducteurs diode PN de Schottky. Le modèle est basé sur l'ajustement de données sur des mesures de photo-multiplication effectuées auparavant sur des diodes PN et Schottky. Dans ce modèle, le champ électrique est supposé constant dans la zone de charge d'espace des jonctions. Le modèle empirique de Okuto est utilisé, avec des simplifications, pour formuler les coefficients d'ionisation[3].

### I.3.4.4 Modèle de Toyabe

Le modèle d'ionisation par impact de Selberherr qui dépend de la température est similaire à celui suggéré par Toyabe. La température des porteurs de charge est utilisée pour calculer le champ électrique efficace  $E_{eff}$ . Pour maintenir l'auto-consistance dans le modèle de l'équilibre d'énergie (Energy Balance), la même relation est utilisée pour le champ électrique effectif mobilité qui dépend de la température des porteurs de charge. Les taux d'ionisation ont les formes suivantes :

$$\alpha_n = AN \exp\left(-\frac{BN}{E_{eff,n}}\right) \quad (I.5)$$

$$\alpha_p = AP \exp\left(-\frac{BP}{E_{eff,p}}\right) \quad (I.6)$$

où les paramètres de modèle  $AN$ ,  $AP$ ,  $BN$  et  $BP$  sont déterminés par l'utilisateur dans l'instruction IMPACT. Le champ électrique effectif est calculé selon :

$$E_{eff,n} = \frac{3}{2} \frac{KT_n}{qLREL.EL} \quad (I.7)$$

$$E_{eff,p} = \frac{3}{2} \frac{KT_p}{qLREL.HO} \quad (I.8)$$

Où les longueurs de relaxation de l'énergie  $LREL.EL$  et  $LREL.HO$  sont définis par défaut comme constantes [12].

#### I.4 Principe du fonctionnement de la photodiode à avalanche PDA

Le fonctionnement de la photodiode à avalanche est similaire à la jonction PN et à la photodiode PIN, sauf qu'une tension de polarisation inverse élevée est appliquée en cas de photodiode à avalanche pour obtenir une multiplication par avalanche.

L'application d'une tension de polarisation inverse élevée à la photodiode d'avalanche n'augmentera pas directement la génération de porteurs de charge. Cependant, il fournit de l'énergie aux paires électron-trou générées par la lumière incidente [13].

Lorsque l'énergie lumineuse est appliquée à la photodiode d'avalanche, des paires électron-trou sont générées dans l'épuisement. Les paires électron-trou générées éprouvent une force due au champ électrique de région d'épuisement et au champ électrique externe.

Dans une photodiode à avalanche, une tension de polarisation inverse très élevée fournit une grande quantité d'énergie aux porteurs minoritaires (paires électron-trou). Les transporteurs minoritaires qui gagnent une grande quantité d'énergie sont accélérés à des vitesses plus élevées.

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 les photodiodes PN et PIN

Les photodiodes d'avalanche sont utilisées dans les applications où un gain élevé est un facteur important [14].

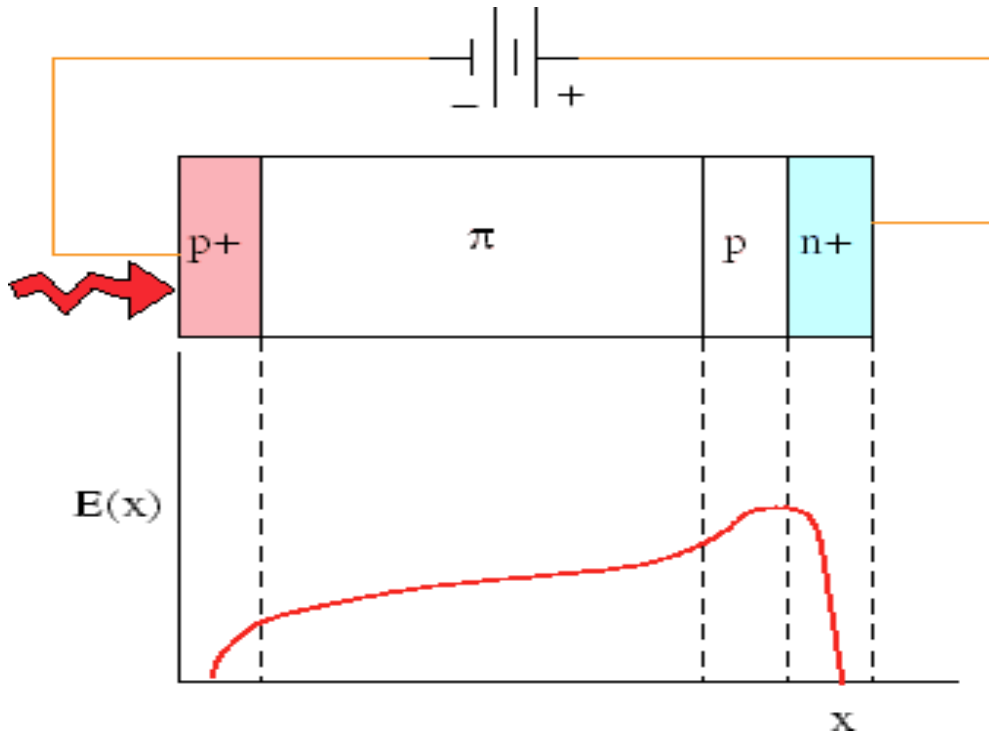


Figure I.6: Structure d'une photodiode à avalanche.

## I.5 Caractéristiques de la photodiode à avalanche

### I.5.1 Gain de multiplication

Le gain dans les photodétecteurs est défini en pratique comme le rapport du nombre de paires électrons-trou effectivement collectées sur le nombre de paires électron-trou initialement générées par absorption de photons. Cependant dans le cadre de la modélisation des photodétecteurs à avalanche, il convient de définir le gain sous forme analytique.

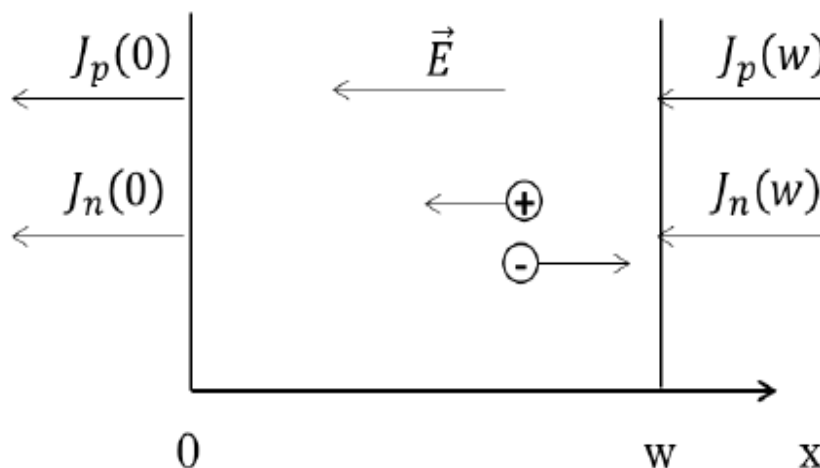


Figure I.7: Représentation de la zone de multiplication pour la détermination du gain [15].

On considère une zone de multiplication qui s'étend de  $x = 0$  à  $x = w$ , et une paire électron-trou qui serait injectée avec une énergie initiale nulle en  $x$ , tel que  $0 < x < w$ . Soit  $J_n(0)$

et  $J_n(w)$  les densités de courant d'électrons et de trous primaires injectées dans la zone de multiplication.

La densité de courant totale indépendante du temps, en régime continu est définie par :

$$J = J_n(x) + J_p(x) = \text{constante} \quad (I.1)$$

On considère par ailleurs un taux de génération de paires électrons-trous ( $x$ ), qui correspond au taux de génération dû à l'absorption de photons dans une photodiode.

Les facteurs  $M_n, M_p$  de multiplication des électrons et des trous définis par le rapport de la densité de courant d'électrons (trous) entrante sur la densité de courant d'électrons (trous) sortante de la zone de multiplication :

$$M_n = \frac{j_n(w)}{j_n(0)} \quad (I.2)$$

$$M_p = \frac{j_p(w)}{j_p(0)} \quad (I.3)$$

Le nombre total des paires électron-trou dans la jonction associée avec la paires électron-trou initiale à  $x$  est estimé par McIntyre théorie (1966) [16].

$$M(x) = 1 + \int_x^{x_n} M(x') \alpha(x') dx' + \int_{x_p}^x M(x') \beta(x') dx' \quad (I.4)$$

L'intégral de l'équation (I.3) est calculé dans par la dérivée [17] :

$$\frac{dM(x)}{dx} = -M(x)[\alpha(x) - \beta(x)] \quad (I.5)$$

donc on obtient :

$$M(x) = M(x_p) e^{-\int_{x_p}^x (\alpha - \beta) dx'} = M(x_n) e^{\int_x^{x_n} (\alpha - \beta) dx'} \quad (I.6)$$

En remplaçant l'équation (I.5) dans l'équation (I.6) pour  $x=x_p$  (et aussi pour  $x=x_n$ ), on obtient :

$$M_n = \frac{1}{1 - \int_0^w \alpha_{eff}(x) e^{-\int_0^x (\alpha_{eff}(x) - \beta_{eff}(x)) dx} dx} \quad (I.7)$$

$$M_p = \frac{1}{1 - \int_0^w \beta_{eff}(x) e^{-\int_0^x (\alpha_{eff}(x) - \beta_{eff}(x)) dx} dx} \quad (I.8)$$

En substituant ces deux équations dans l'équation (I.6) on obtient le gain (facteur de multiplication)  $M(x)$  pour une paire électron-trou créée à  $x$  :

$$M(x) = \frac{e^{-\int_0^x (\alpha_{eff}(x) - \beta_{eff}(x)) dx}}{1 - \int_0^w \alpha_{eff}(x) e^{-\int_0^x (\alpha_{eff}(x) - \beta_{eff}(x)) dx} dx} \quad (I. 9)$$

Pratiquement, si le nombre de paires électron-trou devient très grand, ils modifient le champ électrique à l'intérieur de la jonction, ce phénomène appelé "avalanche".

Le modèle donne une indication de ce fait que  $M(x)$  diverge comme étant soit  $\int_{x_p}^{x_n} dx' \alpha e^{-\int_{x_p}^{x'} (\alpha - \beta) dx''}$  ou  $\int_{x_p}^{x_n} dx' \beta e^{\int_{x_p}^{x'} (\alpha - \beta) dx''}$  approche à 1 et devient non significatif pour des valeurs élevées de ces intégrales[12].

Le gain d'avalanche dépend fortement du champ électrique par le biais des coefficients d'ionisations des porteurs, ou nombre moyen de paire créée par un porteur (électron ou trou) par unité de distance chaque ionisation « ionisation par impact » étant un événement aléatoire lié à l'arrivée d'un porteur dans la zone de champ fort  $>10^5$  V/cm [18].

### I.5.2 Facteur d'excès de bruit

Le facteur d'excès de bruit est défini comme le rapport du gain carré moyen sur le gain moyen au carré, ou le rapport de la variance du gain sur le gain moyen au carré :

$$F(M) = \frac{\langle M^2 \rangle}{(M)^2} \quad (I.10)$$

Dans le cas d'une injection pure d'électrons le facteur d'excès de bruit est donné par :

$$F_n(M) = \frac{\beta}{\alpha} M + (2 - \frac{1}{M}) (1 - \frac{\beta}{\alpha}) = kM + (2 - \frac{1}{M}) (1 - k) \quad (I. 11)$$

Et pour une injection pure de trous :

$$F_p(M) = \frac{\alpha}{\beta} M + (2 - \frac{1}{M}) (1 - \frac{\alpha}{\beta}) = \frac{1}{k} M + (2 - \frac{1}{M}) (1 - \frac{1}{k}) \quad (I. 12)$$

Avec  $k$  le rapport entre le coefficient d'ionisation des trous et celui des électrons défini par :

$$K = \frac{\beta}{\alpha} \quad (I. 13)$$

Dans le cas particulier où  $k = 1$ , c'est-à-dire que les coefficients d'ionisation des trous et des électrons sont similaires, le facteur d'excès de bruit est directement égal au gain  $M$  alors que si  $\alpha \gg \beta$ ,  $F_n$  tend vers 2 et réciproquement pour  $F_p$  lorsque  $\beta \gg \alpha$ .

Pour une injection mixte de porteurs, le facteur d'excès de bruit est défini par :

$$F(M) = \frac{fM_n^2 F_n + (1-f)M_p^2 F_p}{[fM_n + (1-f)M_p]^2} \quad (I. 14)$$

Où  $f$  est le rapport du courant d'électrons injecté sur le courant total injecté :  $f = J_n/(J_n + J_p)$ . Dans le cas de l'absorption de photon, si l'on considère qu'un photon absorbé donne lieu à une paire électron-trou, alors  $f = 1/2$  et l'équation (I-14) donne :

$$F(M) = \frac{2(M_n^2 F_n + M_p^2 F_p)}{[M_n + M_p]^2} \quad (I. 15)$$

Pour  $k = 1$ ,  $F(M) = M$  et le bruit de grenaille est alors directement proportionnel au gain au cube.

Pour une injection de porteurs mixte, ce qui est généralement le cas pour des photodétecteurs intégrés en bout de guide d'onde, il est préférable d'utiliser un matériau où les coefficients d'ionisation des trous et des électrons sont très différents afin de minimiser  $M_n$  ou  $M_p$  dans l'équation (I-15) [10].

### I.5.3 Avantages et les inconvénients de la photodiode à avalanche

Avantages de la photodiode à avalanche :

- Haute sensibilité
- Plus grand gain

Inconvénients de la photodiode à avalanche :

- Génère un niveau de bruit élevé qu'une photodiode PN [9].

## I.6 Autre types des photodiodes

### I.6.1 Photodiode PN

Une photodiode classique est une simple jonction PN polarisée en inverse afin d'obtenir une grande zone de charge d'espace ou zone déplétée afin de favoriser la photodétection. Les porteurs photo-générés dans la zone déplétée dérivent sous l'action du champ électrique vers les zones où ils sont majoritaires. Des paires électrons-trous peuvent aussi être générées dans les zones dopées. Ceux-ci interviennent surtout pour les photodiodes UTC, présentées dans la suite de ce chapitre. Les porteurs minoritaires diffusent vers la zone de charge d'espace, où ils sont accélérés par le champ électrique pour participer au photocourant. Ils peuvent au cours de leur déplacement se recombiner. La première évolution

des photodétecteurs au début des années 60, s'est tournée vers l'augmentation de la zone d'absorption à l'aide d'une couche supplémentaire non dopée ou faiblement dopée, pour accroître la sensibilité : cette évolution a donné naissance à la photodiode PIN [19].

La photodiode de jonction PN est la première forme de photodiode développée. Il s'agit des diodes ; c'est-à-dire des composants constitués de deux matériaux semi-conducteurs accolés et dopés l'un par des donneurs (type N) l'autre des accepteurs (type P). Dans le cas où les deux matériaux sont de même nature, on parle d'homo jonction. Dans le cas contraire on parle d'hétérojonction.

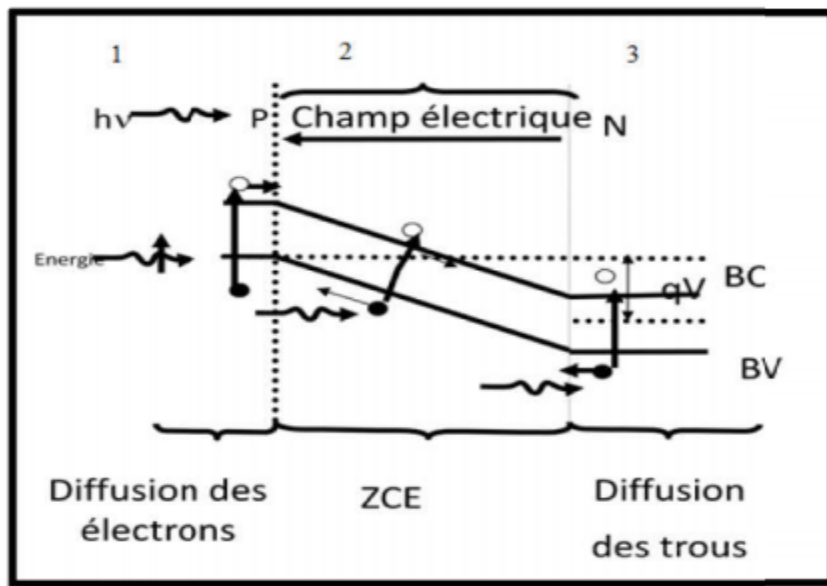


Figure I.8 : Principe de fonctionnement d'une photodiode PN [9].

### I.6.2 Photodiode PIN

La photodiode PIN est basée sur une simple jonction PN au milieu de laquelle a été insérée une couche intrinsèque, absorbante à la longueur d'onde.

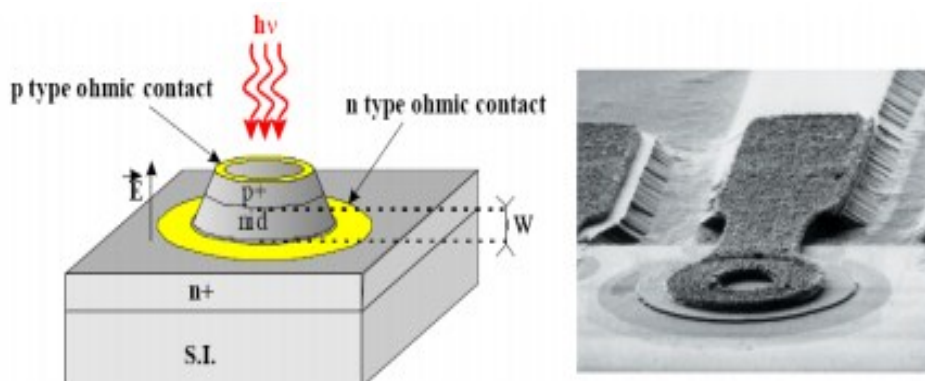


Figure I.9: Schéma d'une photodiode PIN classique à éclairage vertical, d'après [20] et photographie, d'après [21].

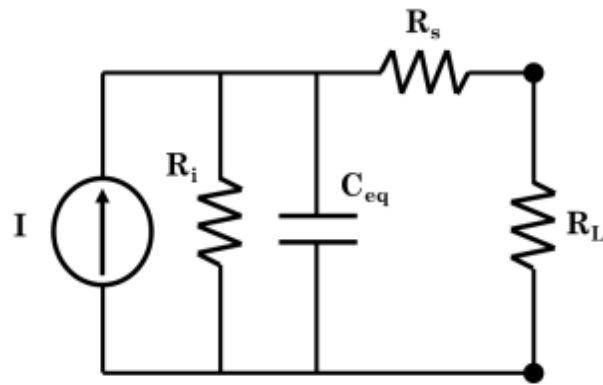


Figure I.10: Schéma électrique équivalent d'une photodiode p-i-n.



Figure I.11: Symbole de photodiode PIN.

L'idée de cette structure est d'augmenter artificiellement la zone de charge d'espace et donc la zone d'absorption principale de la photodiode,  $W$ , comme illustré par la figure I.10. Sous une polarisation inverse suffisante, toute la zone intrinsèque est soumise à un fort champ électrique quasi-uniforme et ainsi les porteurs photo-générés atteignent rapidement la vitesse de saturation. Cette structure de photodiode a très rapidement été utilisée comme démodulateur optique microonde, [22] à [23].

Dans ce type de composant, des temps de réponse très brefs sont recherchés pour pouvoir permettre des montées en débit pour les communications. On remarque que dans les premières structures PIN, certains porteurs photo-générés étaient soumis au phénomène de diffusion dans certaines zones. Or, la diffusion est un phénomène très lent qui réduit la bande passante et donc est contraire aux applications optique-microondes. De plus la réponse en fréquence des photodiodes à zone déplétée est limitée principalement par les effets de temps de transit des porteurs [24] et de la capacité de jonction de la diode. Afin d'améliorer la réponse en fréquence, il est nécessaire de limiter la région d'absorption à la zone intrinsèque pour réduire les temps de transit des porteurs. Les hétérojonctions ainsi que les nouveaux matériaux composés binaires et ternaires ont apporté cette possibilité [25]. L'idée a été d'utiliser un matériau absorbant à la longueur d'onde souhaitée pour la zone intrinsèque et deux autres matériaux fortement dopés et transparents pour les deux autres zones N et P.

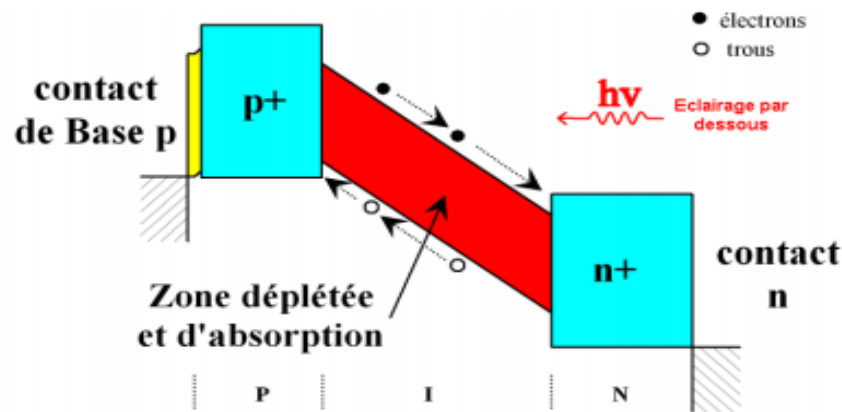


Figure I.12: Principe de fonctionnement d'une photodiode PIN.

La figure I.12 résume le principe de fonctionnement d'une photodiode PIN à éclairage vertical avec pour zone active, la zone intrinsèque. L'éclairage vertical peut être effectué par dessus ou par dessous suivant les structures et matériaux utilisés. L'éclairage latéral permettra de lever le compromis rapidité/détection.

### I.6.3 Photodiode à cavité résonante

Un autre type de photodiode permet d'augmenter la sensibilité dans le cas d'un éclairage vertical. L'idée est de piéger le faisceau lumineux dans une cavité résonante, comme le montre la figure 1.13, avec des miroirs de Bragg à haut indice de réflexion, pour absorber la quasi-totalité du faisceau, d'où leur nom de photodiode améliorée par cavité résonante (RCE-Pd : Resonant Cavity Enhanced Photodiode).

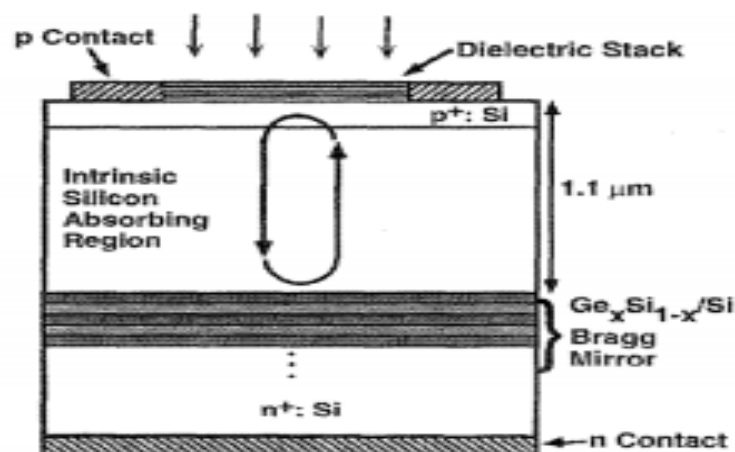


Figure. 1.13 : Structure d'une photodiode à cavité résonante SiGe – Si [19].

### I.6.4 SiPM

Un SiPM est une matrice de photodiodes uniques (PDA-Geiger) représentant les pixels de cette matrice. La répartition de ces pixels est conçue d'une façon à attribuer à chaque pixel sa résistance de « Quenching »  $R_q$ . La connexion entre les pixels se fait d'une

manière unique, cela veut dire que toutes les photodiodes sont reliées entre elles par le métal. Une seule connexion de la cathode est ainsi définie, permettant donc la polarisation de tous les pixels uniformément. L'anode est prise, dans ce cas, par la région P, une région commune entre toutes les photodiodes.

Il s'agit d'une configuration particulière inventée au début des années 90s. Le but était de réaliser un dispositif qui a une taille plus importante ( $1\text{mm}^2$ ) qu'une diode unique ( $\sim 25 \cdot 10^{-4}\text{mm}^2$ ) mais n'ayant pas une surface uniforme de  $1\text{mm}^2$ . L'idée est d'éviter une augmentation du bruit thermique généré, sachant que le bruit n'augmente pas linéairement avec la surface mais plutôt d'une manière exponentielle, empêchant ainsi la réalisation d'une diode avec telle surface. L'inconvénient se trouve certes dans la surface de détection qui n'est pas à 100%. En général, dans les SiPM, la surface active varie entre 30% et 80% suivant la forme et la taille des pixels.



Figure 1.14: un SiPM avec la cathode (cadre interne) et l'anode (cadre externe).

## I.7 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre des généralités sur les photodiodes à avalanches en particulier, leur définition, leur structure schématique, leur physique et leur principe de fonctionnement. Ensuite, nous nous sommes occupés de rappeler les caractéristiques de la photodiode à avalanche tel que le gain de multiplication et le facteur de bruit qui seront optimisés dans le chapitre IV en utilisant les algorithmes génétiques multi-objective.

## II.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons donner l'historique, la définition des algorithmes génétiques AGs, leur structure et leur principe de fonctionnement. Nous allons aussi exposer les opérateurs génétiques tels que la sélection, le croisement, la mutation et le remplacement. Finalement, on termine ce chapitre par les avantages et les inconvénients des AGs.

Les algorithmes génétique sont des algorithmes d'optimisation s'appuyant sur les technique dérivées de la génétique et de l'évolution naturelle.

## II.2 Historique et définitions des AGs

### II.2.1 Historique

Les algorithmes génétiques, initiés dans les années 1970 par John Holland, sont des algorithmes d'optimisation s'appuyant sur des techniques dérivées de la génétique et des mécanismes d'évolution de la nature : croisement, mutation, sélection. Nos travaux consisteront à définir ces algorithmes évolutionnaires, et à les comparer aux méthodes déterministes afin de pouvoir cerner leur utilité en fonction du problème posé. Le devoir s'articulera sur deux axes principaux qui serviront de fils conducteurs au passage de la théorie à la pratique [26].

Dans un premier temps, nous nous attacherons à l'origine des algorithmes génétiques, leur appartenance dans le monde de la vie artificielle, et à la théorie de l'évolution des espèces formulée par le naturaliste Charles Darwin, sur laquelle ces premiers sont basés. Les GAs ont été imaginés comme outils de modélisation de l'adaptation. Ils travaillent dans l'espace des chaînes de bits  $[0,1]^n$ . Ce sont les plus connus des algorithmes évolutionnaires, et souvent les seules variantes connues des chercheurs des autres disciplines [26].

### II.2.2. Définition

Les algorithmes génétiques sont des algorithmes d'exploration fondés sur les mécanismes de la sélection naturelle et de la génétique. Ils sont basés sur les principes de survie de structures les mieux adaptées et les échanges d'information. À chaque génération, un nouvel ensemble de créatures artificielles (codées sous forme de chaînes de caractères) est construit à partir des meilleurs éléments de la génération précédente [4].

---

## II.3 Domaines et application des Algorithmes Génétiques (AGs)

### II.3.1 Domaines des AGs

Les algorithmes génétiques peuvent être particulièrement utiles dans les domaines suivants :

- Optimisation : optimisation de fonctions, planification, etc ...
- Apprentissage : classification, prédiction, robotique, etc ...
- Programmation automatique : programmes LISP, automates cellulaires, etc ...
- Etude du vivant, du monde réel : marchés économiques, comportements sociaux, systèmes immunitaires, etc ...[27].

### II.3.2 Application des AGs

Les AGs sont un mécanisme général performant pour résoudre des problèmes pour lesquels :

- les problèmes d'optimisation.
- La recherche d'information.
- Le datamining.
- En industrie (Motorola, la Nasa et son robot pathfinder) [27].
- Il existe un très grand nombre de solutions plus ou moins bonnes.
- On ne dispose pas d'algorithme déterministe pour calculer la ou les meilleures solutions.
- L'univers du problème est peu formalisé [28].

## II.4 Principe de fonctionnement des algorithmes génétiques AGs

Les algorithmes génétiques sont des approches d'optimisation qui utilisent des techniques dérivées de la science génétique et de l'évolution naturelle : la sélection, la mutation et le croisement. Pour utiliser ces approches, on doit disposer des éléments suivants [29] :

- Le codage d'un élément de population: une fonction qui permet de modéliser les données du problème réel dans des données utilisables par l'algorithme génétique.
- Une fonction pour générer la population initiale : la génération de la population initiale est importante puisque cette génération représente le point de départ de l'algorithme et son choix influe sur la rapidité et l'optimalité de la solution finale.

- Une fonction à optimiser (la fonction objectif) : une fonction qui retourne une valeur d'adaptation pour chaque individu. Cette valeur permet de déterminer la solution pertinente puisque le problème se restreint à chercher le groupe d'individus qui ont les valeurs optimums.
- Des opérateurs qui permettent d'évoluer d'une population à une autre tout en améliorant la fonction objectif. L'opérateur de croisement recompose les gènes d'individus existant dans la population, alors que l'opérateur de mutation a pour but de garantir l'exploration de l'espace d'états.
- Des paramètres de dimensionnement: taille de la population, nombre total de générations (critère d'arrêt), probabilités d'application des opérateurs de croisement et de mutation, etc... [27].

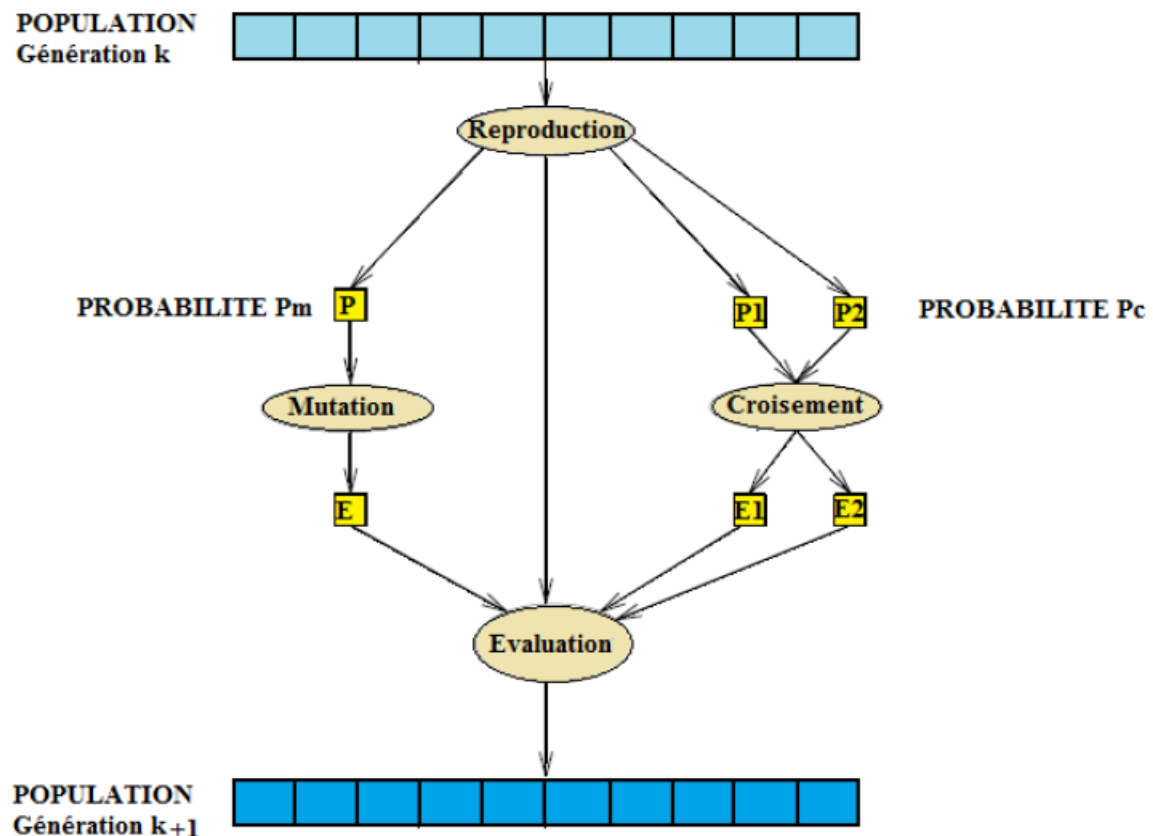


Figure II.1 : Principe général des algorithmes génétiques[29].

## II.5 Caractéristiques des algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques se caractérisent par quatre aspects :

le codage des paramètres du problème, l'espace de recherche, la fonction d'évaluation servant à sélectionner les chromosomes parents, et le hasard qui joue un rôle important dans l'évolution des chromosomes de génération en génération. Nous allons passer en revue ces différents aspects [30].

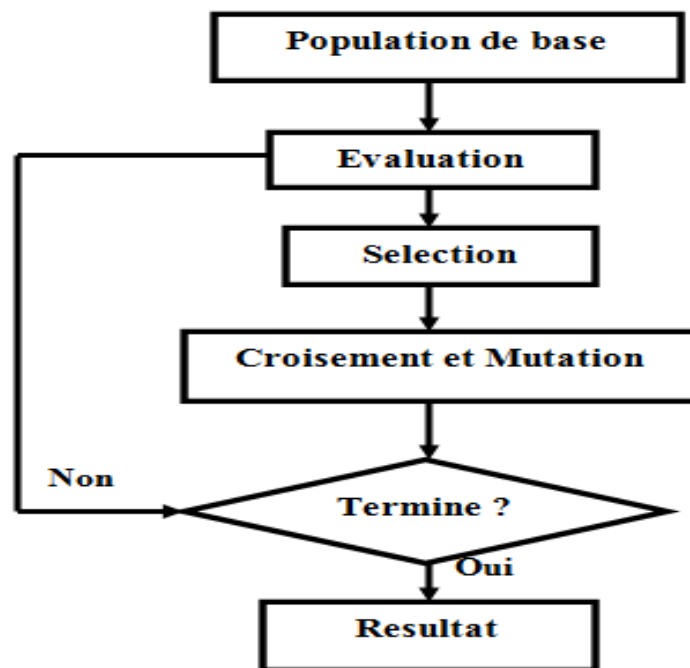


Figure II.2 : Illustre les principales étapes d'un algorithme génétique.

Un algorithme génétique recherche le ou les extrema d'une fonction définie sur un espace de données. Son mise en œuvre nécessite :

### II.5.1 Codage

Le codage est une partie très importante des algorithmes génétiques. Il permet de représenter l'individu sous la forme d'un chromosome. Ce chromosome est constitué de gènes qui prennent des valeurs dans un alphabet binaire ou non. Certains auteurs n'hésitent pas à faire le parallèle avec la biologie et parlent de génotype en ce qui concerne la représentation binaire d'un individu, et de phénotype pour ce qui est de sa valeur réelle correspondante dans l'espace de recherche.

Le choix du codage est délicat. Il doit permettre de coder toutes les solutions et permettre la mise en œuvre des opérateurs de reproduction. C'est ainsi que le bon déroulement des algorithmes génétiques sera assuré. Plusieurs type de codages sont utilisés, on citera à titre d'exemple: codage réel, codage binaire, Gray [30].

Il y a trois principaux types de codage utilisables, et on peut passer de l'un à l'autre relativement facilement :

### II.5.1.1 Codage binaire

C'est le plus utilisé. Chaque gène dispose du même alphabet binaire  $\{0, 1\}$  Un gène est alors représenté par un entier long (32 bits), les chromosomes qui sont des suites de gènes sont représentés par des tableaux de gènes et les individus de notre espace de recherche sont représentés par des tableaux de chromosomes. c'est le plus utilisé. Chaque gène dispose du même alphabet binaire  $\{0,1\}$ . Si un gène est représenté par un entier long (32 bits), les chromosomes qui sont des suites de gènes sont représentés par des tableaux de gènes et les individus de notre espace de recherche sont représentés par des tableaux de chromosomes [30].

### II.5.1.2 Codage réel

Cela peut-être utile notamment dans le cas où l'on recherche le maximum d'une fonction réelle.

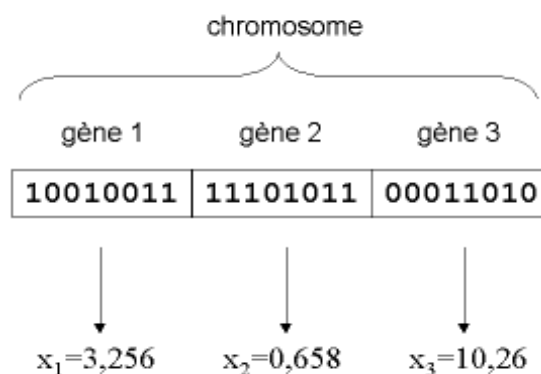


Figure II.3: Illustration schématique du codage des variables réelles [30].

### II.5.1.3 Codage de gray

Dans le cas d'un codage binaire on utilise souvent la "distance de Hamming" entre les codages binaires de deux nombres réels proches, comme mesure de la dissimilarité entre deux éléments de population, cette mesure compte les différences de bits de même rangée ces deux séquences. Et c'est là que le codage binaire commence à montrer ses limites. En effet, deux

éléments voisins en termes de distance de Hamming ne codent pas nécessairement deux éléments proches dans l'espace de recherche. Cet inconvénient peut être évité en utilisant un "codage de Gray" : le codage de Gray est un codage qui a comme propriété que entre un élément  $n$  et un élément  $n+1$ , donc voisin dans l'espace de recherche, un seul bit diffère [31].

### II.5.2 Génération de la population initiale

Généralement, la population initiale est générée aléatoirement de manière à répartir les individus uniformément sur l'espace de recherche. Néanmoins, si on a une idée de la forme de la (des) solution (s), on peut biaiser cette initialisation en regroupant les individus autour de la région considérée, ce qui est susceptible d'accélérer la convergence de l'algorithme.

D'autre part, si les contraintes n'ont pu être correctement prises en charge par le codage des individus, il est parfois possible de générer une solution initiale qui les satisfait : domaine des gènes, vérification de contraintes élémentaires... Il faut alors veiller à concevoir des opérateurs qui n'engendrent que des individus admissibles ou prendre en charge les contrevenants pendant l'évaluation [31].

#### II.5.2.1 Fonction d'évaluation

Elle prend en argument l'individu et lui associe un coût de performance. Cette fonction doit guider l'algorithme vers l'optimum en réalisant implicitement une pression de sélection dans cette direction. De plus, l'efficacité d'un AG s'appuie pour une grande part, sur la qualité de cette fonction. La mise au point d'une bonne fonction d'adaptation doit respecter plusieurs critères qui se rapportent à sa complexité et à la satisfaction des contraintes du problème. Lorsque la fonction d'adaptation apparaît excessivement complexe, consommant une importante puissance de calcul, la recherche d'une approximation plus simple est souhaitable [32].

## II.6 Opérateurs génétiques

Ces opérateurs sont la base des AGs, définissent la manière dont les individus se combinent et s'agencent pendant la phase de reproduction. Les opérateurs qu'on trouve le plus souvent sont : sélection, croisement et mutation [32].

### II.6.1 Opérateur de sélection

L'opérateur de sélection est chargé de définir quels seront les individus de  $p$  qui vont être dupliqués dans la nouvelle population  $p'$  et vont servir de parents (application de

l'opérateur de croisement). Soit  $n$  le nombre d'individus de  $p$ , on doit en sélection  $n/2$  (l'opérateur de croisement nous permet de repasser à  $n$  individus).

Cet opérateur est peut-être le plus important puisqu'il permet aux individus d'une population de survivre, de se reproduire ou de mourir. En règle générale, la probabilité de survie d'un individu sera directement reliée à son efficacité relative au sein de la population. On trouve essentiellement cinq types de méthodes de sélection différentes [32].

- **Sélection par Roulette**

Les parents sont sélectionnés en fonction de leur performance. Meilleur est le résultat codé par un chromosome, plus grandes sont ses chances d'être sélectionné. Il faut imaginer une sorte de roulette de casino sur laquelle sont placés tous les chromosomes de la population, la place accordée à chacun des chromosomes étant en relation avec sa valeur d'adaptation. Ensuite, la bille est lancée et s'arrête sur un chromosome. Les meilleurs chromosomes peuvent ainsi être tirés plusieurs fois et les plus mauvais ne jamais être sélectionnés [31].

- **Sélection par Rang**

La sélection précédente rencontre des problèmes lorsque la valeur d'adaptation des chromosomes varient énormément. Si la meilleure fonction d'évaluation d'un chromosome représente 90% de la roulette alors les autres chromosomes auront très peu de chance d'être sélectionnés et on arriverait à une stagnation de l'évolution. La sélection par rang trie d'abord la population par leur scores. Ensuite, chaque chromosome se voit associé un rang en fonction de sa position. Ainsi le plus mauvais chromosome aura le rang 1, le suivant 2, et ainsi de suite jusqu'au meilleur chromosome qui aura le rang  $N$ . La sélection par rang d'un chromosome est la même que par roulette, mais les proportions sont en relation avec le rang plutôt qu'avec la valeur de l'évaluation. Avec cette méthode de sélection, tous les chromosomes ont une chance d'être sélectionnés. Cependant, elle conduit à une convergence plus lente vers la bonne solution. Ceci est dû au fait que les meilleurs chromosomes ne diffèrent pas énormément des plus mauvais [31].

- **Elitisme**

A la création d'une nouvelle population, il y a de grandes chances que les meilleurs chromosomes soient perdus après les opérations d'hybridation et de mutation. Pour éviter cela, on utilise la méthode d'élitisme. Elle consiste à copier un ou plusieurs des meilleurs chromosomes dans la nouvelle génération. Ensuite, on génère le reste de la population selon l'algorithme de reproduction usuel. Cette méthode améliore considérablement les algorithmes génétiques, car elle permet de ne pas perdre les meilleurs solutions [31].

- **Sélection par tournoi**

Elle consiste à choisir aléatoirement deux ou plusieurs individus et à sélectionner le plus fort. Ce processus est répété plusieurs fois jusqu'à l'obtention de N individus. L'avantage d'une telle sélection est d'éviter qu'un individu très fort soit sélectionné plusieurs fois [33].

- **Sélection stochastique**

Contrairement aux méthodes déterministes, les méthodes stochastiques associent à chaque individu une probabilité de sélection, généralement fonction croissante de leur fonction d'adaptation [34].

### II.6.2 Opérateur de croisement

Une fois certains individus sélectionnés, on les fait se reproduire entre eux, pour cela on utilise l'opérateur croisement. C'est l'opérateur essentiel de recherche d'un algorithme génétique. Il combine les génotypes de deux individus pour en obtenir deux nouveaux. Avec cet opérateur, les génotypes sont vus comme une chaîne de nombres binaires. Plusieurs méthodes de croisement sont utilisées :

- Croisement en un point : on choisit au hasard un point de coupure identique sur les deux génotypes et on échange les fragments situés après le point de coupure pour donner les deux nouveaux génotypes.
- Croisement en deux points : on choisit au hasard deux points de croisement et on échange les fragments situés entre ces deux points.
- Croisement en k points : généralisation à k points de coupure des méthodes précédentes [34].

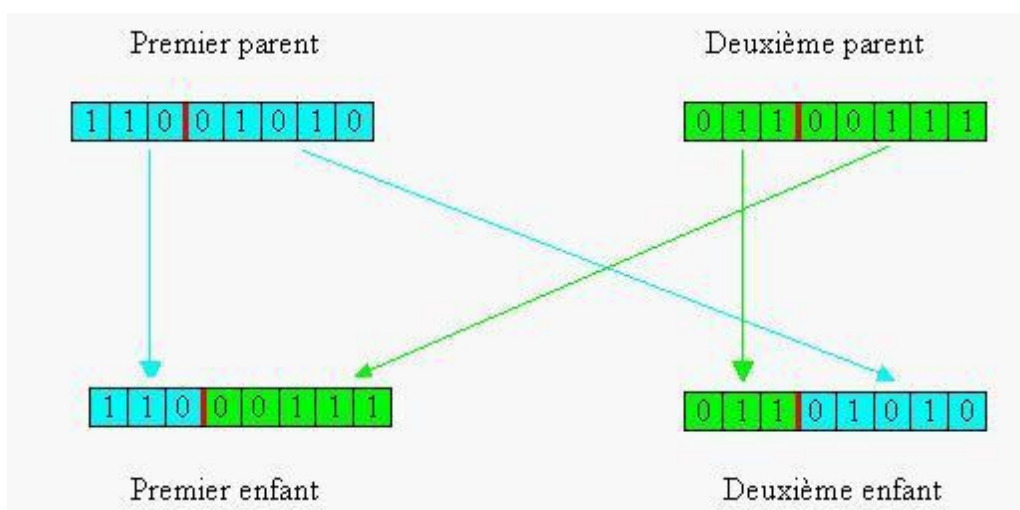


Figure II.4: Opérateur Croisement a un point.

### II.6.3 Opérateur de mutation

Cet opérateur consiste à changer la valeur allélique d'un gène avec une probabilité  $p_m$  très faible, généralement comprise entre 0.01 et 0.001. On peut aussi prendre  $p_m=1/l_g$  où  $l_g$  est la longueur de la chaîne de bits codant notre chromosome. Une mutation consiste simplement en l'inversion d'un bit (ou de plusieurs bits, mais vu la probabilité de mutation c'est extrêmes rare) se trouvant en un locus bien particulier et lui aussi déterminé de manière aléatoire ; on peut donc résumer la mutation de la façon suivante: On utilise une fonction censée nous retourner true avec une probabilité  $p_m$  [32].

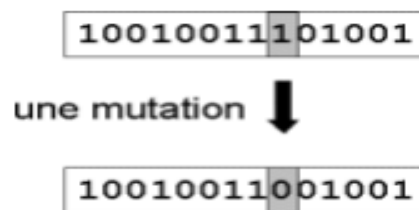


Figure II.5 : une mutation [32].

L'opérateur de mutation modifie donc de manière complètement aléatoire les caractéristiques d'une solution, ce qui permet d'introduire et de maintenir la diversité au sein de notre population de solutions. Cet opérateur joue le rôle d'un "élément perturbateur", il introduit du "bruit" au sein de la population [32].

### II.6.4 Opérateur de remplacement

Cet opérateur est le plus simple, son travail consiste à réintroduire les descendants obtenus par application successive des opérateurs de sélection, de croisement et de mutation (la population  $P'$ ) dans la population de leurs parents (la population  $P$ ).

Ce faisant il vont remplacer une certaine proportion de ceux-ci, proportion pouvant bien sûr être choisie. Le rapport entre le nombre d'individus nouveaux allant être introduits dans la population  $P$  et le nombre d'individus de cette population est connu sous le nom de génération gap.

## II.7 Critères de convergence

Afin de mettre fin à l'algorithme génétique, trois critères de convergence ont été utilisés dans notre travail, si l'un de ces critères est atteint, le processus d'optimisation se termine en convergeant à la solution optimale. Les critères sont :

- Quand l'erreur normalisée du meilleur chromosome (la fonction fitness) tend à la plus petite valeur (l'erreur de tolérance fixée) c-à-d : lorsqu'une solution optimale  $S_m$  est connue pour un problème donné, on peut aussi arrêter l'algorithme après l'atteinte d'un optimum pratique à cette solution [30].

$$\left| \frac{S_c - S_m}{S_c} \right| \times 100 < \varepsilon \quad \text{II.1}$$

où :  $S_c$  est la solution à comparer,  $S_m$  est la meilleure solution (solution optimale)

- Si le meilleur individu de la population reste inchangé pendant un nombre donné  $t_n$  de générations, on considère que l'algorithme a convergé et que cette meilleure solution est l'optimum de cette recherche. Ce critère vérifie la création de nouvelles solutions plus performantes parmi la population.
- Si le nombre d'itérations atteint le nombre de génération  $NGEN$  fixé.

L'algorithme ci-dessous explique le critère de convergence :

1.  $S_c$  est la solution à comparer ;
2.  $A$  est l'ensemble des solutions qui ont la meilleure fitness ;
3.  $j = 1$ ;
2. REPETER
  - (a) comparer  $S_c$  avec  $A(j)$  par le calcul de  $e(j)$ ;
  - (b) Si ( $e(j)$  est minimum) Alors  
 $S_m = A(j)$
  - (c)  $j = j + 1$  ;
3. jusqu'à [( $e$  atteint) ou ( $tn$  atteint) ou ( $j > NGEN$ )]
4.  $S_m = A(j)$  ;

Figure II.6: Critère de convergence [30].

## II.8 Grandes étapes de l'algorithme génétique

Le principe d'un algorithme génétique consiste à évaluer une population et à générer une autre de façon itérative grâce aux actions opérées par les opérateurs génétiques. Le nombre de chromosomes dans une population reste inchangé à travers les diverses générations. Pour mettre en œuvre un AG, il faut disposer d'un schéma pour coder les solutions du problème, une fonction d'évaluation, une procédure d'initialisation, un ensemble

d'opérateurs et un ensemble de paramètres qui gouvernent l'élaboration de la population initiale, l'exécution des opérateurs et l'arrêt de génération de nouvelles populations. De façon générale, un AG fonctionne selon les étapes suivantes [30] :

**Étape 1:** On génère une population initiale de taille  $n$ , représentant le nombre de chromosomes. Puis on choisit au hasard les gènes qui composent chaque chromosome. La qualité de la population initiale est très importante pour la génération de meilleures solutions. La diversité de la population est très importante pour éviter la convergence prématurée vers des minimums locaux. Cette diversité de population se définit initialement et se maintient en combinant diverses stratégies de croisement et de mutation.

**Étape 2:** On évalue chaque chromosome par la fonction objective, ce qui permet de déduire sa valeur d'aptitude.

**Étape 3:** On exécute les cycles de génération de populations. Chaque nouvelle génération remplace la précédente. Le nombre de cycle  $x$  est déterminé au départ. Dans chaque cycle,  $n$  chromosomes sont choisis pour reproduction et croisement deux à deux. Après la création de la  $x^{\text{ème}}$  population, les chromosomes vont évoluer de façon telle que cette dernière génération contient des chromosomes qui sont meilleurs que ceux des générations précédentes [30].

## II.9 Avantages et inconvénients des Algorithmes génétiques

### II.9.1 Avantages

- Élimination de solution non valide.
- Permet de traiter des espaces de recherche important (beaucoup de solution, pas de parcourt exhaustif envisagé).
- Nombre de solution important.
- Relativité de la qualité de la solution selon le degré de précision demandé [35].

### II.9.2 Inconvénients

- Nécessitent plus de calculs que les autres algorithmes méta heuristiques (notamment la fonction évaluation).
- Paramètres difficiles à fixer (taille population, % mutation).
- Choix de la fonction d'évaluation délicat.

- Pas assuré que la solution trouvée est la meilleure, mais juste une approximation de la solution optimale.
- Problème des optimums locaux si paramètres mal évalués [35].

## II.10 Conclusion

On a décrit dans ce chapitre les différentes méthodes de résolution des problèmes d'optimisation, Nous avons présenté dans ce chapitre comment les algorithmes génétique exploitent le principe de la génétique pour résoudre les problèmes d'une manière générale et les problèmes d'optimisation multi-objectifs d'une manière spéciale.

Nous avons constaté que les méthodes exactes permettent d'aboutir à la solution optimale, mais elles sont trop gourmandes en termes de temps de calcul et d'espace mémoire requis. Cependant, les méthodes approchées demandent des coûts de recherche raisonnables. Mais, elles ne garantissent pas l'optimalité de la solution.

### III.1 Introduction

Dans ce chapitre, le modèle analytique de McIntyre décrivant le comportement électrique des photodiodes à avalanche seront implémentés à l'aide de l'outil de simulation Matlab. Nous avons ensuite décrit la structure de la photodiode à avalanche à étudier, permettant par la suite d'obtenir leurs caractéristiques électriques tels que : le champ électrique, les coefficients d'ionisation, le gain de multiplication et le facteur de bruit.

### III.2 Description de la structure étudiée (photodiode à avalanche)

#### III.2.1 Principe de fonctionnement

La création de porteurs minoritaires dans les régions neutres N et P et la génération de paires électron-trou dans la ZCE par le rayonnement lumineux augmente la valeur du courant inverse d'une photodiode. Ces phénomènes sont illustrés dans la Figure III.1 :

- Dans les zones neutres, les électrons (zone P) et les trous (zone N) générés à des distances de diffusion peuvent atteindre la ZCE par diffusion. Le champ électrique dans la ZCE les propulse dans les zones où ils sont majoritaires. Ces porteurs contribuent au courant photonique grâce à la diffusion.
- Dans la ZCE, le champ électrique dissocie les paires électron-trou, l'électron est propulsé vers la zone N et le trou vers la zone P. Ils donnent naissance à un photocourant de génération[22].

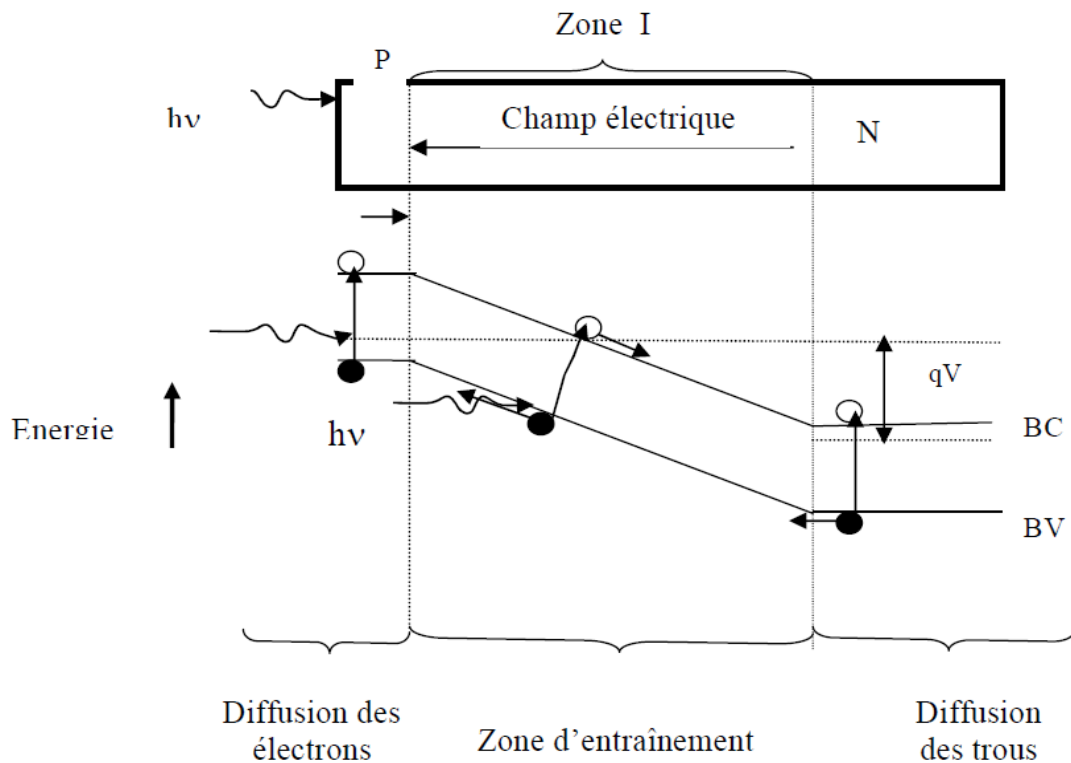


Figure III.1 : Principe de fonctionnement de la jonction.

### III.2.2 Caractéristiques électriques

Si la polarisation inverse de la structure est suffisante, un champ électrique important existe dans toutes les zones intrinsèques, les photo-porteurs atteignent très vite leur vitesse limite. On obtient ainsi des photodiodes très rapides. En plus le champ électrique dans la région de déplétion empêche la recombinaison des porteurs, ce qui rend la photodiode un composant très sensible [36].

Le champ électrique peut être déterminé dans les deux extrémités en utilisant la loi électrostatique de Gauss [37] :

$$\nabla \cdot \vec{E} = \rho / \epsilon_0 K \quad \text{où } k \text{ est la constante diélectrique et } \rho \text{ est la densité de charge}$$

Pour :  $d < x < d + x_p, \rho = -qN_a$  donc :

$$E(x) = \int_d^x \frac{\rho}{\epsilon_0 K} dx = -\frac{N_a q}{\epsilon_0 K} (x - d) \quad (A) \quad \text{III.1}$$

Pour :  $d + x_p < x < d + x_p + x_n, \rho = qN_d$  donc :

$$E(x) = \frac{N_d q}{\epsilon_0 K} (x - d - x_p - x_n) \quad (B) \quad \text{III.2}$$

Le champ électrique maximal se produit à  $x=d+x_p$  donné par l'équation :

$$E_0 = -\frac{N_a q x_p}{E_0 K} = -\frac{N_a q x_n}{E_0 K} \quad \text{III.3}$$

où  $x_p$  et  $x_n$  et  $W$  représentent l'épaisseur de la région P, la région N et la région de déplétion respectivement données par

$$x_p = \frac{N_d}{N_a + N_d} W \quad x_n = \frac{N_a}{N_a + N_d} W \quad \text{III.4}$$

$$W = \sqrt{\frac{2 E_0 K}{q} \frac{N_a + N_d}{N_a N_d} V_{bi}} \quad \text{III.5}$$

où  $V_B$  représente le potentiel Built-in-potential donné par :

$$V_{bi} = \frac{KT}{q} \ln \frac{N_d N_a}{n_i^2} \quad \text{III.6}$$

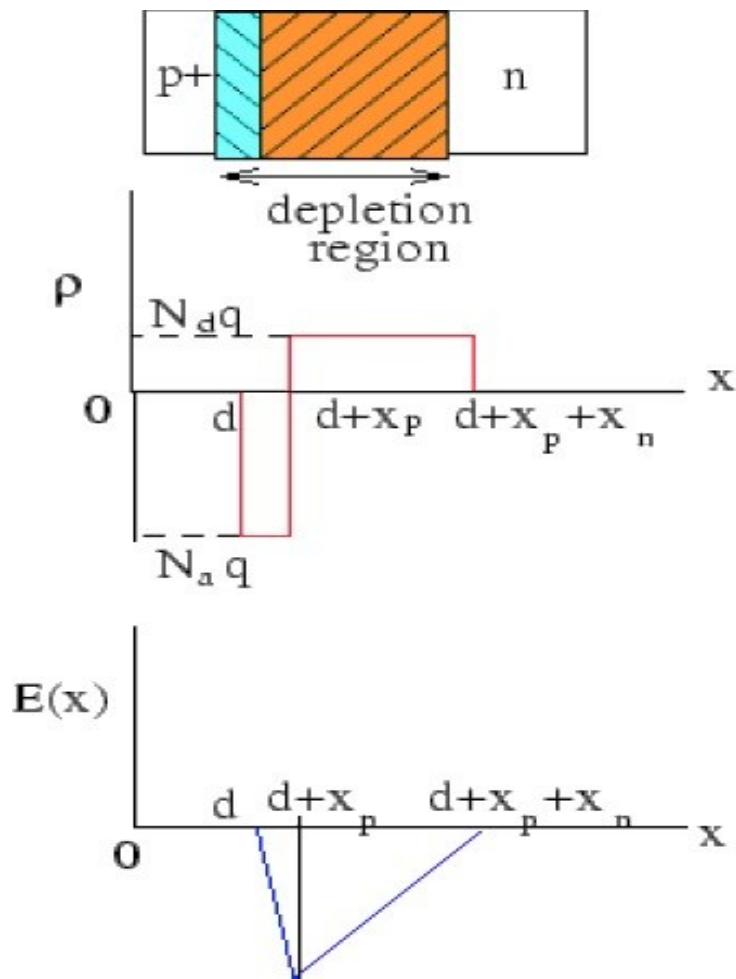


Figure III.2 : Distribution de la charge et le champ électrique dans la jonction.

### III.3 Résultat et discussion

Dans cette partie le modèle de McIntyre a été développé sous Matlab et les résultats de simulation sont présentés comme suit :

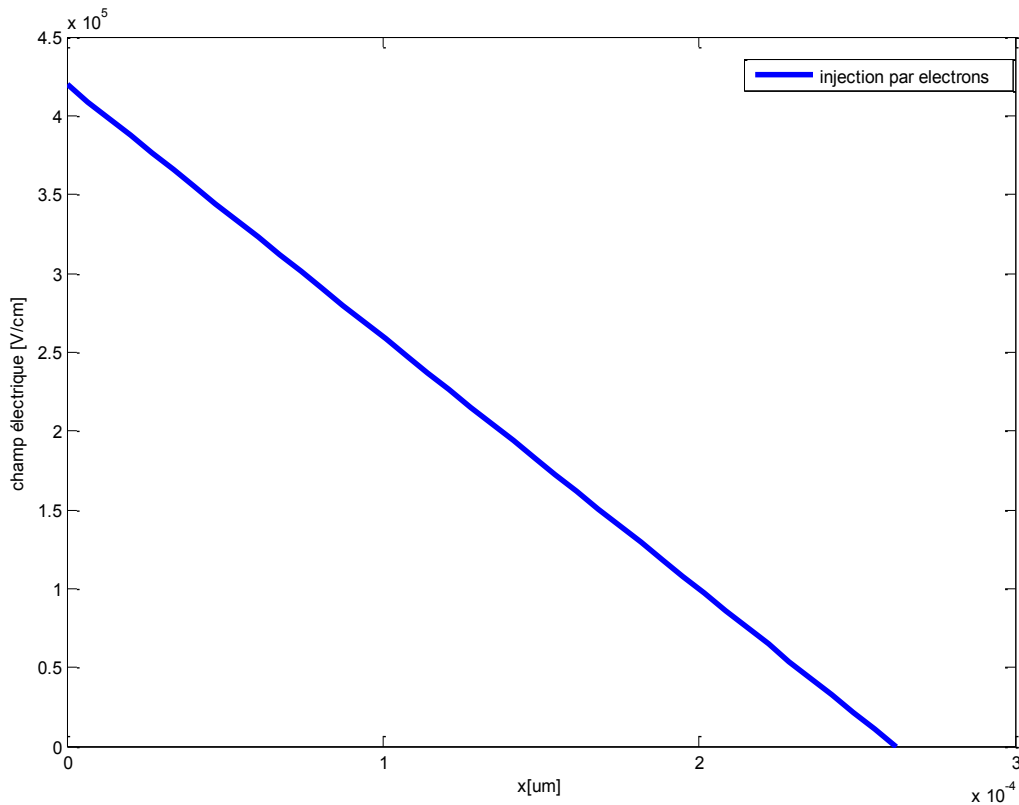


Figure III.3 : Distribution du champ électrique dans la zone de multiplication.

La figure III.3 représente la distribution du champ électrique dans la zone de multiplication de la photodiode à avalanche. Cette dernière a été polarisée en inverse par une tension de 54.11V. Nous remarquons que l'allure du champ électrique est linéaire puisque la structure a un dopage uniforme  $NB=10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . L'intensité maximum du champ électrique est de l'ordre de  $10^5$  et observé dans l'interface N+/p. En outre, plus la tension de polarisation inversement augmente, l'intensité maximale du champ électrique augmente est par conséquent l'accélération des porteurs de charge.

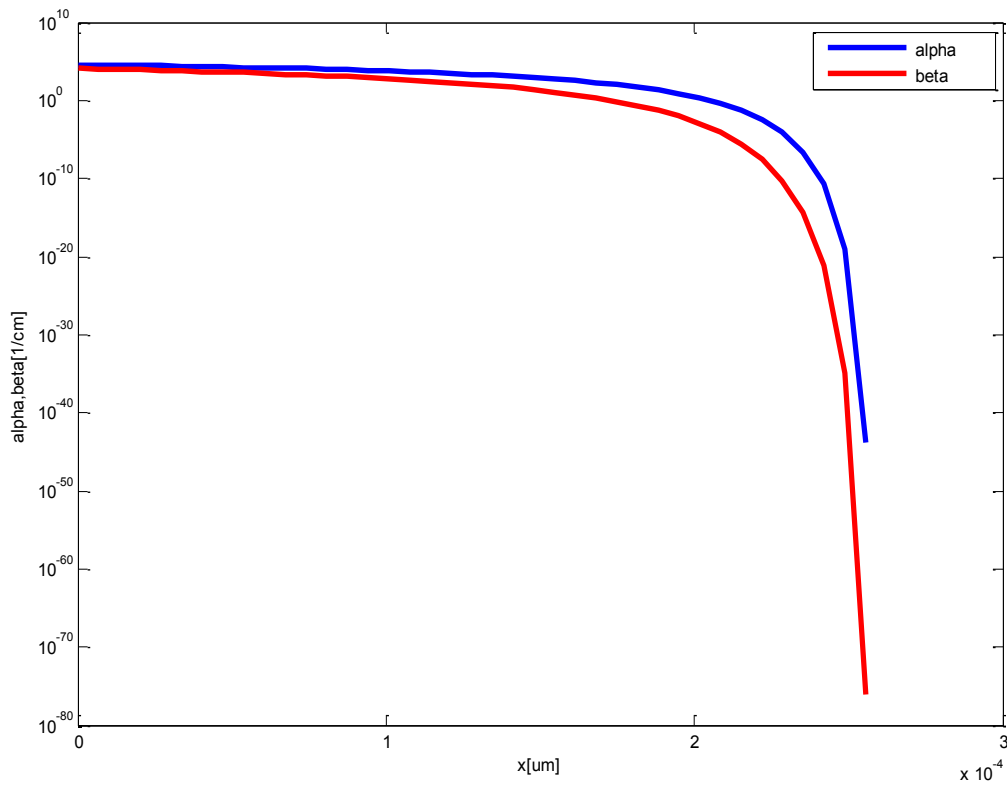


Figure III.4 : Coefficients d'ionisation (alpha et beta) dans la zone de multiplication.

La figure III.4 représente la variation des coefficients d'ionisation des électrons  $\alpha$  et des trous  $\beta$  dans la zone de multiplication. Ces coefficients sont calculés à l'aide des équations analytiques qui seront détaillées par la suite.

D'après cette figure on observe que les deux coefficients d'ionisation des électrons  $\alpha$  et des trous  $\beta$  sont identiques ( $K=1$ ) pour la zone de multiplication de faible intensité. Par contre, ils se divergent où le coefficient d'ionisation des électrons est plus grand que celui des trous pour la zone de multiplication intenses de l'ordre de  $10^{-4}$  um.

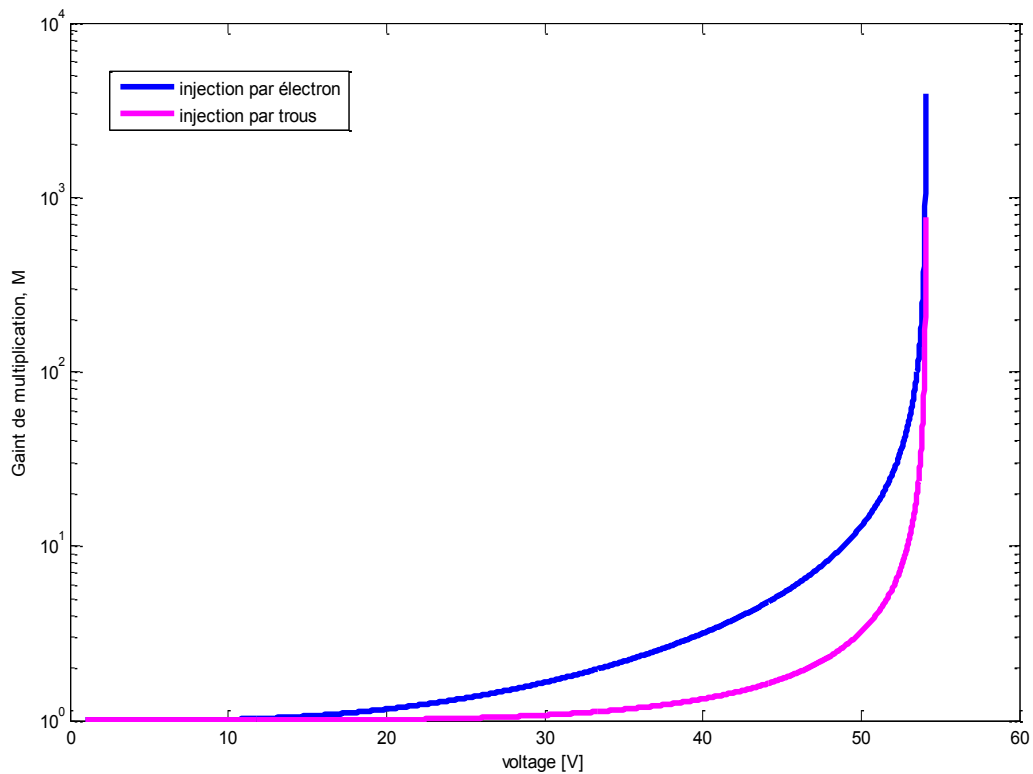


Figure III.5 :Gain de multiplication en fonction de la tension de polarisation(injection par électron et injection par trous).

La figure III.5 présente le gain de multiplication en fonction de la tension de polarisation inverse pour une photodiode à avalanche pour les deux cas d'injection électron et trou.

Les deux gains de multiplication des électrons et des trous sont identiques ( $M=1$ ) à une tension de polarisation  $<10V$ . Par contre, le ces deux gain commence à augmenter pour des tensions de polarisation  $> 10V$  et atteint leurs maximum près de la tension de claquage.

Le gain de multiplication dans le cas où l'injection est uniquement composée d'électrons, est supérieur à celui dans le cas où l'injection est uniquement composée de trous.

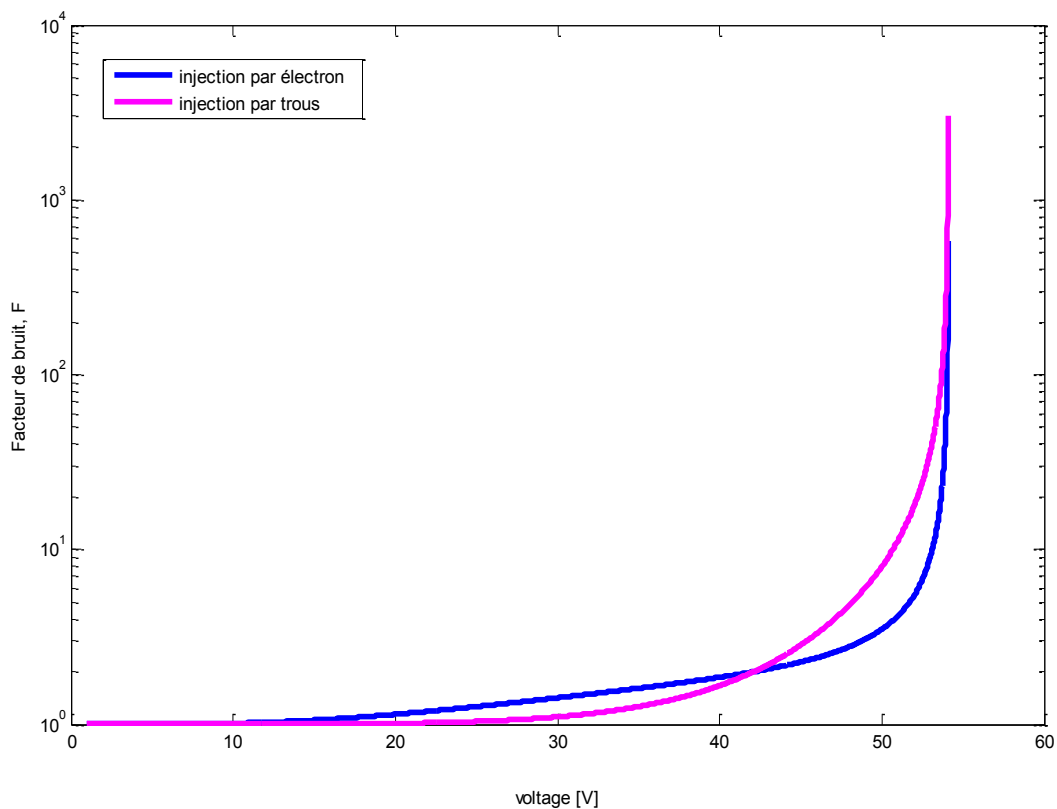


Figure III.6 Facteur de bruit en fonction de la tension de polarisation (injection par électron et injection par trous).

La figure III.6 présente le facteur de bruit en fonction de la tension de polarisation inverse pour une photodiode à avalanche pour les deux cas d'injection électron et trou.

Les deux facteurs de bruit des électrons et des trous sont identiques ( $M=1$ ) à une tension de polarisation  $< 10V$ . Par contre, ces deux gains commencent à augmenter pour des tensions de polarisation  $> 10V$  et atteignent leurs maximums près de la tension de claquage. En outre, le facteur de bruit dans le cas où l'injection est uniquement composée d'électrons, est inférieur à celui dans le cas où l'injection est uniquement composée de trous. Ce comportement est dû au rapport d'ionisation  $k$  qui diminue à des champs intenses dans le cas des dispositifs.

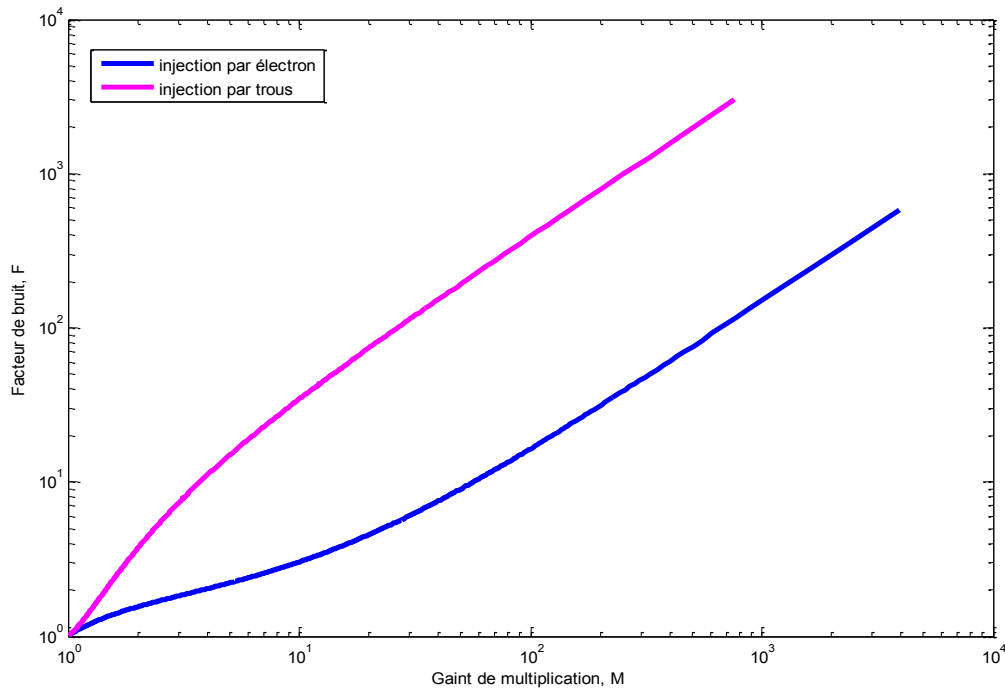


Figure III.7 : Facteur de bruit en fonction de gain de multiplication (injection par électron et injection par trous).

La figure III.7 représente le facteur d'excès de bruit en fonction du gain de multiplication pour les deux cas d'injection électrons et trous calculé pour les photodiodes à avalanche APDs étudiées avec une concentration de dopage de la zone de multiplication  $NB=10^{16}\text{cm}^{-3}$ .

Pour une injection pure des électrons, le facteur d'excès de bruit à un gain donné est moins élevé en comparaison avec le cas d'une injection pure des trous.

Donc, on peut dire que le cas le plus favorable pour minimiser le bruit est d'injecter uniquement le type de porteur qui a le plus grand coefficient d'ionisation (les électrons dans le cas de Silicium), d'autre terme, le plus faible facteur d'excès de bruit est obtenu pour la plus faible valeur de  $k$  pour une injection pure d'électrons en respectant: Plus  $k$  augmente et plus  $F$  augmente.

## III.4 Comparaison entre les modèles d'ionisation par impact (Selberherr et Grant)

### III.4.1 Modèle de Selberherr

Le modèle de taux d'ionisation proposé par Selberherr est une variante du modèle classique de Chynoweth. Ce modèle est implémenté dans l'outil de simulation SILVACO. Il est basé sur les expressions suivantes [11] :

$$\alpha_n = AN \exp \left[ - \left( \frac{BN}{E} \right)^{BETAN} \right] \quad \text{III.7}$$

$$\alpha_p = AP \exp \left[ - \left( \frac{BP}{E} \right)^{BETAP} \right] \quad \text{III.8}$$

Où  $E$  est le champ électrique dans la direction du flux de courant. Les paramètres  $AN$ ,  $AP$ ,  $BN$ ,  $BP$ ,  $BETAN$  et  $BETAP$  peuvent être définis dans l'instruction IMPACT. Ils sont définis par défaut dans SILVACO (voir le tableau 3.1). Les  $AN$ ,  $AP$ ,  $BN$  et  $BP$  sont également définis selon la valeur du champ électrique  $EGRAN$  (v/cm) (voir le tableau 3.1), où pour les champs électriques faibles  $< EGRAN$  les paramètres sont  $ANI$ ,  $API$ ,  $BNI$ ,  $BPI$ . En contrepartie, pour les champs électriques intenses  $> EGRAN$ , les paramètres deviennent  $AN2$ ,  $AP2$ ,  $BN2$  et  $BP2$ .

Dans ce modèle, les paramètres  $AN$  et  $BN$  sont également en fonction de la température du réseau cristallin. La dépendance à la température de ces coefficients est définie comme suit [11]:

$$AN = AN_{1,2} \left( 1 + A. NT \left[ \left( \frac{T_L}{300} \right)^{M.ANT} - 1 \right] \right) \quad \text{III.9}$$

$$AP = AP_{1,2} \left( 1 + A. PT \left[ \left( \frac{T_L}{300} \right)^{M.APT} - 1 \right] \right) \quad \text{III.10}$$

$$BN = BN_{1,2} \left( 1 + B. NT \left[ \left( \frac{T_L}{300} \right)^{M.BNT} - 1 \right] \right) \quad \text{III.11}$$

$$BP = BP_{1,2} \left( 1 + B. PT \left[ \left( \frac{T_L}{300} \right)^{M.BPT} - 1 \right] \right) \quad \text{III.12}$$

Paramètre	Défaut
AN1	$7.03 \times 10^5 \text{cm}^{-1}$
AN2	$7.03 \times 10^5 \text{cm}^{-1}$
AP1	$6.71 \times 10^5 \text{cm}^{-1}$
AP2	$6.71 \times 10^5 \text{cm}^{-1}$
BN1	$1.131 \times 10^6 \text{v/cm}$
BN2	$1.231 \times 10^6 \text{v/cm}$
BP1	$1.693 \times 10^6 \text{v/cm}$
BP2	$2.036 \times 10^6 \text{v/cm}$
BETAN	1.0
BETAP	1.0
EGRAN	$4 \times 10^5 \text{v/cm}$

Tableau III.1: Paramètres définissant le modèle d'ionisation par impact de Selberherr [11].

### III.4.2 Modèle de Grant

Le deuxième modèle d'ionisation a la même forme que le modèle de Selberherr mais une implémentation plus simple :

$$\alpha_n = AN \exp \left[ - \left( \frac{BN}{E} \right) \right] \quad \text{I.13}$$

$$\alpha_p = AP \exp \left[ - \left( \frac{BP}{E} \right) \right] \quad \text{I.14}$$

Cette implémentation a trois différences clés :

- Le modèle a une faible densité et une région de haute tension.
- Les coefficients pour le silicium sont différents.
- Il n'y a pas de dépendance à la température.

Ce modèle a été développé une enquête par Barama suggéré l'existence d'un bas. Région intermédiaire de réponse de champ élevé pour les vitesses de ionisation des trous. Les coefficients mis en œuvre dans ce modèle correspondent aux données expérimentales de la subvention, selon lesquelles les trois régions différentes existaient.

Ce modèle est activé avec l'instruction de paramètre. Les paramètres du modèle AN, AP, BN et BP ne sont pas définissables par l'utilisateur. Au lieu de cela les trois régions électriques ont des valeurs in-built comme suit [11] :

1) Champ électrique faible  $E < 2.4e5$  V/cm

$$AN=2.6e6 \quad AP=2.0e6$$

$$BN = 1.43e6 \quad BN = 1.97e6$$

2) Champ électrique intermédiaire

$$AN = 6.2e5 \quad AP= 2.0e6$$

$$BN = 1.08e6 \quad BP = 1.97e6$$

3) Champ électrique élevé

$$AN = 5.0e5 \quad AP = 5.6e5$$

$$BN = 9.9e5 \quad BP = 1.32e6$$

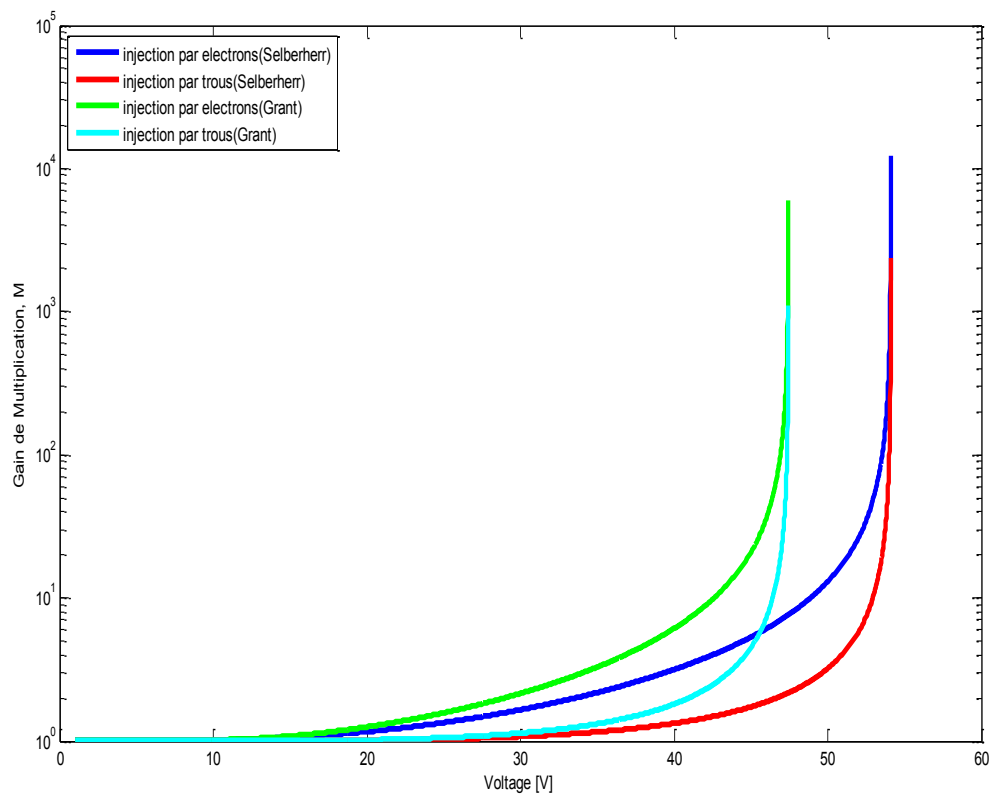


Figure III.8 : Gain de multiplication en fonction de la tension de la polarisation pour les deux modèles d'ionisation (Selberherr et Grant).

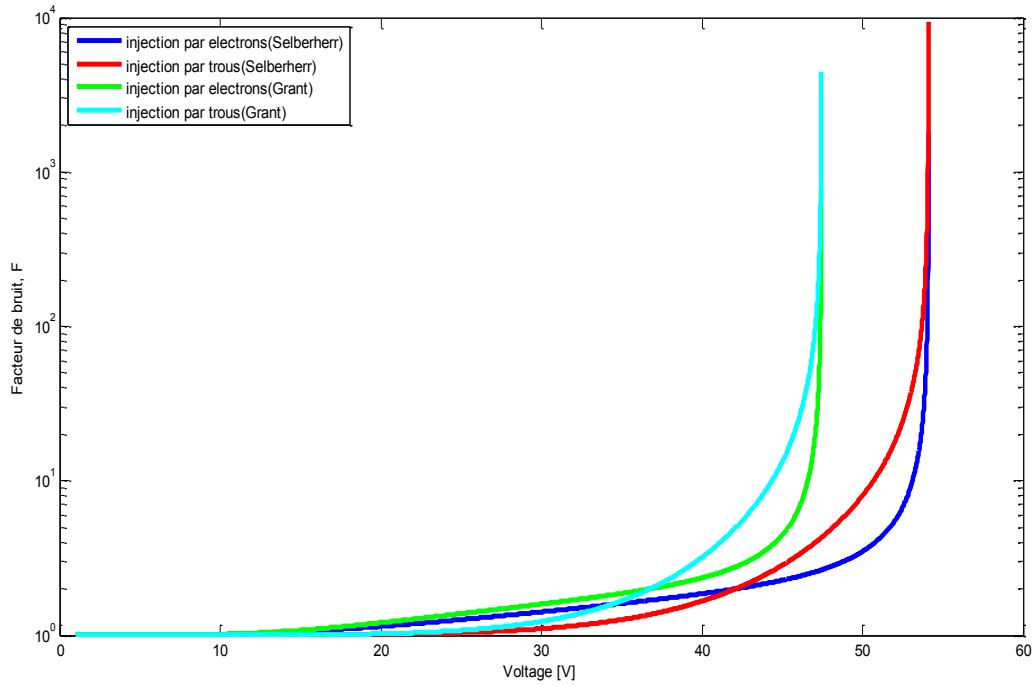


Figure III.9 : Facteur de bruit de multiplication en fonction de la tension de la polarisation pour les deux modèles d'ionisation (Selberherr et Grant).

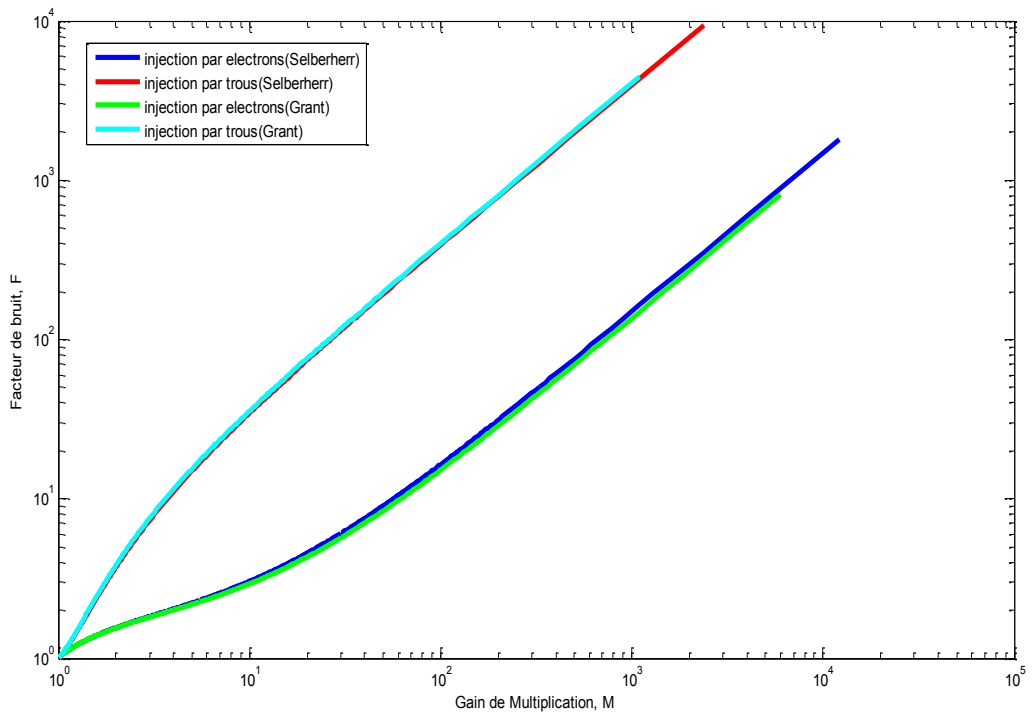


Figure III.10 : Facteur de bruit en fonction de gain de multiplication pour les deux modèles d'ionisation (Selberherr et Grant).

Les figures III.8 , III.9 et III.10 montrent la différence entre le gain, le facteur de bruit et la tension de claquage estimés par les deux modèles d'ionisation par impact (Selberherr et Grant).

Dans le cas du modèle de Grant, le gain et le facteur de bruit augmente rapidement avec la tension de polarisation, en comparaison avec le modèle de Selberherr, notamment près de la tension de claquage  $V_B$ . Cependant, la tension de claquage obtenue par le modèle de Selberherr est plus grande de celle du modèle de Grant.

Ces écarts de simulation sont similaires à la dispersion des résultats de mesure du fait de la variation du procédé technologique. Il n'y a pas véritablement un modèle particulier qui semble obtenir des résultats de simulation plus précis. En effet, quelque soit le modèle choisi, l'erreur reste non négligeable.

### III.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la structure étudiée (photodiode à avalanche) et leurs caractéristiques électriques. Ensuite, une implémentation des modèles analytiques de la photodiode APD à l'aide du logiciel MATLAB a été effectuée afin de décrire le principal comportement électrique de cette photodiode tel que la distribution du potentiel, le gain de multiplication et le facteur de bruit. Ces modèles seront utilisés dans le chapitre IV afin de former les fonctions objectives qui font l'objet de l'optimisation multi-objective.

## IV.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons décrit la notion des méthodes évolutionnaires pour résoudre les problèmes d'optimisation multi-objectifs, nous sommes constamment appuyés sur les modèles analytiques du gain et du bruit développés (code Matlab) dans le chapitre III pour étudier le comportement électrique de la photodiode à avalanche en régime statique d'un certain nombre de structures avec différent dopage de la zone de multiplication à différentes températures afin d'apprécier les limites de notre modélisation. Et spécialement, nous avons détaillé tout ce qui concerne les algorithmes génétiques, ainsi nous avons parlé des stratégies d'évolution.

Ce chapitre est consacré à la validation de la technique d'optimisation utilisée qui se base sur les principes des algorithmes génétiques tels qu'ils ont été décrits au chapitre II. une description brève du principe de la simulation des structures des photodiodes étudiées. Puis, on expose les résultats obtenus de la simulation et on les interprète par la suite.

## IV.2 Influence des paramètres caractéristiques (dopage et température)

Afin d'obtenir des résultats rapides et permettre d'étudier qualitativement l'influence de certains paramètres tels que le dopage et la température sur le fonctionnement des photodiodes à avalanche, un modèle analytique a été développé à l'aide de MATLAB.

### IV.2.1 Effet du dopage

Dans cette section, la tension de claquage, le gain de multiplication et le facteur d'excès de bruit sont calculés en utilisant le modèle d'ionisation par impact de Selberherr, afin d'évaluer les performances d'APD à différents dopages de la zone de multiplication.

#### IV.2.1.1 Etude du champ électrique

Afin d'évaluer la pertinence des hypothèses de départ pour la dérivation du modèle analytique électrostatique, les résultats du calcul du champ électrique sont illustrés sur la figure (VI.1), pour différentes concentrations de dopage  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  à  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . La photodiode à avalanche a été polarisée en inverse par des tensions près de la tension de claquage.

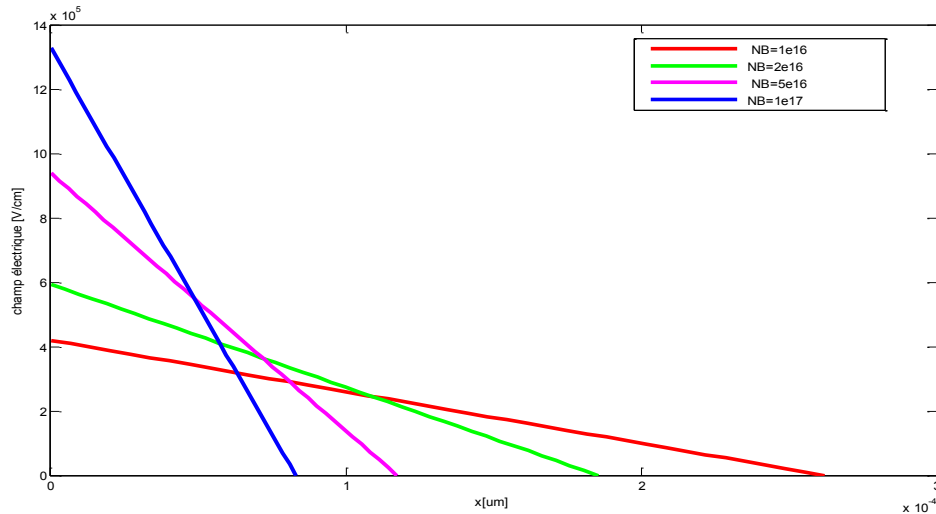


Figure IV.1 : Distribution du champ électrique dans la zone de multiplication.

D'après la figure VI.1 nous remarquons que l'augmentation de la concentration du dopage de la zone de multiplication, résulte une élévation du pic du champ électrique dans la jonction N+/P, et une diminution de la longueur de la zone de déplétion. Donc, on peut dire qu'un faible dopage de la zone de multiplication offre l'avantage de présenter une zone de déplétion beaucoup plus large.

Autrement dit, pour avoir un taux favorable de collection des porteurs de charges, il faut appliquer au détecteur à photodiode un champ électrique élevé. Ceci est fait par augmentation de la concentration de dopage de la zone de multiplication.

#### IV.2.1.2 Etude de gain de multiplication, facteur de bruit et la tension de claquage

Le gain de multiplication et le facteur de bruit obtenus avec notre modèle combiné sont calculé pour les deux cas d'injection (injection par trous et par électron), et pour différentes concentration de dopage comprises entre  $N_B = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  à  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . Les résultats de simulation sont illustrés sur les figures (VI.2) et (VI.3) Comme on s'y attendait, ces figures montrent que, tant que les coefficients d'ionisation d'électrons sont plus grandes que ceux des trous dans les dispositifs à base de Silicium, le gain de multiplication et le facteur de bruit pour une injection d'électrons sont plus grands que ceux pour une injection des trous. Cependant, cette différence diminue en augmentant la concentration du dopage de la région de multiplication, à cause de la réduction du rapport des coefficients d'ionisation électron/trou qui diminue à des champs électriques élevés.

Dans une photodiode à avalanche, une tension de polarisation inverse très élevée fournit une grande quantité d'énergie aux porteurs minoritaires (paires électron-trou).

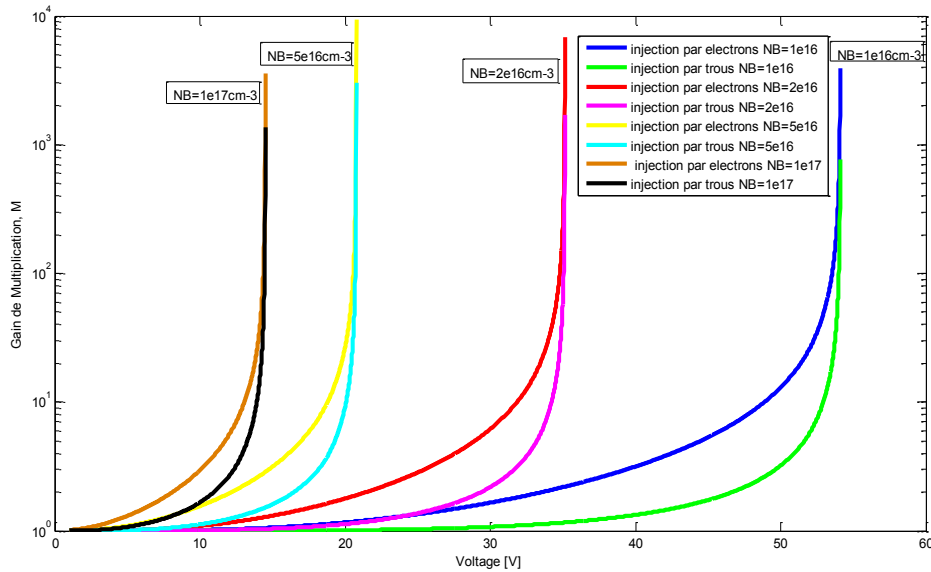


Figure IV.2: Gain de multiplication en fonction de la tension de la polarisation pour différentes valeurs de la concentration de dopage  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,  $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,  $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .

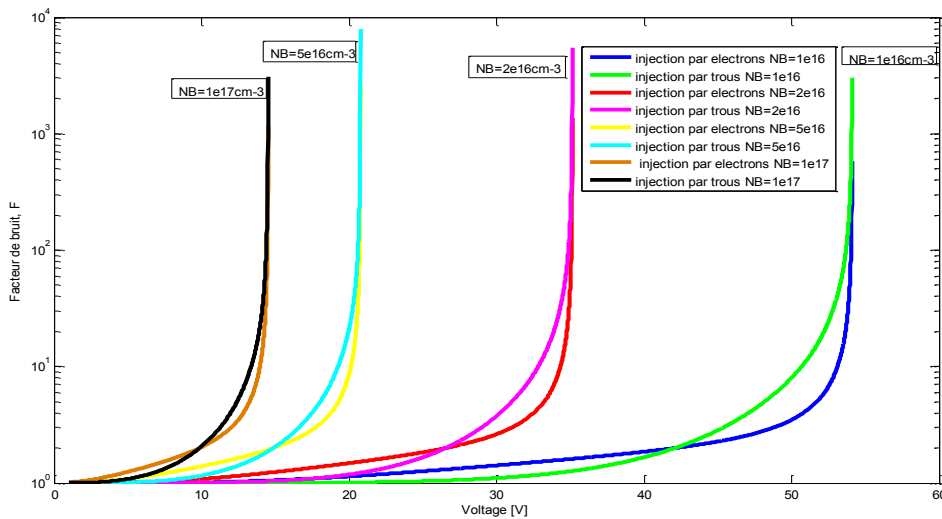


Figure IV.3: Facteur de bruit en fonction de la tension de la polarisation pour différentes valeurs de la concentration de dopage  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,  $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,  $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .

D'après la figure (VI.2) et (VI.3) précédente nous remarquons que l'effet de la concentration du dopage sur la tension du claquage. Cette dernière correspond à chaque structure en utilisant successivement les différentes valeurs des concentration du dopage  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,  $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,  $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . Nous avons trouvé que la tension de claquage

diminue lorsque on augmente la concentration du dopage de la zone de multiplication. Elle diminue de 54V à 14V lorsque  $N_B$  augmente de  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  à  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  (voir tableau VI.1).

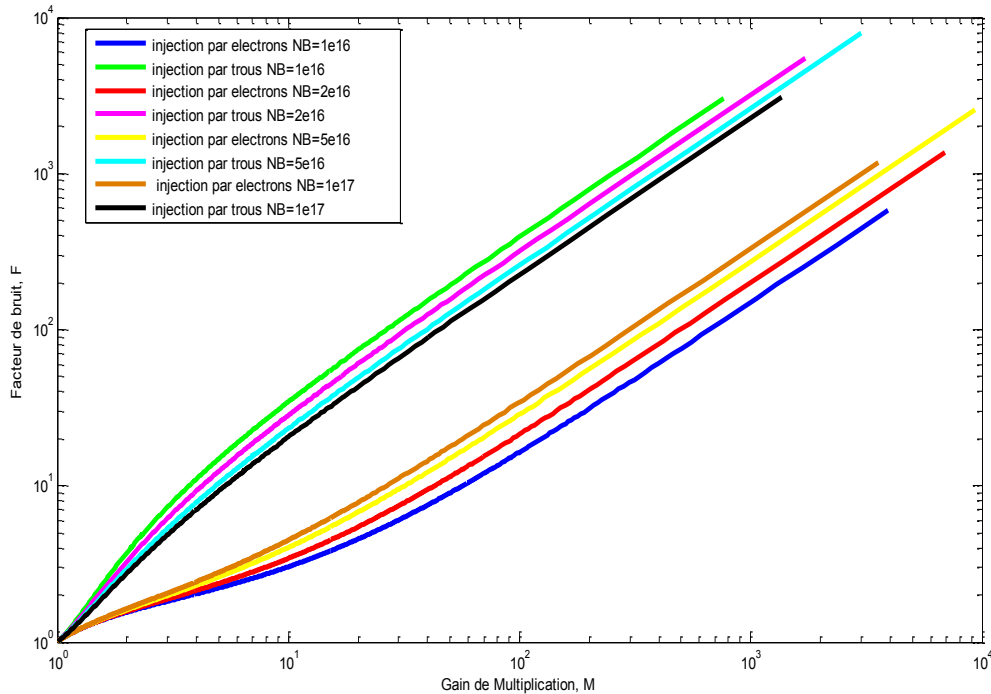


Figure IV.4: Facteur de bruit en fonction de la tension de gain de multiplication pour différentes valeurs de la concentration de dopage  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,  $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,  $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .

La figure VI.4 représente le facteur d'excès de bruit en fonction du gain de multiplication pour les deux cas d'injection électrons et trous calculé pour les dispositifs APDs étudiées avec une concentration de dopage différentes, à la température ambiante  $T=300^\circ\text{K}$ .

Cette figure illustre que la diminution de la concentration de dopage permet de réduire l'excès de bruit pour une température ambiante  $T=300^\circ\text{K}$  dans le cas d'injection pure des trous. Cependant, le facteur de bruit augmente dans le cas d'injection pure d'électrons. Ce comportement résulte d'une diminution du ratio des taux d'ionisation à des concentrations croissantes.

Alors, on peut conclure que le cas le plus favorable pour minimiser le bruit est de minimiser la concentration du dopage dans le cas d'une injection pure d'électron, d'autre terme, le plus faible facteur d'excès de bruit est obtenu pour des champs faibles. Par contre, pour minimiser le bruit dans le cas d'une injection pure des trous, il faut augmenter la

concentration du dopage de la zone de multiplication, d'autre terme, le plus faible facteur d'excès de bruit est obtenu pour des champs intenses.

Dans cette partie, Nous allons maintenant étudier l'effet de la variation de la concentration du dopage de zone de multiplication sur la tension de claquage dans l'intervalle de  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  à  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  pour une température fixée à  $300^\circ\text{K}$ .

Le tableau suivant résume les résultats de simulation. Ces résultats sont plotés dans la (figure IV.5).

$N_B$	$10^{16}$	$2 \times 10^{16}$	$5 \times 10^{16}$	$8 \times 10^{16}$	$10^{17}$
$V_B$	54.11	35.14	20.77	16.22	14.51

Tableau VI.1 : Sensibilité de la tension de claquage à la concentration du dopage.

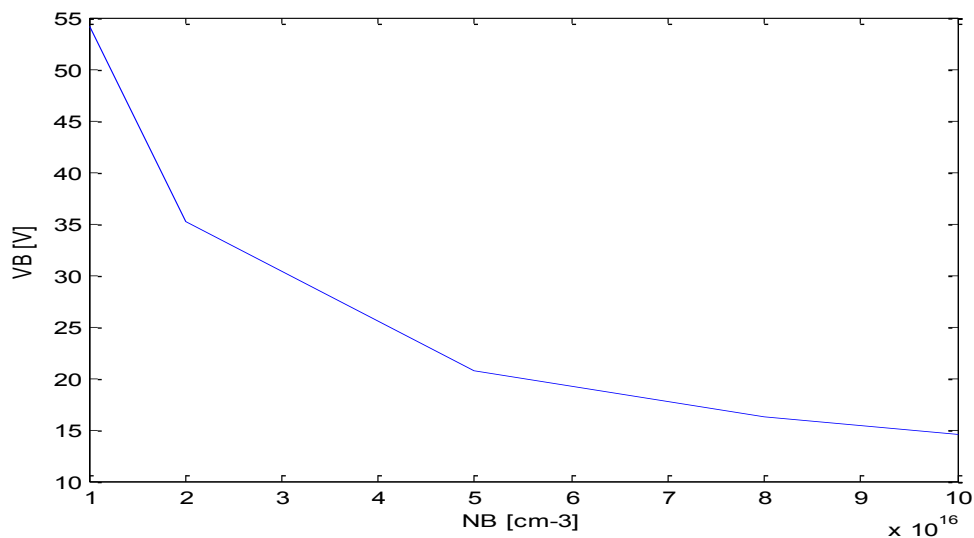


Figure IV.5: Tension en fonction la concentration du dopage.

D'après la figure (VI.5) ci-dessous nous remarquons que l'augmentation de la concentration du dopage provoque une diminution de la tension de claquage. Elle diminue de 54,11V à 14,51V lorsque  $N_B$  augmente de  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  à  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .

## IV.4 Effet de la température

### IV.4.1 Principe de la simulation

Dans cette section, nous sommes intéressés d'étudier l'impact de la température sur les performances électriques de la photodiode à avalanche. Par implémentation du modèle

d'ionisation de Selberherr et en introduisant l'effet de la température, le gain M, le facteur d'excès F de bruit et la tension de claquage  $V_B$  ont été calculés.

Cette fois le modèle d'ionisation par impact utilisé dans la simulation est le modèle empirique de Selberherr. Ce modèle utilise des coefficients dépendant de la température où les coefficients d'ionisation prennent les formes suivantes:

$$\alpha = A_N(T) \exp\left(-\frac{B_N(T)}{E}\right)^{\delta_n} \tag{IV.1}$$

$$\beta = A_P(T) \exp\left(-\frac{B_P(T)}{E}\right)^{\delta_p} \tag{IV.2}$$

#### IV.4.2 Etude du gain de multiplication, la facteur de bruit et la tension de claquage

Dans cette section, la tension de claquage, le gain de multiplication et le facteur d'excès de bruit sont calculés en utilisant le modèle d'ionisation de Selberherr afin d'évaluer les performances d'APD à différents niveaux de température. Le gain de multiplication et le facteur de bruit, obtenus avec notre modèle combiné, et prévu pour différentes températures comprises entre  $T = 100^\circ \text{ K}$  et  $500^\circ \text{ K}$ , sont illustrés sur les figures VI.6 et VI.7 et VI.8.

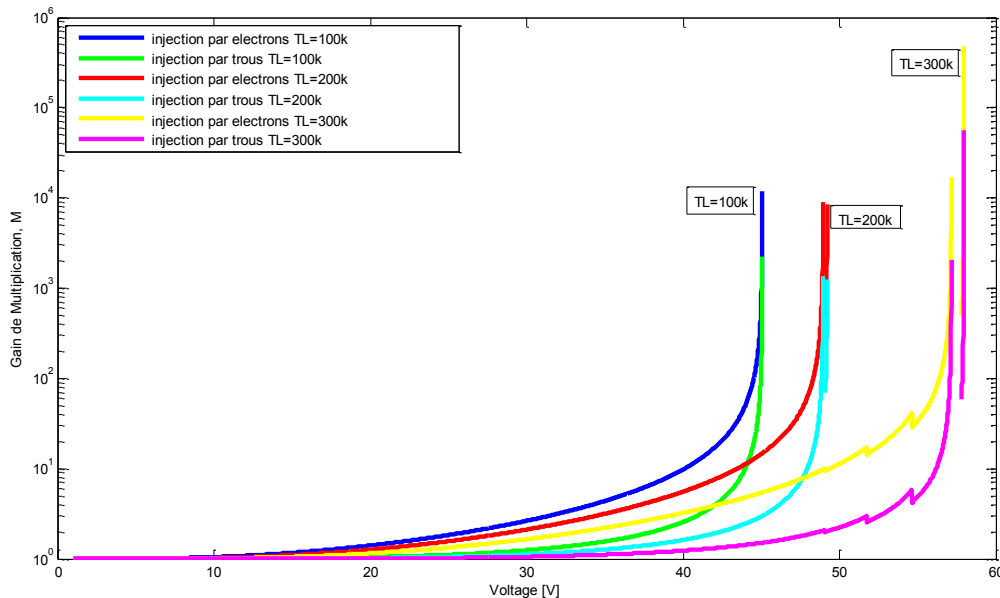


Figure IV.6: Gain de multiplication en fonction de la tension de la polarisation pour différente valeur de température 100k , 300k et 500k.

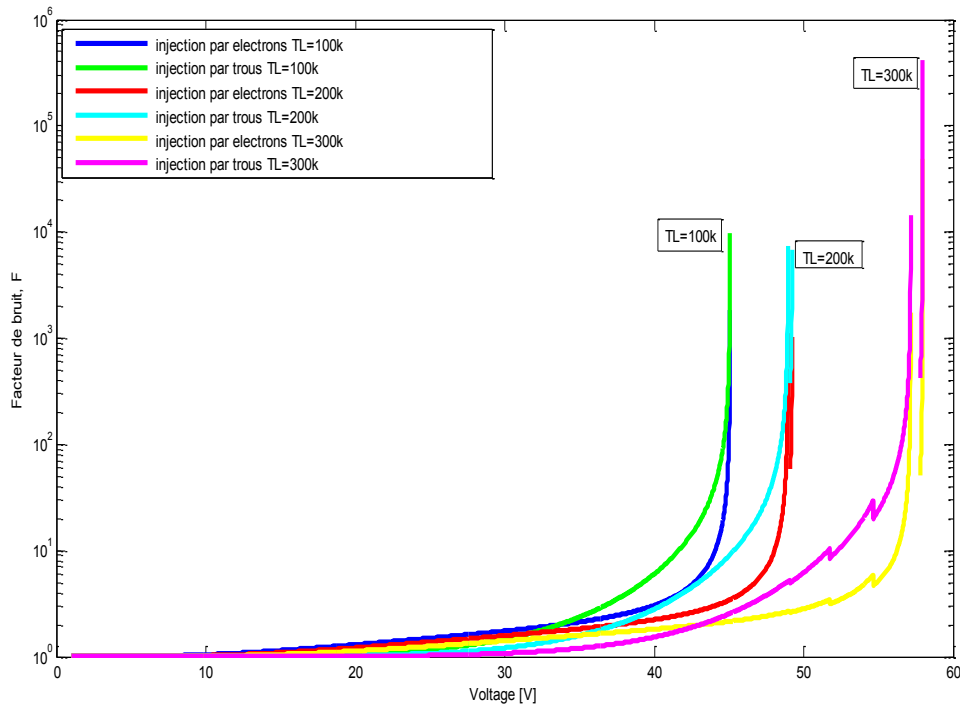


Figure IV.7: Facteur de bruit de multiplication en fonction de la tension de la polarisation pour différente valeur de température 100k , 300k et 500k.

D'après les figures précédentes, nous remarquons que le gain de multiplication est le facteur de bruit (dans le cas d'une injection pure d'électrons) sont plus grands que ceux du processus injection par trous. Cependant, cette différence reste presque la même en augmentant la température de 100°K à 500°K.

L'évolution des caractéristiques gain-tension et facteur de bruit-tension dans les figures (IV.6) et (IV.7) montrent l'effet de la température sur la tension du claquage. Nous avons trouvé que la tension de claquage augmente lorsque on augmente la température. Elle augmente de 45V à 58V lorsque T augmente de 100°K à 500°K

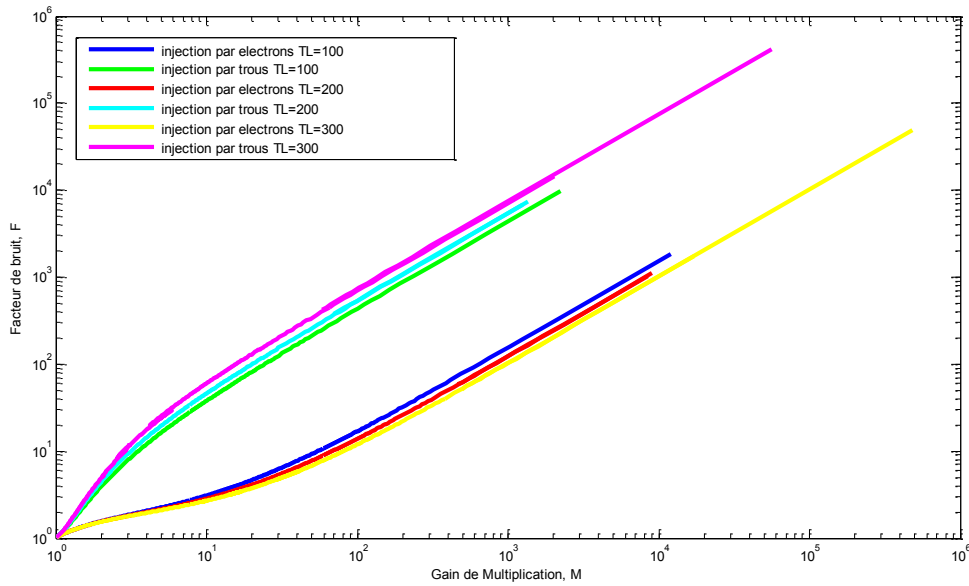


Figure IV.8: Facteur de bruit en fonction de la tension de gain de multiplication pour différente valeur de température 100k , 300k et 500k.

Cette figure IV.8 illustre que l'augmentation de la température ambiante permet de réduire l'excès de bruit F pour une concentration de dopage donné  $N_B=10^{16} \text{ cm}^{-3}$  dans le cas d'injection pure d'électrons, contrairement F augmente dans le cas d'injection pure de trous.

Ce comportement résulte d'une diminution du ratio des taux d'ionisation à des températures croissantes. En outre, comme on peut observer sur la figure (IV.8), à une concentration de  $N_B = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , les caractéristiques bruit-gain sont moins sensibles aux variations de température.

### IV.5 Sensibilité des paramètres électriques à la température

Dans cette section, Nous allons maintenant étudier la sensibilité de la tension de claquage à la variation de la température dans l'intervalle 100°K à 500°K pour une concentration de dopage fixe de  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ .

Le tableau (IV.2) regroupe les valeurs de résultat de la simulation :

T (K)	100°K	200°K	300°K	400°K	500°K
VB	45.07	46.52	49.22	52.91	57.94

Tableau IV.2 : Sensibilité de la tension de claquage à la température.

Pour mieux illustrer la dépendance de cette grandeur nous avons tracé la figure (VI.11):

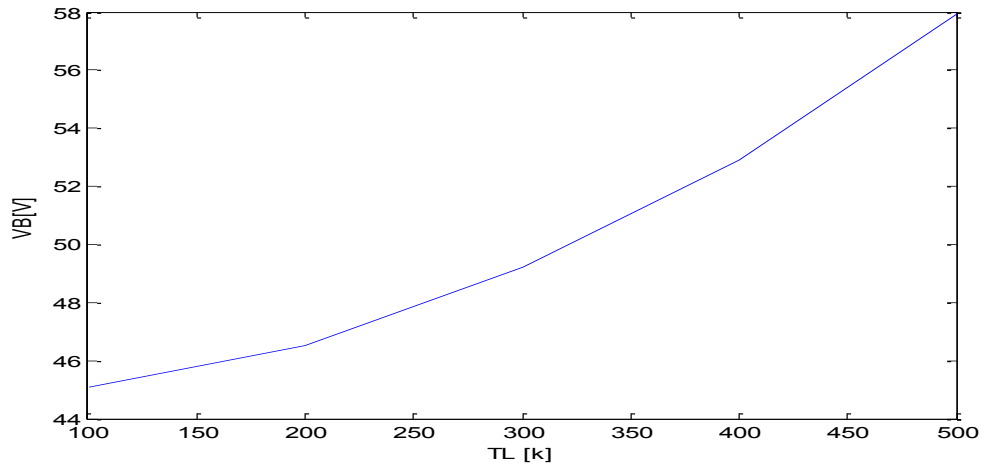


Figure IV.9: Tension de claquage en fonction de la température

D’après la figure précédente nous remarquons que la tension, aussi que la température est augmentée. Bien que pour une meilleure optimisation des paramètres.

Cette figure montre que la dépendance de la tension de claquage avec la température est linéaire dont l’augmentation de la température provoque une augmentation de la tension de claquage pour une concentration de dopage donnée  $NB=10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . Le comportement obtenu est dû à une augmentation de la population des phonons avec la température.

L’idée dans cette partie, est de connaître l’influence directe de la température sur le gain de multiplication et le facteur de bruit mais cette fois la tension de polarisation doit être fixe. Par projection sur les caractéristiques gain-tension et facteur de bruit-tension, on obtient le résultat illustré dans le tableau VI.3.

T (K)		100 °K		200 °K		300 °K		400 °K		500 °K	
$M_e$	$M_h$	752	141.4	14.43	6.94	5.39	1.53	8.12	1.91	37.32	6.94
$F_e$	$F_h$	116.8	612.6	3.39	8.85	2.14	2.52	2.52	4.23	6.68	27.17

Tableau IV.3 : Gain de multiplication et facteur de bruit en fonction de la température.

Les résultats du tableau IV.3 sont plotés dans la figure IV.12 :

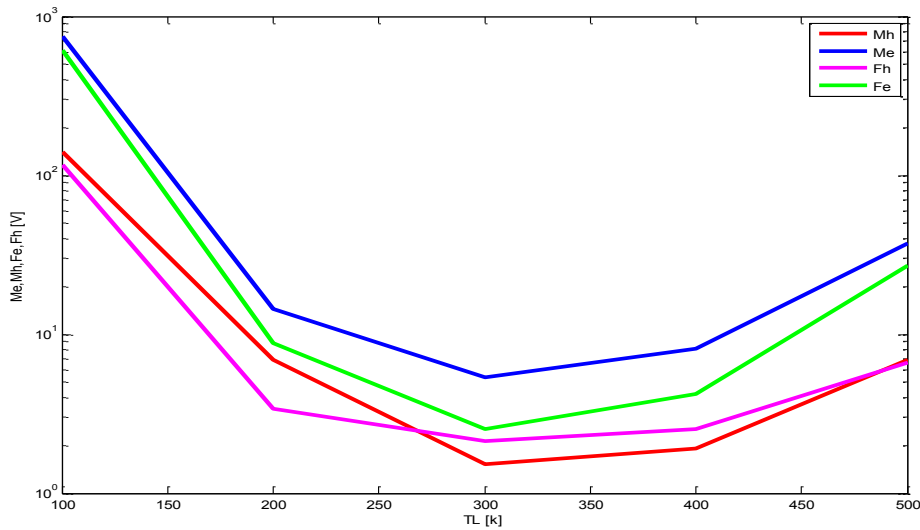


Figure IV.10: Gain de multiplication et facteur de bruit en fonction de la température  $T(^{\circ}\text{K})$  à une tension de polarisation fixe.

D'après les résultats de la figure IV.10, on remarque que le gain de multiplication et le facteur de bruit varient d'une façon parabolique avec la température de  $100^{\circ}\text{K}$  à  $500^{\circ}\text{K}$ . Ce qui explique la dépendance non linéaire entre ces deux paramètres électrique et la température.

## IV.5 Identification des paramètres électriques en utilisant les algorithmes génétiques AG<sub>S</sub>

### IV.5.1 Méthodologie de calcul

Les stratégies conventionnelles d'ajustement des paramètres, telles que la méthode d'optimisation de paramètres par les AGs fournit des solutions optimales globales des paramètres électrique de la photodiode étudiée. Actuellement, Il existe beaucoup modèles qui définis le comportement de la photodiode. Dans notre travail on a choisi le modèle implicite de McIntyre puisque il utilise peu de paramètres. Dans ce chapitre on a considéré les paramètres : température :  $T$ , dopage :  $N_B$  et tension de polarisation :  $V$  comme des paramètres électriques à optimier par les AGs.

Dans cette application, on présente l'applicabilité des algorithmes génétiques pour l'ajustement des paramètres de la photodiode à avalanche, par l'utilisation de modèle électrique de McIntyre implémenté dans MATLAB. L'organigramme de l'approche

évolutionnaire proposée pour trouver les solutions optimales est présenté par la figure (IV.11) Le procédé d'optimisation arrête le calcul évolutionnaire lorsque le critère d'arrêt soit satisfait.

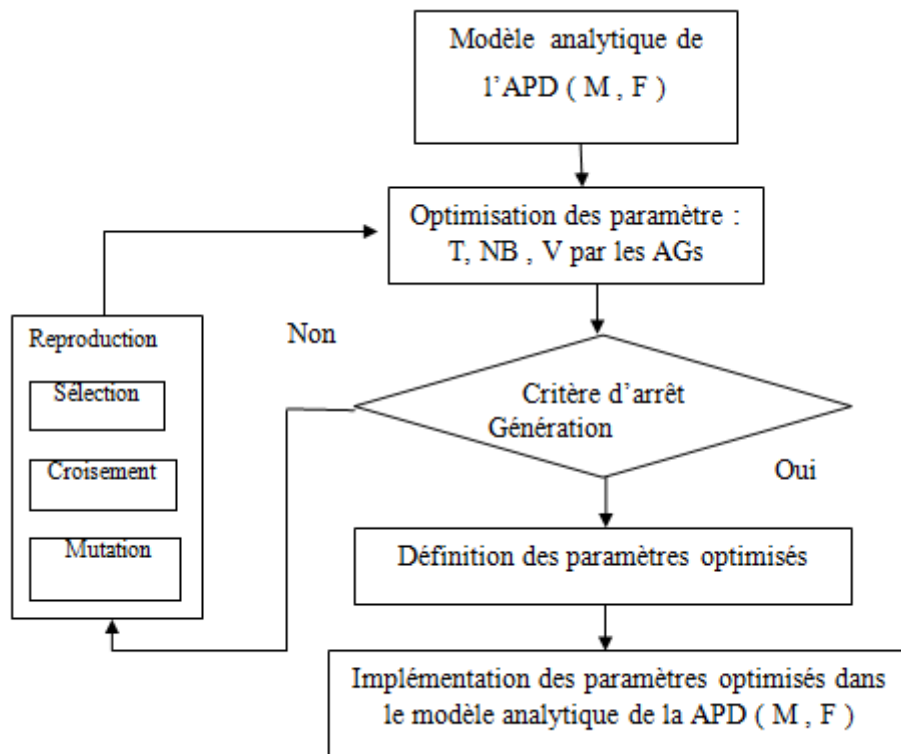


Figure IV.11: Organigramme de l'approche évolutionnaire proposée pour la détermination des paramètres électriques de l'APD.

#### IV.5.2 Définition des paramètres électriques

Dans cette application, les paramètres électriques de l'APD ( $T$ ,  $N_B$ ,  $V$ ) sont regroupés dans un vecteur appelé chromosome, ces paramètres sont optimisés par les AGs.

Selon le modèle de McIntyre qui décrit le comportement électrique du gain et du facteur de bruit, il est important de trouver la meilleure configuration des paramètres ( $T$ ,  $N_B$ ,  $V$ ) pour optimisée le gain et le facteur de bruit.

Les coefficients  $T$ ,  $N_B$ , et  $V$  représentent les paramètres d'ajustement qui vont être optimisés par les AGs afin de maximiser le gain de multiplication et de minimiser le facteur de bruit.

### IV.5.3 Implémentation des paramètres de la technique (AG<sub>S</sub>)

Pour l'implémentation de la technique AG<sub>S</sub>, des règles de la boîte d'outil, sous MATLAB, des algorithmes génétiques (AG<sub>S</sub>) a été utilisé (voir figure IV.12):

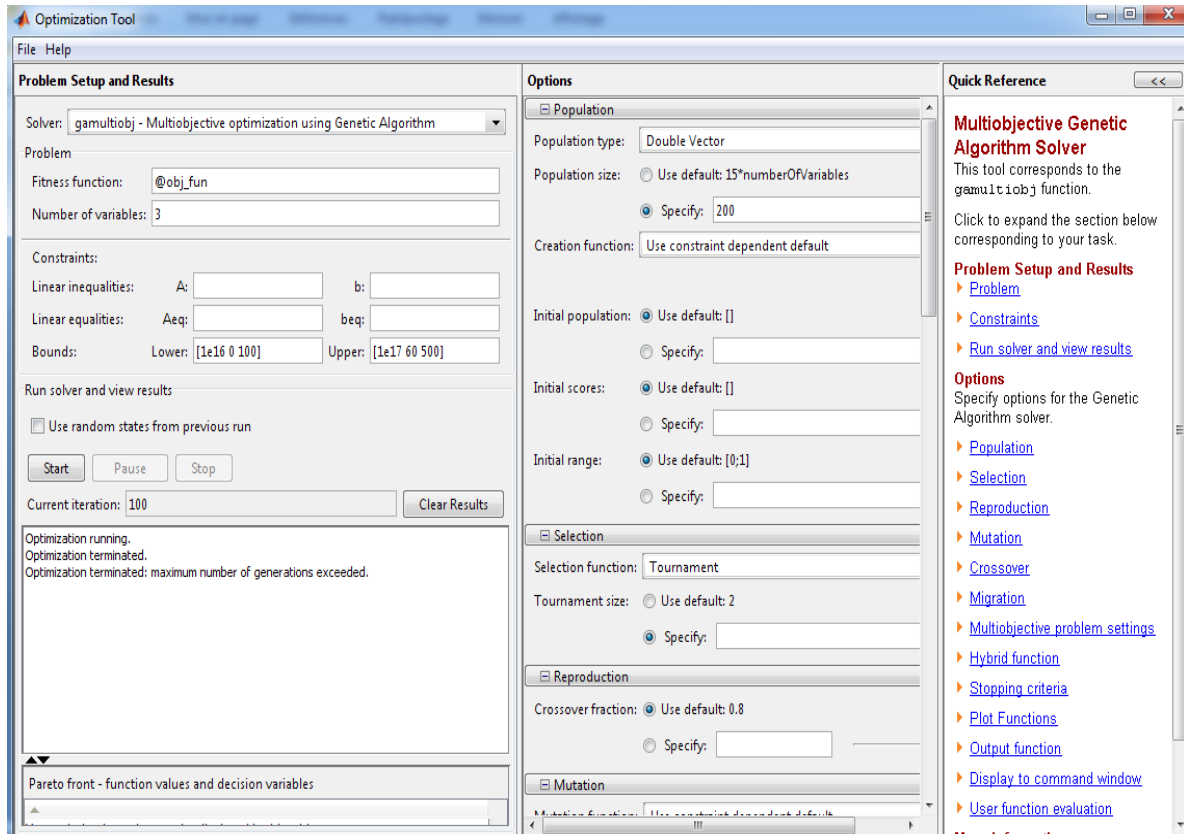


Figure IV.12: Outil d'optimisation GA-Tool.

Dans cette simulation on a configuré l'outil d'optimisation GA-Tool comme suit :

- Le tournoi: est la méthode utilisée pour la sélection, cette méthode sélectionne chaque parent par le choix aléatoire des individus puis elle choisi le meilleur individu pour être l'individu parent.
- Le croisement dispersé 'Scattered crossover': il crée un vecteur binaire aléatoirement, puis il sélectionne les gènes suivant le vecteur créé où le '1' sélectionne le gène du premier parent et le '0' sélectionne le gène du deuxième parent, la combinaison des gènes sélectionnés a le rôle de produire l'enfant de la prochaine génération.
- La mutation uniforme : est un processus en deux étapes. D'abord, l'algorithme choisit une fraction du vecteur d'entrées de l'individu pour la mutation, où chaque entrée a une probabilité de d'être mutée (taux de mutation). Dans la deuxième étape,

l'algorithme remplace chaque entrée choisie par un nombre aléatoire choisi uniformément à partir du vecteur d'entrées.

Notre processus d'optimisation est assuré par une population de 500 individus pour chaque génération et 100 générations. Les paramètres utilisés dans cette étude sont résumés dans le tableau IV.2

Les paramètres de AG	Valeurs
La taille de la population	500
Le nombre Maximum de générations	100
La sélection	Tournoi
Le croisement	Dispersé
La mutation	Uniform
Taux de mutation	0.5
Taux de reproduction 0.1	0.1

Tableau IV.4: Paramètres de GA utilisés dans cette application.

## IV.6 Optimisation multi-objectifs des paramètres électriques

Dans cette expérience évolutionnaire, la complexité du problème est vraiment étendue. L'objectif de l'évolution du problème est d'avoir un compromis entre un max gain et un min facteur de bruit en ajustant les trois paramètres (T, NB, V).

Dans cette expérience, nous avons utilisé le principe des algorithmes génétiques multi-objectif (MOGA) ou la fonction fitness est modifiée et donnée par:

$$f = w_1 \cdot f_1 + w_2 \cdot f_2 \quad \text{IV.4}$$

ou:  $f_1, f_2$  représentent les fonction fitness des caractéristique gain de multiplication et le facteur de bruit respectivement calculées à l'aide de modèle de McIntyre implémenté dans MATLAB.

où :  $w_1, w_2$  représentent les poids qui respectent :  $\sum_{i=1}^2 w_i = 1$

Afin d'ajuster les paramètres électriques dans le modèle analytique qui décrit le comportement des caractéristiques gain-tension et facteur de bruit-tension pour différente valeur de température et concentration de dopage, il faut minimiser la fonction fitness  $f$  pour

obtenir la meilleure solution (meilleur chromosome  $T, NB, V$ ) dans la population pour avoir un gain Max et un facteur de bruit Min.

## IV.7 Résultat et discussion

Dans cette expérience, une simulation multiobjective a été effectuée afin d'ajuster les paramètres ( $T, NB, V$ ) pour avoir un maximum de gain de multiplication et un minimum de facteur de bruit dans les deux cas d'injection par électron (figure IV.16) et par trous (figure IV.16).

Les solutions optimales sont obtenues sous forme d'un front appelé front Pareto. Ces solutions correspondent à des individus non-dominants qui présentent simultanément les meilleures solutions de la fonction objective.

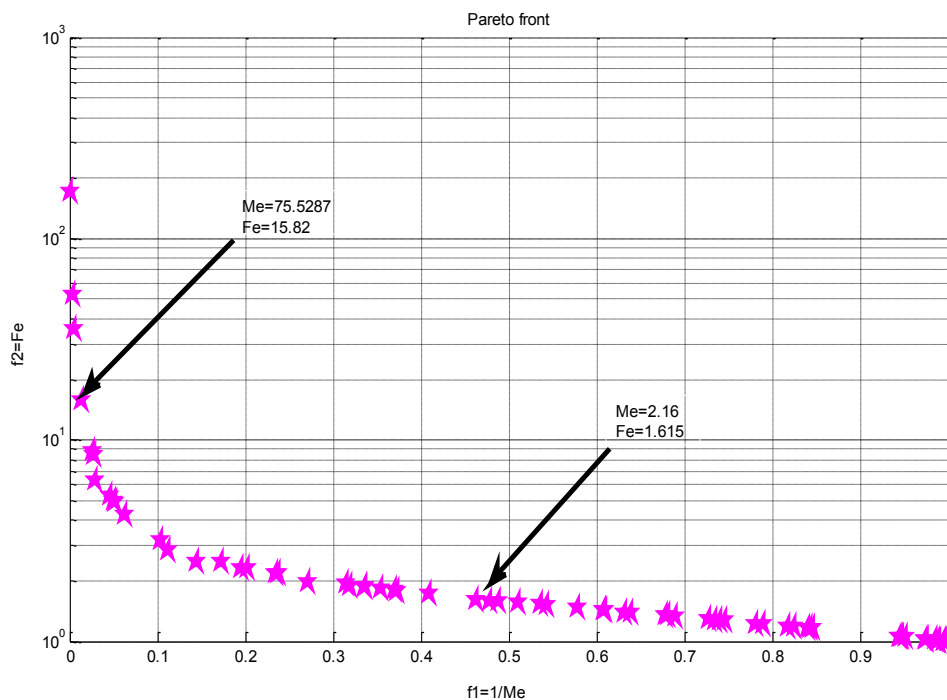


Figure IV.13: Front Pareto (injection par électron).

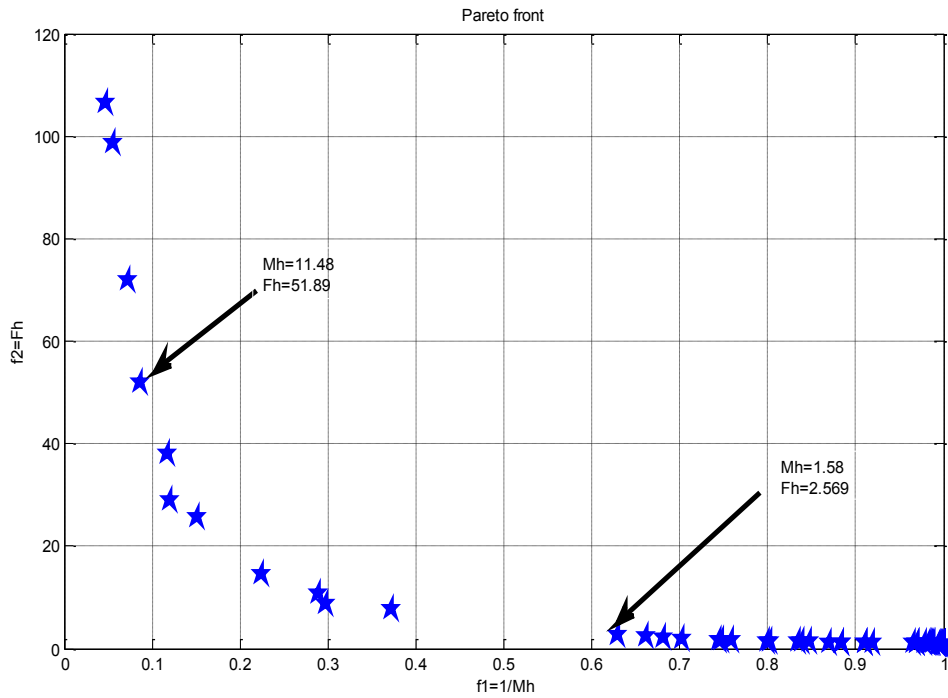


Figure IV.14: Front Pareto (injection par trou).

Les figures IV.13 et IV.14 représente la surface du front Pareto. Chaque point représente la valeur de la fonction objective  $M_e, F_e$ , et  $M_h, F_h$  obtenue par la configuration de chromosome  $(T, N_B, V)$ . les points sélectionnés qui sont représentés dans les deux figures correspondent aux paramètres électriques de la photodiode à avalanche résumés dans les tableaux IV.5 et IV.6.

On peut dire que ces solutions dans le front Pareto sont associées avec le gain de multiplication maximum et le facteur de bruit minimum pour les deux cas d'injection (par électron et par trou) respectivement. Ceci est notre objective.

	Structure Optimisée	Structure non Optimisée 1	Structure non Optimisée 2
$N_B$	7.2725e+16	2e16	3e16
$V_V$	18.2180	25	10
$T_L$	345.1299	300	333
<b>Fonctions objectives</b>			
$M_e$	30.7049	4.2589	1.3082
$F_e$	6.7633	2.1078	1.2425

Tableau IV.5 : Comparaison des paramètres de l'PAD (injection par électron).

	Structure Optimisée	Structure non Optimisée 1	Structure non Optimisée 2
$N_B$	6.5052e+16	2e16	3e16
$V_V$	19.0611	25	10
$T_L$	275.8293	300	333
<b>Fonctions objectives</b>			
$M_h$	10.2249	1.5328	1.0359
$F_h$	39.3750	2.2995	1.0435

Tableau IV.6 : Comparaison des paramètres de l'PAD (injection par trou).

Les tableaux IV.5 et IV.6 illustrent les trois structures de la photodiode extrêmes dans le domaine d'optimisation. La structure optimisée est associée au meilleur gain de multiplication (maximum)  $M_e=30.7$ (injection par électron),  $M_h=10.2$  (injection par trou) par rapport à celles non optimisées. Par contre, cette structure est associée au mauvais facteur de bruit  $F_e=6.7$ (injection par électron),  $F_h=39.3$ (injection par trou). Donc, on peut conclure que une amélioration du gain de multiplication exige la sacrifice du deuxième paramètre qui est le facteur de bruit.

## IV.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'effet de la température et la concentration du dopage sur la tension de claquage, le gain de multiplication et le facteur de bruit dans les APDs de silicium. On a constaté que l'augmentation du niveau de dopage dans la région de multiplication réduit la tension de claquage. En outre, la sensibilité à la température de la tension de claquage est plus prononcée pour la concentration de dopage faible. Nous avons montré l'applicabilité des algorithmes génétiques pour étudier le comportement physique des dispositifs photodiode à avalanche. L'objectif de ce chapitre était l'ajustement des paramètres électriques de la photodiode à avalanche (température, dopage et tension de polarisation) qui a été accomplie dans un temps relativement faible et sans besoin d'intervention de l'utilisateur pendant le processus d'optimisation.

Des résultats et discussions ont été abordés sur les méthodes utilisées dans notre mémoire, indiquent que le technique AG multi-objectif présentent une meilleure stratégie conventionnelle d'ajustement des paramètres, elles fournissent des solutions optimales globales.

L'application des AGs indique que l'approche utilisée est particulièrement appropriée pour être implémentée dans des simulateurs de composants électroniques pour étudier les photodiodes à avalanche APD.

## Conclusion générale :

Dans ce mémoire, nous avons conçu une application (Matlab) permettant de résoudre ce genre de problèmes par AG<sub>S</sub>, nous avons d'abord effectué une recherche théorique, commençant par le principe générale d'optimisation, qui inclue quelques explications concernant les caractéristiques de la photodiode à avalanche APD.

Nous avons également présenté des généralités sur les algorithmes génétiques AG<sub>S</sub> et nous avons aussi montré le principe d'optimisation par algorithmes génétiques AG<sub>S</sub>.

Dans ce travail nous avons étudié l'effet des paramètres électriques d'une photodiode à avalanche APD, extraire ces paramètres en utilisant les AG<sub>S</sub>. Ensuite, nous avons entamé dans la partie simulation de notre mémoire, qui décrit en détail notre étude techniques d'optimisation.

Dans la première partie du mémoire nous avons rappelé des généralités sur les photodiodes à avalanche APD, leur principe de fonctionnement, leurs caractéristiques, leur modèle électrique équivalent. Nous avons en suite décrit l'influence des divers paramètres : gain de multiplication, facteur d'excès de bruit et la tension d'avalanche. Finalement nous avons présenté les avantages et les inconvénients de photodiode à avalanche APD.

Dans la deuxième partie nous avons décrit la nature des algorithmes génétiques AG<sub>S</sub>. Nous avons ensuite présenté le principe de fonctionnement des AG<sub>S</sub> et leurs caractéristiques principales, puis nous avons abordé les opérateurs génétiques, enfin nous avons présenté les Avantages et inconvénients des algorithmes génétiques.

Dans la troisième partie on a représenté les caractéristiques électriques de la photodiode à avalanche, et on a représenté la première partie de résultats obtenus lors des simulations qui seront ensuite utilisés comme entrées pour le simulateur électrique. Dans cette partie le modèle de McIntyre a été développé sous Matlab et les résultats de simulation caractéristiques électriques de la photodiode à avalanche sont présentés. En outre, une comparaison entre les modèles d'ionisation par impact (Selbererr et Grant) a été effectuées.

Enfin, dans le quatrième chapitre, nous avons montré l'applicabilité des algorithmes génétiques multiobjective pour étudier le comportement physique des dispositifs à photodiode à avalanche. L'objectif de ce chapitre était l'extraction des paramètres électriques de la photodiode à avalanche qui a été accomplie dans un temps relativement faible et sans besoin d'intervention de l'utilisateur pendant le processus d'optimisation.

Les résultats indiquent que la technique d'optimisation par les AG<sub>S</sub> multi-objective présente une meilleure stratégie conventionnelle d'ajustement de paramètres, elles fournissent des solutions optimales globales.

Cette étude nous a permis de montrer l'efficacité de la technique d'optimisation des paramètres électriques des composants semi-conducteur particulièrement l'optimisation multi-objective. Cette dernière est un domaine très vaste et ouvert qui permet de mener toute amélioration. De ce fait, le travail que nous avons fait reste ouvert à d'autres idées et améliorations.

Comme perspective, on espère dans les futurs travaux améliorer les résultats obtenus dans ce manuscrit par des techniques plus performantes.

## Bibliographie

- [1] O.Bendrihem, « effet des défauts sur les caractéristiques électriques du transistor BMFET à base de 4H-Sic », mémoire Master, Université Mohamed khider Biskra, 2014.
- [2] T. Kaneda, H. Fukuda, T. Mikawa, Y. Banba, Y. Toyama, and H. Ando, «Shallowjunction p+-n germanium avalanche photodiodes (APD's) », Appl. Phys. Lett., vol. 34,no. 12, p. 866, 1979.
- [3] A.Bouafia, « Modélisation et optimisation des paramètres électriques des photodiodes d'avalanche », Mémoire Master, Université de M'sila , 2016.
- [4] L.Saadi, « Optimisation MultiObjectifs par Programmation Génétique », Université de Batna, 2007.
- [5] T.A. Corbeil, « Modélisation de photodétecteurs à base de matrices de diode avalanche monophotoniques pour tomographie d'émission par positrons», Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, 2013.
- [6] S. Aib, « Modélisation d'un photodetecteur dans une chaine de transmission par fibre optique, Application Aux Composants Optohyperfréquences , Université de Mentouri Constantine, 2017.
- [7] M.K. Arbind, «Photodiode», Tribhuwan Multiple Campus, Palpa, Nepal, July 2013.
- [8] Jacques Spicher, « Photorécepteurs 1.3-1.55 $\mu$ m obtenus par integration monolitique de photodiodes p-i-n et de transistors hemt », Ecole polytechnique fédérale de Lauanne, N°1551(1996).
- [9] R. Elotreuch, S. Boughar, «Etude et Optimisation d'une Photodiode dans une Chaîne de Transmission par Fibre Optique» , Mémoire Master, Université de khemis miliana, 2017.
- [10] L. Virot , « Développement de photodiodes à avalanche en Ge sur Si pour la détection faible signal et grande vitesse », Université Paris-Sud, Décembre 2014.
- [11] ATLAS User's Manual, 1998.
- [12] H. Ben allia, O. Bennacer, « Modélisation numérique des paramètres électriques des photodiodes à avalanche», Mémoire Master, Université de M'sila , 2017.
- [13] [http://www.physics-and-radio-electronics.com/electronic\\_devices\\_and\\_circuits/semiconductor\\_diodes/photodiodesymboltypes.html](http://www.physics-and-radio-electronics.com/electronic_devices_and_circuits/semiconductor_diodes/photodiodesymboltypes.html).
- [14] <http://www.abcelectronique.com/divers/dossiers/photodetecteurs>.
- [15] L.Virot, « Développement de photodiodes à avalanche en Ge sur Si pour la détection faible signal et grande vitesse », Thèse de Doctorat, Université de Paris-SUD, 2014.

- [16] R. McIntyre, « Multiplication noise in uniform avalanche diodes », IEEE Trans. Electron Devices, vol. 13, no. 1, p. 164–168, Jan. 1966.
- [17] N. Cavassilas, F. Aniel, and G. Fishman, « Energy-Band Structure of Strained Indirect Gap Semiconductor: A k·p Method », ICCN 2002 San Juan April 21- p. 3–6, 2002.
- [18] D. Decoster, « détecteurs optoélectronique », hermès science , Lavoisier , 2002.
- [19] F. Moutier, « Modélisation et évaluation des Performances des Phototransistors Bipolaires à Hétérojonction SiGe/Si pour les Applications Optique-microondes Courtes Distances », Université de Marne-La-Vallée, Décembre, 2006.
- [20] D. Decoster, J.P. Vilcot, J. Harari, V. Magnin, « Photodetectors for microwave applications : a review and trends », in SPIE Proceedings Photonics West, Photodetector Material and Devices V, Vol.3948, p. 22-28 Jan. 2003.
- [21] « PIN photodiode tunes across the C-band », in Fiber Systems Europe, pp. 7, May 2004.
- [22] G. Lucovsky, M.E. Lasser, R.B. Emmons, « Coherent Light Detection Utilizing Solid State Photodiodes » , in Electro-chemical Society Spring Meeting, Electronics Div Abstract, p. 284-285, May 1962.
- [23] L.K. Anderson, « The PIN junction photodiode as a detector of light modulated at microwave frequencies », in 1963 International Solid-State Circuits Conf. Digest Technical Paper, Philadelphia, USA, p. 114-115, Feb. 1963.
- [24] W. Gartner, « Depletion Layer Photoeffects In Semiconductors », in Physical Review, Vol.116, p. 84-87, 1959.
- [25] T.P. Pearsall, « Ga<sub>0.47</sub>In<sub>0.53</sub>As : A Ternary Semiconductor For Photodetector Applications », in IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol.16, No.7, p. 709-720, July. 1980.
- [26] Y. Ollivier, « Introduction aux algorithmes génétique », Montpellier, Octobre, 2000
- [27] C. Bontemps, « Principes Mathématiques et Utilisations des Algorithmes Génétiques », Novembre, 1995.
- [28] R. Djaidja, « les algorithmes génétique », Université de M'sila, 2016.
- [29] P. Jauffret, « Une introduction aux algorithmes génétiques », Laboratoire des Systèmes d'Information Chimique, UMR 5076 du CNRS – Montpellier, 2002.
- [30] T. Bendib, « Modélisation et simulation du transistor DG MOSFET en utilisant les Algorithmes Génétiques », Université de Batna , 2008.
- [31] K. Deb, « Multi-Objective Optimisation using Evolutionary Algorithms », Edited by John Wiley & Sons, Chichester, 2001.

- [32] S. Amédée Radet François-Gérard, « Algorithmes Génétiques », Thèse de Doctorat, 2004
- [33] N. Benahmed, « Optimisation de réseaux de neurones pour la reconnaissance de chiffres manuscrits isolés: sélection et pondération des primitives par algorithme génétique », Université du Québec, 2002.
- [34] I. Kharkach, « Segmentation floue des images par les algorithmes génétique », Mémoire de Master, Université de M'sila, 2014.
- [35] R. Dupas, « Amélioration de performance des systèmes de production: apport des algorithmes évolutionnistes aux problèmes d'ordonnancement cycliques et flexibles », Mémoire de Master, Université d'Artois, 2004.
- [36] B. Boittiaux, « Les composants semiconducteurs », ISBN: 978-2-85206-782-0; Éditeur: *Lavoisier / Tec & Doc*, 1991.
- [37] S. Kasap, « Optoelectronics and Photonics », Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J, 2001.