

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Projet de Fin d'Études

présenté par

Benbouta Abdelkader Habib Mahfoud

et

M'silti Taher

Pour l'obtention du diplôme de Master en Électronique

Option : Micro-Optoélectronique

Thème.

Etude par TCAD-Silvaco d'une structure n-on-p dans le cadre du projet ATLAS du CERN.

Proposé par

M. Slimane OUSSALAH et M. Said NACER

Année Universitaire 2015-2016

Remerciements

Le travail présenté dans ce mémoire, a été effectué au Département, d'Électronique Faculté de Technologie, de l'Université SAAD DAHLAB de BLIDA.

Je remercie ALLAH le Tout-Puissant de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme de présent travail.

Nous tenons à remercier :

- *Monsieur Slımane OUSSALAH, chercheur au sein de la Division Microélectronique et Nanotechnologie du Centre de Développement des Technologies Avancées de nous avoir proposé ce sujet, encadré, aidé et orienté.*
- *Monsieur Saïd NACER enseignant chercheur à l'Université de Blıda, d'avoir accepté de nous Co-encadrer. Ses remarques et ses conseils nous ont été d'une grande utilité pour mener à terme ce travail.*
- *Les membres du jury d'avoir accepté d'examiner et d'apprécier notre travail.*
- *Que ma mère et mon père, mes sœurs et mon frère trouvent ici mes chaleureux remerciements pour leurs diverses aides.*
- *Mes remerciement vont à mes amis et collègues pour leur soutien à mon travail et leurs encouragements.*
- *Enfin, le remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin au bon déroulement de ce travail.*

ملخص

قمنا بمحاكات للمقارنة بين اثنتين من أجهزة الكشف من السليسيوم من نوع (التقليدية و P-layer) المصممة للتطبيقات ذات السطوع العالية. و تم تقييم الأداء الكهربائي لهذه الكاشفات باستخدام أداة البرمجة TCAD SILVACO و ذلك من خلال تسليط إشعاع و التغيير من استطاعته و من زاوية اسقاطه.

لحظنا أن التيار يزداد مع ازدياد استطاعة الإشعاع ، أما بما يتعلق بزاوية الإسقاط فإنها عندما تكون أصغر من 90° فإن الأداء الكهربائي للكاشفات يزداد , لحظنا من المقارنة أن الكاشف P-layer هو الأكثر كفاءة من الكاشف التقليدي .

كلمات الرئيسية: كاشف السليكون- إشعاع- P-layer - TCAD

Résumé :

Nous avons fait une simulation comparative entre deux détecteurs au silicium de type n-in-p (conventionnel et P-layer) destiné aux applications à haute luminosité. Les performances électriques de ces détecteurs ont été évaluées à l'aide des outils TCAD du logiciel Silvaco en appliquant des radiations sur les détecteurs et changer leurs puissances et angles d'incidences. La remarque que nous avons constater est que le courant de fuite se développe lorsque la puissance d'irradiation augmente. En ce qui concerne l'angle d'incidence, lorsqu'elle est inférieure à 90° , les caractéristiques électriques des détecteurs augmentent. Pour la comparaison, la structure P-layer est plus performante que la structure conventionnelle.

Mots clés : Détecteur au silicium, irradiation, p-layer , TCAD

Abstract :

We made a comparative simulation between two detectors type silicon n-in-p (conventional and P-layer) designed for high brightness applications. The electrical performance of these detectors were evaluated using Silvaco TCAD software tools by applying radiation to the detectors and change their powers and angles of incidence. The point we see is that the leakage current expends when the irradiation power increases. As regards the angle of incidence, when it is lower than 90° , the electrical characteristics of detectors increases. For comparison, the P-layer structure is more efficient than the conventional structure.

Keywords: silicon detector, radiation, p-layer, TCAD

Listes des acronymes et abréviations

- p : Dopage de type accepteur (densité des trous).
- n : Dopage de type donneur (densité des électrons).
- n_i : Densité de porteurs libres intrinsèques (cm^{-3}).
- q : Charge électrique élémentaire (-1.6×10^{-19}).
- ϵ_0 : Permittivité absolue du vide ($8.85 \times 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$).
- ϵ_{Si} : Permittivité du silicium ($\epsilon_{\text{Si}} = 11.8 \times \epsilon_0 \text{ F.m}^{-1}$)
- μ_n : Mobilité des électrons ($\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{S}^{-1}$).
- μ_p : Mobilité des trous ($\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{S}^{-1}$).
- T : Température (k).
- DC : « direct current ».
- AC : « alternating current ».
- BC : bande de conduction.
- BV : bande de valence.
- V : La tension (V).
- $v_{n,p}$: La vitesse moyenne de déplacement pour les électrons et les trous.
- V_{bi} : La tension « building » (V).
- V_{dep} : La valeur limite de déplétion totale.
- V_{di} : Tension interne de déplétion.
- W_d : Largeur de la zone de déplétion (cm).
- ∇ : Gradient.
- N_a : Densité de dopants accepteurs ionisés dans un matériau P (cm^{-3}).
- N_d : Densité de dopants donneurs ionisés dans un matériau N (cm^{-3}).
- J_n : Densité du courant des électrons.
- J_p : Densité du courant des trous.
- J_d : Densité du courant de diffusion.
- e : Charge électrique élémentaire ($1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$).
- D_n : Coefficient de diffusion des électrons.
- D_p : Coefficient de diffusion des trous.
- k_B : Constante de Boltzman ($1.38 \times 10^{-23} \text{ J.k}^{-1}$).
- i : Courant électrique (A).
- ϕ_0 : Potentiel interne.

Tev: Tetra electron volt (10^{12} ev).

LHC: Large Hadron Collider .

LHCb: Large Hadron Collider beauty experiment.

CMS : Compact Muon Solenoid.

TCAD: Technology Computer Aided Design.

PECVD : Pressure Chemical vapor Déposition.

E_F : Energie de niveau de Fermi.

E_C : Energie de la bande de conduction.

E_V : Energie de la bande de valence.

E_G : Energie de gap.

E_i : Energie intrinsèque.

E_T : Energie cinétique induite par l'agitation thermique.

δE : Variation d'énergie.

E_{ovd} : La composante uniforme du champ électrique ajoutée par la sur-déplétion.

U_T : Tension thermodynamique.

m^*_c : masses effectives des électrons dans la bande de conduction.

m^*_{hh} : masses effectives des lourds.

m^*_{lh} : masses effectives des légers.

ρ :La résistivité.

$\sigma_{n,p}$: La conductivité du matériau pour les électrons et les trous.

t_c : Temps de collections.

τ :Durée de vie des porteurs.

x_n : la largeur de la zone de déplétion du côté N.

x_p : la largeur de la zone de déplétion du côté P.

Table des matières

ملخص

Résumé

Abstract

Remerciements

Listes des acronymes et abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale 1

Chapitre 1 Introduction sur les détecteurs à semi-conducteurs3

1.1 Introduction 3

1.2 CERN :..... 4

1.2.1 Grand collisionneur d'hadrons (LHC) 4

1.2.2 Expérience ATLAS 5

1.3 Détecteurs pixels dans la physique des particules 6

1.4 Rappel sur la physique des semi-conducteurs 7

1.4.1 Structure de bande des solides cristallins 7

1.4.2 Semi-conducteur intrinsèque 8

1.4.3 Semi-conducteur extrinsèque 9

1.5 Transport des charges 10

1.5.1 Méthode de calcul du courant 10

a Courant de conduction 11

b Piégeage et recombinaison des charges..... 12

1.6 Principe de détection..... 13

1.6.1 Calcul des caractéristiques de la zone de déplétion 14

1.6.2 Collection des charges..... 15

1.6.3 Formation du signal..... 16

1.7 Présentation de la structure 17

1.8 Conclusion..... 19

Chapitre 2 Le simulateur Atlas TCAD SILVACO20

2.1 Introduction 20

2.2 Présentation d'ATLAS 20

2.3 Ordre des commandes 23

2.3.1	BEAM	25
2.4	Différentes étapes de simulation	27
2.4.1	Spécification de la structure	27
a	Spécification du maillage	27
b	Spécification des régions	29
c	Spécification des électrodes	29
d	Spécification du dopage	30
2.4.2	Spécification du modèle et des contacts	31
a	Spécification du modèle	31
b	Spécification du contact	32
c	Spécification de l'interface	32
2.5	Définition de la source de radiation	32
2.5.1	Identification d'une radiation :	32
2.5.2	Méthodes numériques	33
a	Gummel	33
b	Newton	34
c	Bloc	34
2.5.3	Déclaration output	34
2.5.4	Spécification des solutions	34
a	Log	34
b	Solve	35
c	Load et save	35
2.5.5	Analyse des résultats	35
a	Extract	35
b	Tonyplot	36
2.6	Conclusion	36
Chapitre 3	Simulation des structures n-in-p	37
3.1	Introduction	37
3.2	Simulation des structures n-in-p sans irradiation	38
3.2.1	profil de dopage pour les deux structures	38
3.3	Caractéristiques électriques sans radiation	39
3.3.1	Les caractéristiques courant-tension	39

3.3.2	Etude de l'évolution de la zone de charge d'espace.....	40
3.3.3	Potentiel électrique.....	42
3.3.4	Champ électrique.....	43
3.3.5	Concentration des trous.....	45
3.4	Caractéristiques électrique des structures irradiées (angle d'incidence = 90°).....	47
3.4.1	Puissance de radiation = 3 W/cm ²	47
a	Concentration des trous.....	47
b	Champ électrique.....	48
3.5	Etude de l'influence de l'angle d'incidence sur les caractéristiques électriques.....	49
3.6	Etudes des caractéristiques électriques des deux structures irradiées.....	51
3.6.1	Puissance de 0.5W/cm ²	51
a	Champ électrique.....	51
b	Concentration des trous.....	52
3.6.2	Puissance de 1,5W/cm ²	53
a	Champ électrique.....	53
b	Concentration des trous.....	54
3.6.3	Puissance de 3W/cm ²	55
a	Champ électrique.....	55
b	Concentration des trous.....	56
3.7	Influence de la puissance de la radiation sur la caractéristique courant – tension.....	58
3.8	Conclusion.....	59
	Conclusion générale.....	60
	Références bibliographiques	

Liste des figures :

Figure 1.1. Grand collisionneur d'hadrons (LHC) est le plus grand et le plus puissant accélérateur de particules du monde. (Image: CERN).....	5
Figure 1.2. Détecteur ATLAS de LHC (image : www.universe-review.ca).....	6
Figure 1.3. Simplification de la représentation de la structure de bande d'un semi-conducteur intrinsèque à l'équilibre.....	7
Figure 1.4. Représentation schématique de la structure de bandes d'un isolant, d'un semi-conducteur et d'un métal.....	8
Figure 1.5. Schéma de la structure de bandes simplifiée d'un semi-conducteur (a) intrinsèque, (b) de type N et (c) de type P.....	9
Figure 1.6. Schéma de principe des processus de génération et de recombinaison avec un niveau intermédiaire apporté par un piège pour un électron (1) ou un trou (2).....	12
Figure 1.7. Représentation d'une jonction PN abrupte avec ses caractéristiques électriques. (a) Schéma de la jonction en 2D. (b) Distribution des charges. (c) Distribution du champ électrique. (d) Distribution du potentiel.....	14
Figure 1.8. Collection de charges dans une diode PN en régime de sous-déplétion et de sur-déplétion. (a) Schéma de principe de la diode en régime de sous-déplétion. Évolution du champ électrique en fonction de la profondeur x dans la diode en régime de sous-déplétion (b) et en régime de sur-déplétion (c).....	15
Figure 1.9. Principe de formation d'un signal dans une capacité. (a) Modélisation simplifiée d'un détecteur infini. (b) Profil du courant et de la charge induit sur l'électrode de collection considérons comme seule force appliquée.....	17
Figure 1.10. Structure conventionnel n in p.....	18
Figure 1.11. Structure p-layer n in p.....	18
Figure 2.1. Entrées et sorties d'Atlas.....	21

Figure 2.2. Ordre des groupes des commandes dans un programme Atlas (les commandes fondamentales afférentes.....	23
Figure 2.3. Géométrie d'une irradiation.....	26
Figure 2.4. Définition de maillage pour les deux structure : (a) conventionnel n in p, (b) p-layer n in p.....	28
Figure 2.5. Définition des régions pour les deux structure : (a) conventionnel n in p , (b) p-layer n in p.....	29
Figure 2.6. Définition des électrodes pour les deux structures avec ATLAS : (a) conventionnel n in p, (b) p-layer n in p.....	30
Figure 2.7. Définition de dopage pour les deux structures avec ATLAS : (a) conventionnel n in p, (b) p-layer n in p.....	30
Figure 2.8. Caractéristique courant-tension sous Tonyplot.....	36
Figure 3.1. Variation de la concentration des donneurs et des accepteurs dans la structure n-in-p conventionnelle.....	38
Figure 3.2. Variation de la concentration des donneurs et des accepteurs dans la structure n-in-p p-layer.....	38
Figure 3.3. Représentation de courant électrique en fonctions de la tension électrique pour une polarisation inverse.....	39
Figure 3.4. Zoom de la représentation de courant électrique en fonctions de la tension électrique pour une polarisation inverse.....	40
Figure 3.5. Evolution de la concentration des trous.....	41
Figure 3.6. Evolution de zone de charge d'espace.....	41
Figure 3.7. Variation du potentiel électrique dans la structure conventionnelle n-in-p.....	42
Figure 3.8. Variation du potentiel électrique dans la structure n-in-p p-layer.....	42

Figure 3.9. Variation de champ électrique dans la structure n-in-p conventionnel.....	43
Figure 3.10. Cutline à $x= 80 \mu\text{m}$ montre variation de champ électrique dans la structure conventionnel.....	43
Figure 3.11. Zoom d'un cutline pour les deux structures à une tension de polarisation de 600V montre la variation de champ électrique.....	44
Figure 3.12. Zoom d'un cutline a $x=80 \mu\text{m}$ pour les deux structures à une tension de polarisation inverse de 600V montre la variation de champ électrique.....	44
Figure 3.13. Variation de la concentration des trous dans la n-in-p.....	45
Figure 3.14. Variation de la concentration des trous dans la n-in-p p-layer.....	45
Figure 3.15. Zoom pour les deux structures à une tension de polarisation de 600V montre la variation de la concentration des trous.....	46
Figure 3.16. Zoom d'un cutline a $x=80 \mu\text{m}$ pour les deux structures à une tension de polarisation inverse de 600V montre la variation de la concentration des trous.....	46
Figure 3.17. Variation de la concentration des trous dans les deux structures polarisées en inverse sous une radiation.....	47
Figure 3.18. Zoom pour un Cutline à $x=80 \mu\text{m}$ montre la variation de la concentration des trous dans les deux structures polarisées en inverse sous une radiation.....	48
Figure 3.19. Variation de champ électrique dans les deux structures polariser en inverse sous une radiation de 3 W.....	48
Figure 3.20. Zoom d'un cutline a $x=80$ pour les deux structures à une tension de polarisation inverse sous une radiation de 3 W montres la variation de champ électrique.....	49
Figure 3.21. Variation de champ électrique dans la structure p-layer pour différentes angles d'incidences à gauche 90° , au milieu 75° et à droite 45°	50
Figure 3.22. Variation de la concentration des trous dans structure n-in-p p-layer pour différentes angles d'incidences à gauche 90° , au milieu 75° et à droite 45°	50

Figure 3.23. Zoom d'un cutline montre la variation de concentration des trous dans la n-in-p p-layer avec différentes angles d'incidences 90°, 75° et 45°	51
Figure 3.24. Zoom des structures n-in-p polarisées en inverse à 600 V sous une radiation de 0,5 W/cm ² montre la variation du champ électrique.....	52
Figure 3.25. Zoom d'un cutline a x=80 μm pour les deux structures polarisées en inverse et sous une radiation d'une puissance 0,5 W/cm ² montre la variation de champ électrique.....	52
Figure 3.26. Zoom des structures n-in-p polarisées en inverse à 600 V sous une radiation de 0,5 W/cm ² montre la variation de la concentration des trous.....	53
Figure 3.27. Zoom d'un cutline à x=80 μm pour les deux structures polarisées en inverse, sous une radiation d'une puissance 0,5 W/cm ² montre la variation de la concentration des trous...53	53
Figure 3.28 Zoom des structures n-in-p polarisées en inverse à 600 V sous une radiation 1,5 W/cm ² montre la variation du champ électrique.....	54
Figure 3.29. Zoom d'un cutline a x=80 μm pour les deux structures polarisées en inverse et sous une radiation d'une puissance 1,5 W/cm ² montre la variation de champ électrique.....	54
Figure 3.30. Zoom des structures n-in-p polarisées en inverse à 600 V sous une radiation de 1,5 W/cm ² montre la variation du champ électrique.....	55
Figure3.31. Zoom d'un cutline à x=80 μm pour les deux structures polarisées en inverse, sous une radiation d'une puissance 1,5 W/cm ² montre la variation de la concentration des trous...55	55
Figure3.32. Zoom des structures n-in-p polarisées en inverse à 600 V sous une radiation de 3 W/cm ² montre la variation du champ électrique.....	56
Figure 3.33. Zoom d'un cutline à x=80 μm pour les deux structures polarisées en inverse et sous une radiation d'une puissance 3 W/cm ² montre la variation de champ électrique	56
Figure3.34. Zoom des structures n-in-p polarisées en inverse à 600 V sous une radiation de 3 W/cm ² montre la variation de la concentration des trous.....	57
Figure3.35. Zoom d'un cutline à x=80 μm pour les deux structures polarisées en inverse, sous une radiation d'une puissance 3 W/cm ² montrent la variation de la concentration des trous..57	57
Figure 3.36. Caractéristiques courant-tension pour différentes valeurs de la radiation.....	5

Introduction générale

Dans les années 1950, la maîtrise des procédés de fabrication du silicium monocristallin a rendu possible le développement de détecteurs des particules à base de semi-conducteurs. En effet, ces derniers étant solides ils sont à géométrie plus égale que ceux au gaz, de plus 3.6 eV suffisent à créer une paire électron-trou dans le silicium contre 30 eV dans les détecteurs aux gaz. Le silicium est le matériau de prédilection pour la fabrication de détecteurs car ses caractéristiques ainsi que son mode d'usinage sont très largement maîtrisés en microélectronique moderne [4].

Les détecteurs au silicium sont utilisés dans les différents domaines où l'on a affaire à des rayonnements ionisants. Lorsqu'une particule possède une énergie suffisante, au contact d'un semi-conducteur, elle va arracher un électron à un atome du cristal et ainsi créer un courant électrique. L'énergie minimale pour qu'un tel phénomène se produise s'appelle l'énergie de gap, autrement dit, il s'agit de l'énergie minimale à apporter au cristal pour qu'un électron passe de la bande de valence à la bande de conduction [4].

Les détecteurs au silicium sont particulièrement importants en physique des hautes énergies comme en témoigne les milliers présents au CERN. Le gigantesque détecteur ATLAS (destiné à détecter le boson de Higgs) présent au CERN contient en son centre un détecteur interne en silicium qui a pour but de suivre le passage des particules dès leur création. Le collisionneur de particules du CERN mettant en jeu des énergies pouvant atteindre 14 TeV, on comprend bien que les détecteurs utilisés devront affronter un environnement particulièrement hostile et la tenue aux radiations devient un enjeu majeur pour les scientifiques [3].

Plusieurs types de détecteurs à semi-conducteurs sont à l'étude, certains sont de type n-in-n ou p-in-n c'est à dire à substrat de type n, d'autres sont de type p-in-p ou n-in-p c'est-à-dire à substrat de type p. Le détecteur de type n-on-p sera l'objet de notre étude [3].

Une des premières étapes pour la conception du détecteur est l'utilisation des techniques de simulation numérique pour optimiser la structure du détecteur. Ceci est d'une importance capitale pour limiter le temps de développement et réduire le nombre de prototypes nécessaires à l'évaluation des propriétés du senseur.

En utilisant le logiciel SILVACO-TCAD, il est possible d'extraire la distribution du champ électrique dans le silicium et de prévoir les propriétés électriques, comme le courant de fuite, en fonction des paramètres géométriques et du dopage des implants. Par exemple, l'application d'une radiation sur la structure

Notre mémoire se présente en trois chapitres.

Le premier chapitre aborde un rappel théorique sur les équations fondamentales des semi-conducteurs et le principe de détection dans les détecteurs à semi-conducteurs.

Le second chapitre traite le simulateur technologique SILVACO-TCAD, où nous présentons son principe, son mode de fonctionnement et ses commandes.

Le troisième chapitre est consacré à une étude comparative entre deux types de détecteurs de particules (n-in-p conventionnelle et n-in-p p-layer) à l'aide des outils TCAD du logiciel SILVACO. En particulier, les caractéristiques d'irradiation à différentes puissances et angles d'incidence sont été simulés afin d'étudier leurs influences sur les performances électriques des détecteurs telles que le champ électrique, la concentration des porteurs de charges (trous) ainsi que le courant de fuite.

Enfin, nous terminons par une conclusion.

Chapitre 1 Introduction sur les détecteurs à semi-conducteurs

1.1 Introduction

Nous commencerons, dans ce chapitre par présenter le CERN et ses fonctions ainsi que ses instruments. Nous présenterons ensuite le LHC et ses faisceaux de particules avec leurs modes d'emplois, par la suite nous présentons l'expérience ATLAS.

Dans un second temps, après un bref rappel sur la physique des semi-conducteurs, là où nous nous attacherons à décrire le système de transport des charges en passant par la méthode de calcul de courant.

A la fin nous présentons nos deux structures au quelles nous faisons notre étude comparative.

Les détecteurs pixels intégrés, utilisés dans la physique des particules sont aujourd'hui en plein développement et en pleine révolution. La recherche des nouveaux matériaux détecteurs ainsi que le développement de nouveaux systèmes de lecture du signal ont permis le développement de nouvelles générations de détecteurs plus performants et surtout à plus faible coût.

1.2 CERN :

Le CERN, l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire, est l'un des plus grands et des plus prestigieux laboratoires scientifiques du monde. Il a pour vocation la physique fondamentale, la découverte des constituants et des lois de l'Univers. Il utilise des instruments scientifiques très complexes pour sonder les constituants ultimes de la matière : les particules fondamentales. En étudiant ce qui se passe lorsque ces particules entrent en collision, les physiciens appréhendent les lois de la nature [2].

Les instruments qu'utilise le CERN sont des accélérateurs et des détecteurs de particules. Les accélérateurs portent des faisceaux de particules à des énergies élevées pour les faire entrer en collision avec d'autres faisceaux ou avec des cibles fixes. Les détecteurs, eux, observent et enregistrent les résultats de ces collisions [2].

Fondé en 1954, le CERN est situé de part et d'autre de la frontière franco-suisse, près de Genève. Il a été l'une des premières organisations à l'échelle européenne et compte aujourd'hui 21 États membres [2].

1.2.1 Grand collisionneur d'hadrons (LHC)

Le Grand collisionneur d'hadrons (LHC) est le plus grand et le plus puissant accélérateur des particules du monde. Il est aussi la dernière machine à être venue enrichir le complexe d'accélérateurs du CERN : son démarrage a eu lieu le 10 septembre 2008. Cet anneau de 27 kilomètres est jalonné d'aimants supraconducteurs, associés à des structures accélératrices qui augmentent l'énergie des particules qui y sont propulsées [6].

Dans l'accélérateur, deux faisceaux de particules de haute énergie circulent à une vitesse proche de celle de la lumière avant d'entrer en collision. Les faisceaux se déplacent dans des directions opposées, dans des tubes distincts placés sous ultravide. Un puissant champ magnétique généré par des électroaimants supraconducteurs les guide tout au long de leur parcours dans l'accélérateur. Ces aimants sont composés de

bobines d'un câble électrique spécial qu'il est à l'état supraconducteur, conduit l'électricité sans la moindre résistance ni perte d'énergie [6].

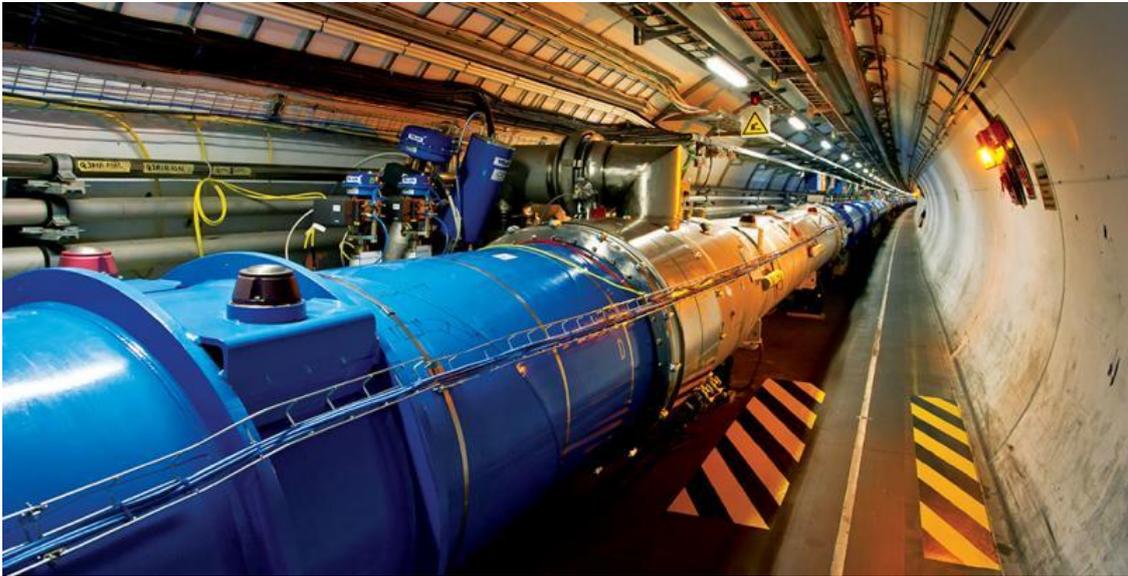


Figure 1.1. Grand collisionneur d'hadrons (LHC) est le plus grand et le plus puissant accélérateur de particules du monde. [Image: CERN]

Des milliers d'aimants de nature et de taille différente guident les faisceaux le long de l'accélérateur. On utilise notamment 1232 aimants dipolaires (de 15 mètres de long) pour courber les faisceaux et 392 aimants quadripolaires (de 5 à 7 mètres de long) pour concentrer les faisceaux. Juste avant la collision, un autre type d'aimant vient resserrer les particules et augmenter la probabilité des collisions. Réaliser une collision entre des particules aussi minuscules exige une précision comparable à celle qu'il faudrait pour faire se percuter deux aiguilles lancées à 10 km de distance [6].

Toutes les commandes de l'accélérateur, ses services et son infrastructure technique sont regroupés au Centre de contrôle du CERN. C'est à partir de là que les faisceaux du LHC sont guidés pour entrer en collision en quatre points de l'anneau où se situent quatre détecteurs de particules : ATLAS, CMS, ALICE et LHCb [6].

1.2.2 Expérience ATLAS

ATLAS est l'un des deux détecteurs polyvalents du grand collisionneur d'hadrons (LHC). Il étudie des domaines de physique très variés, de la recherche du

boson de Higgs aux dimensions supplémentaires de l'espace-temps, en passant par les particules qui pourraient former la matière noire [7].

Les faisceaux de particules du LHC entrent en collision au centre du détecteur ATLAS. Les débris de collision ainsi produits forment de nouvelles particules, qui émergent du point de collision dans toutes les directions. Six sous-systèmes de détection différents disposés en couches autour du point de collision enregistrent la trajectoire, l'impulsion et l'énergie des particules, ce qui permet d'identifier chacune d'elles. Un énorme système d'aimants permet d'incurver la trajectoire des particules et ainsi de mesurer leur impulsion [7].

Mesurant 46 m de long, 25 m de haut et 25 m de large et pesant 7000 tonnes, le détecteur ATLAS est le détecteur de particules le plus volumineux jamais construit. Il se situe dans une caverne à 100 m sous terre à proximité du site principal du CERN et de la commune de Meyrin en Suisse [7].

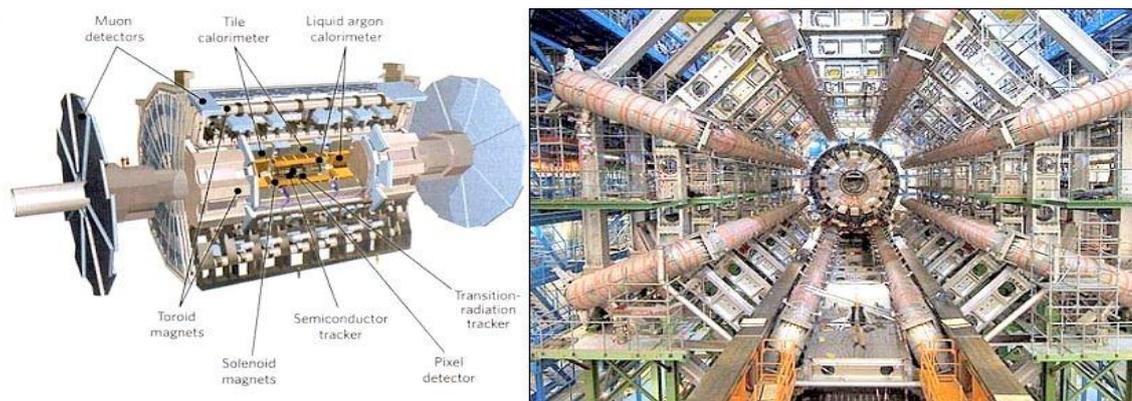


Figure 1.2. Détecteur ATLAS [www.universe-review.ca]

1.3 Détecteurs pixels dans la physique des particules

Ce n'est qu'à la fin des années 70 que la technologie de circuits intégrés a pu être utilisée dans les nouveaux accélérateurs via des matrices détectrices en silicium cristallin. Au début le nombre des particules était apprécié avec une bonne approximation à partir de la charge totale mesurée. Avec l'apparition du détecteur microstrip les trajectoires des particules ont pu être mesurées avec précision. De nouvelles particules avec des durées de vie plus courtes ont ainsi été découvertes.

Ainsi les détecteurs microstrip ont connus un développement rapide mais limité à cause de l'électronique de lecture qui était même miniaturisée toujours discrète. L'électronique intégrée est devenue possible durant les années 80 et elle a conduit à un autre degré de miniaturisation pourtant les détecteurs pixels ont eux besoin d'une technologie plus sophistiquée pour démarrer [2].

1.4 Rappel sur la physique des semi-conducteurs

1.4.1 Structure de bande des solides cristallins

L'étude des propriétés électriques d'un solide cristallin passe par la compréhension de sa structure de bandes d'énergie. Les niveaux d'énergie permis sont alors modifiés, ils se scindent en N niveaux discrets avec N , le nombre d'atomes dans le réseau. Lorsque N devient très grand on considère que le spectre des niveaux d'énergie permis devient continu. On parle alors de bandes d'énergie permises. Ces bandes d'énergie sont séparées par une bande d'énergie interdite [3].

La bande d'énergie permise située au-dessus de cette bande interdite est appelée bande de conduction E_C . Celle située en-dessous est la bande de valence E_V . L'énergie E_g séparant les extrema des bandes de conduction et de valence est appelée band gap, un des paramètres importants pour caractériser un cristal [3].

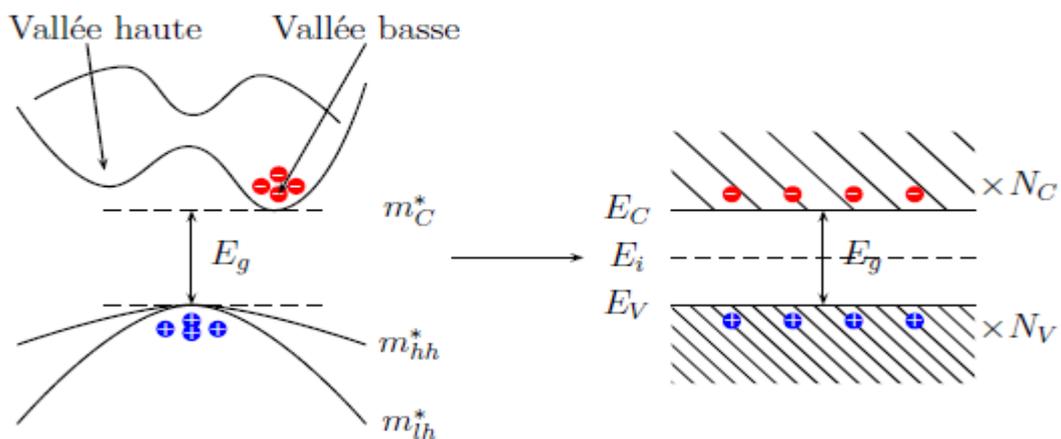


Figure 1.3. Simplification de la représentation de la structure de bande d'un semi-conducteur intrinsèque à l'équilibre[3]

À partir de cette structure de bandes d'énergie simplifiée, on peut classer les solides en trois catégories. La **figure 1.4** représente un modèle pour chacune de ces catégories. Dans les isolants, la bande de valence est entièrement remplie d'électrons et la bande de conduction est vide. Le band gap est tel que l'agitation thermique ou l'application d'un champ électrique ne suffit pas à exciter suffisamment un électron pour qu'il passe dans la bande de conduction. C'est ce qui leur confère leur propriété d'isolant électrique. Au contraire, la bande de conduction des métaux est partiellement remplie d'électrons qui les rendent conducteurs. Dans les semi-conducteurs, le remplissage des bandes d'énergie est similaire à celui des isolants, à la différence que l'énergie de la bande interdite (band gap) est suffisamment faible pour que l'agitation thermique ($U_T = 3/2k_B T$) permette le transfert d'électrons de la bande de valence vers la bande de conduction, créant ainsi des paires électron-trou. La conduction de ces cristaux dépend de la température et des forces extérieures appliquées [3].

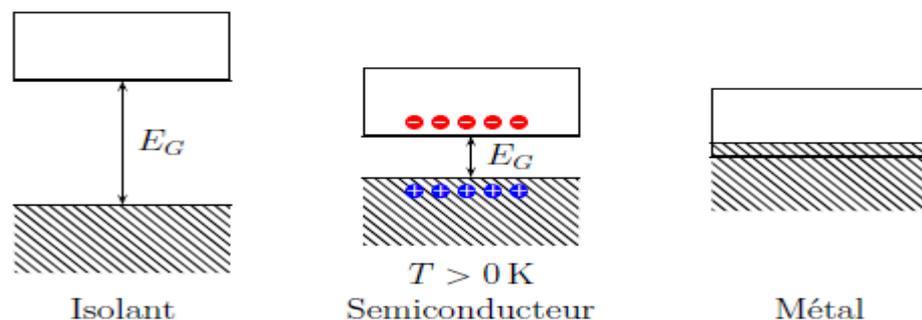


Figure 1.4. Représentation schématique de la structure de bandes d'un isolant, d'un semi-conducteur et d'un métal. [3]

1.4.2 Semi-conducteur intrinsèque

Le niveau de Fermi E_F d'un semi-conducteur est le paramètre statistique caractérisant la répartition des électrons sur les niveaux d'énergie à la température T . Il se situe statistiquement au milieu de la bande interdite de largeur E_g , à égale distance des bandes de valence et de conduction. Dans le cas d'un semi-conducteur intrinsèque, le niveau de Fermi est légèrement décalé à cause des impuretés présentes

dans le réseau et de ses défauts. Ce niveau de Fermi est appelé niveau de Fermi intrinsèque, il est noté E_i et s'exprime :

$$E_i = \frac{E_C + E_V}{2} + \frac{k_B T}{2} \ln \left(\frac{N_V}{N_C} \right) \quad (1.1)$$

Avec N_C et N_V , les densités d'états effectives dans les bandes de conduction. Dans un semi-conducteur intrinsèque, la concentration n en électrons est la même que celle en trous p . On appelle n_i la concentration intrinsèque de porteurs libres, telle que $n = p = n_i$ à l'équilibre. On obtient alors quelque soit le nombre de paires électron-trou créées la relation 1.2:

$$np = n_i^2 \quad (1.2)$$

Cette relation est appelée *loi d'action des masses*.

1.4.3 Semi-conducteur extrinsèque

Dans le cas d'un dopage avec des atomes donneurs (éléments de la colonne V, comme le phosphore, l'arsenic ou l'antimoine pour le dopage du silicium) la concentration en sites donneurs est notée N_D et le niveau intermédiaire apporté E_D . Pour celui d'un dopage avec des atomes accepteurs (éléments de la colonne III, comme le bore, l'aluminium ou le gallium pour le dopage du silicium) la concentration en sites accepteurs est notée N_A et le niveau intermédiaire E_A (voir **figure 1.5.**)[3].

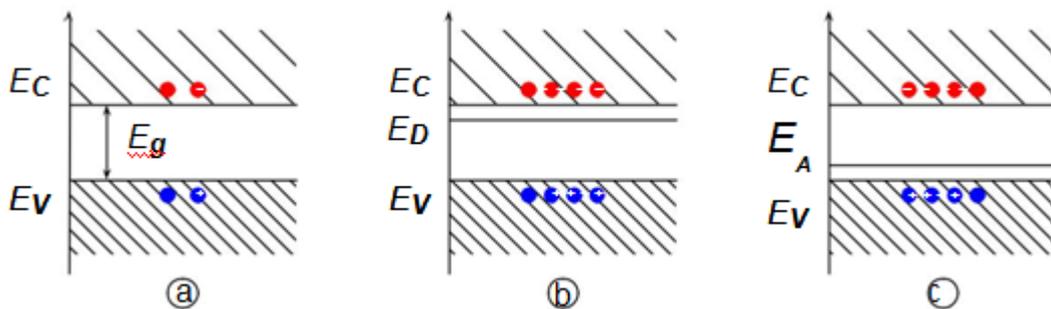


Figure 1.5. Schéma de la structure de bandes simplifiée d'un semi-conducteur (a) intrinsèque, (b) de type N et (c) de type P [3].

Les niveaux intermédiaires peuvent être calculés en posant l'hypothèse que la concentration en sites accepteurs est négligeable devant celle en sites donneurs ($N_A \ll N_D$), on obtient alors le niveau de Fermi dans un semi-conducteur extrinsèque dopé de type N :

$$E_F = E_C - k_B T \ln\left(\frac{N_C}{N_D}\right) \quad (1.3)$$

Et d'une manière analogue, pour un semi-conducteur dopé de type P :

$$E_F = E_V + k_B T \ln\left(\frac{N_V}{N_A}\right) \quad (1.4)$$

1.5 Transport des charges

En l'absence de force extérieure, les charges créées par un rayonnement X peuvent être considérées comme des particules libres avec une énergie cinétique E_T induite par l'agitation thermique ($E_T = \frac{3}{2} K_B T$).

La détection de ces rayons X repose sur la collection des porteurs de charge (paires électron-trou) créés. En appliquant un champ électrique dans le volume du semi-conducteur, les électrons et les trous se séparent. Le mouvement de ces charges induit un signal sur les électrodes de collection. C'est ce signal qui est amplifié et traité par l'électronique de lecture. [3].

1.5.1 Méthode de calcul du courant

L'équilibre thermodynamique est caractérisé par l'existence d'un seul niveau de Fermi dans tout le matériau et par la nullité du courant macroscopique $\vec{j} = \vec{0}$. Différentes forces extérieures peuvent venir perturber cet équilibre un champ électrique, un gradient de température, l'injection de porteurs en excès. Ces perturbations entraînent de façon permanente ou transitoire des mouvements collectifs de charges, c'est-à-dire un courant électrique. Ce courant est composé du mouvement général des électrons, ainsi que de celui des trous dont l'interprétation n'est pas intuitive. Le mouvement d'un trou est défini comme la trajectoire inverse

qu'effectue un électron lorsqu'il quitte un site d'une bande de valence pour remplir un trou existant. Sachant que tous les électrons ne sont pas dans la bande de valence, la mobilité des trous ainsi définie est inférieure à celle des électrons [3].

Ces mouvements peuvent être mis en équation d'une manière très précise grâce à la mécanique quantique. La perturbation provoque une redistribution hors équilibre des porteurs sur les niveaux d'énergie courant de diffusion.

La répartition des porteurs de charge dans le volume est inhomogène. Son gradient induit un déplacement collectif des porteurs connu sous le nom de courant de diffusion. Ce phénomène est décrit par les équations suivantes :

$$\begin{cases} \vec{J}_{n,diff} = +e D_n \vec{\nabla} n_0 \\ \vec{J}_{p,diff} = -e D_p \vec{\nabla} p_0 \end{cases} \quad (1.5)$$

Avec D_n et D_p les coefficients de diffusion (toujours positifs) pour les électrons et les trous exprimés en cm^2/s . Dans le cas d'un semi-conducteur non dégénéré, on peut exprimer ces coefficients en fonction de la mobilité des porteurs. Ces relations sont connues sous le nom de relations d'Einstein :

$$D_{n,p} = k_B T \frac{\mu_{n,p}}{e} \quad (1.6)$$

Le courant de diffusion total s'écrit comme la somme de ces deux composant

$$\vec{J}_d = +e D_n \vec{\nabla} n_0 - e D_p \vec{\nabla} p_0 \quad (1.7)$$

a Courant de conduction

L'application d'un champ électrique \vec{E} accélère les charges dans la direction du champ entre deux collisions ce qui induit des vitesses moyennes de déplacement v_n et v_p pour les électrons et les trous. Le vecteur d'accélération suit les lignes du champ électrique dans le sens de \vec{E} pour les trous et dans le sens opposé pour les électrons. La vitesse moyenne de déplacement des charges due au champ électrique est donnée par:

$$\vec{v}_{n,p} = \mp \mu_{n,p} \vec{E} \quad (1.8)$$

Avec $\mu_{n,p}$ la mobilité des électrons (n) ou des trous (p). La somme des déplacements élémentaires de chacune des particules donne lieu à une densité de courant macroscopique \vec{J}_d .

$$\vec{J} = (-en\vec{v}_n + ep\vec{v}_p)\vec{E} = (\sigma_n + \sigma_p)\vec{E} \quad (1.9)$$

Avec, $\sigma_{n,p}$ la conductivité du matériau pour les électrons et les trous.

b Piégeage et recombinaison des charges

La modification du niveau énergétique des porteurs de charge est provoquée par l'apport d'une énergie thermique, un champ électrique ou encore un rayonnement. Dans le cas d'un semi-conducteur à gap indirect, le processus de transition dominant provient des impuretés et des défauts du substrat. Les impuretés dans un semi-conducteur sont apportées par des atomes étrangers dits "polluants", venant d'étapes de fabrication ou par des défauts dans la structure du réseau cristallin [3].

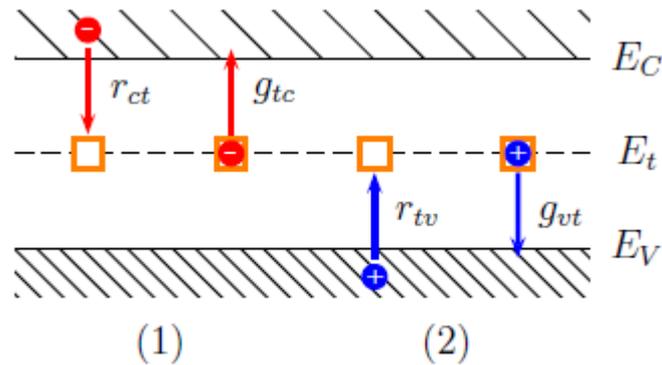


Figure 1.6. Schéma de principe des processus de génération et de recombinaison avec un niveau intermédiaire apporté par un piège pour un électron (1) ou un trou (2) [3].

1.6 Principe de détection

Le capteur à semi-conducteur permet la collection des charges et l'élimination de la principale source de bruit : le courant de fuite. Elle est composée de deux milieux juxtaposés de dopages opposés. La zone N est dopée avec des atomes donneurs en concentration N_D et la zone P avec des atomes accepteurs en concentration N_A . Une vue schématique de la jonction PN est illustrée sur la **figure 1.7**. (a). La proximité de ces deux zones induit des forts gradients de concentrations en électrons et en trous ∇n et ∇p , provoquant alors un courant de diffusion $\vec{J}_d = \vec{J}_{dn} + \vec{J}_{dp}$. Les électrons migrent vers la zone P et les trous vers la zone N. Ces porteurs migrant vers des zones où ils sont fortement minoritaires, se recombinent avec les porteurs majoritaires. Ils génèrent alors de part et d'autre de la jonction, une zone dépourvue de porteurs libres, on parle de zone de déplétion. A l'intérieur de ces zones il ne subsiste que des dopants ionisés fixes de charge positive du côté N en concentration N_D , et négative du côté P en concentration N_A . Dans cette zone, la neutralité électrique est localement rompue. Le champ électrique (présenté sur la **figure 1.7** (c)) généré par cette répartition des charges dans l'espace, induit un courant de conduction. Ce courant s'oppose à la diffusion des porteurs libres donnant naissance à la zone de déplétion. La jonction PN se stabilise alors à un équilibre propre avec un champ \vec{E} qui compense exactement les gradients de concentration en électrons et en trous. Cet équilibre global peut être mis en équation par :

$$\vec{J}_n = 0 = \underbrace{-en\mu_n\vec{E}}_{\vec{J}_{cn}} + \underbrace{eD_n\nabla p}_{\vec{J}_{dn}} \quad (1.10)$$

$$\vec{J}_p = 0 = \underbrace{ep\mu_p\vec{E}}_{\vec{J}_{cp}} - \underbrace{eD_p\nabla n}_{\vec{J}_{dp}} \quad (1.11)$$

Cet état est appelé équilibre thermodynamique. Il correspond à une stabilité macroscopique composée d'une multitude de mouvements microscopiques qui se compensent. La résistivité ρ du substrat est un des paramètres importants. Elle est exprimée en fonction de la mobilité $\mu_{n,p}$ des porteurs majoritaires et du dopage $N_{D,A}$ du substrat[3].

1.6.1 Calcul des caractéristiques de la zone de déplétion

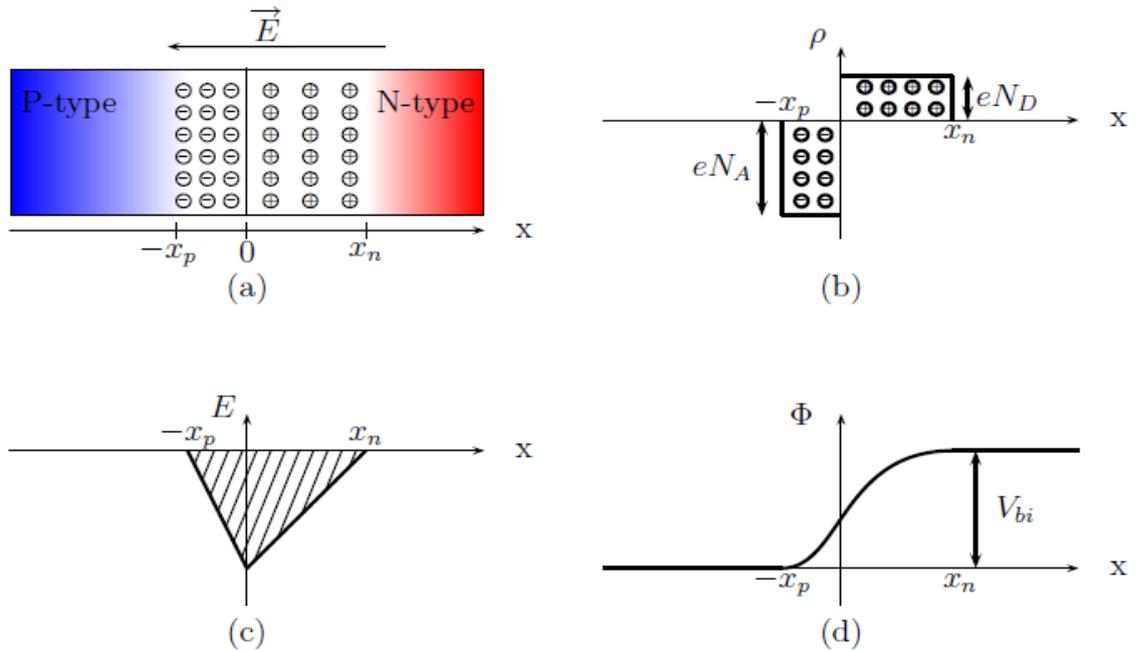


Figure 1.7. Représentation d’une jonction PN abrupte avec ses caractéristiques électriques. (a) Schéma de la jonction en 2D. (b) Distribution des charges. (c) Distribution du champ électrique. (d) Distribution du potentiel [3].

L’application d’une tension V_b dans la même direction que la barrière de potentiel V_{bi} permet l’évacuation des porteurs libres supplémentaires et l’élargissement de la zone de déplétion. La jonction est alors dite polarisée en inverse. La largeur W_d de cette zone de déplétion est déterminée par les positions $-x_p$ et x_n , comme indiqué sur la **figure 1.7**. La largeur totale est donc donnée par $W_d = x_n + x_p$ [3].

$$W_d = \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_{Si}}{e} \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} (V_b + V_{bi})} \quad (1.12)$$

Généralement, l’électrode de collection est une zone mince fortement dopée p^+ dans un substrat N faiblement dopé. Cette structure nous permet la simplification de l’équation de la largeur de la zone de déplétion en posant $N_A \gg N_D$,

$$W_d = \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_{Si}}{e} \frac{V_b + V_{bi}}{N_D}} \quad (1.13)$$

1.6.2 Collection des charges

La charge créée dans le substrat dépend de l'énergie E_p de création d'une paire électron-trou. En notant E l'énergie de la particule incidente et n_p le nombre de paires électron-trou on a :

$$n_p = \frac{E}{E_p} \quad (1.14)$$

L'épaisseur d du substrat doit être déterminée en fonction du temps de vie τ des porteurs de charge et de leur vitesse de déplacement v exprimée par l'équation 1.8. On obtient alors :

$$\frac{d}{v} = \frac{d}{\mu E} \ll \tau \quad (1.15)$$

La largeur de la bande interdite E_g est déterminante pour le courant de fuite. Le taux de génération-recombinaison dépend de cette valeur. Ainsi, pour réduire le courant de fuite, on choisit de préférence des matériaux présentant une large bande interdite.

L'énergie de création d'une paire électron-trou fixe le nombre de paires créées par une particule incidente. Pour la réalisation des détecteurs possédant une bonne résolution en énergie, en spectroscopie par exemple, des matériaux avec une faible énergie de création de paires sont préférés [3].

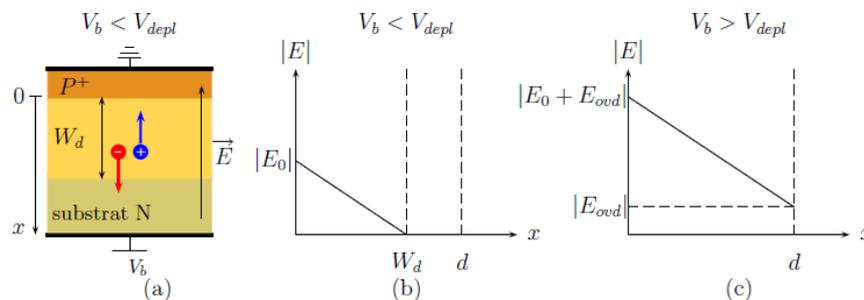


Figure 1.8. Collection de charges dans une diode PN en régime de sous-déplétion et de sur-déplétion. (a) Schéma de principe de la diode en régime de sous-déplétion. Évolution du champ électrique en fonction de la profondeur x dans la diode en régime de sous-déplétion (b) et en régime de sur-déplétion (c) [3].

Pour un porteur collecté sur une électrode on parle de temps de collection t_c . Dans le cas où il est créé initialement en $x_0 = d$ et collecté à l'opposé du volume en $x = 0$, le temps de collection t_c est :

$$t_c = \frac{d}{\mu E_0} \ln \left(1 + \frac{E_0}{E_{ovd}} \right) \quad (1.16)$$

L'expression générale de ce temps de collection peut être réécrite en termes de tension:

$$t_c = \frac{d^2}{2\mu V_{di}} \ln \left(\frac{V_b + V_{di}}{V_b - V_{di}} \right) \quad (1.17)$$

1.6.3 Formation du signal

Contrairement aux idées reçues, le signal n'est pas formé par la collection des charges mais par leur mouvement. Dès que des paires électron-trou sont créées, les charges positives et négatives sont séparées par le champ électrique régnant dans le substrat. Un signal est alors immédiatement induit dans les électrodes et ce sans qu'aucune charge n'ait été collectée. Le signal décroît au fur et à mesure que les charges sont collectées et prend fin avec la collection de la dernière charge libre dans le volume. Pour étudier la formation d'un signal, considérons un détecteur avec deux plans infinis représenté sur la **figure 1.9** (a). Cette étude peut être menée en faisant le bilan énergétique dans la capacité formée par les deux électrodes. L'énergie stockée dans une capacité est déterminée par :

$$E = \frac{1}{2} CV_b^2 \quad (1.18)$$

Supposons alors qu'une paire électron-trou est créée à une distance x de l'électrode en 0. La mise en mouvement de ces porteurs de charge par le champ électrique modifie l'énergie dans le détecteur. étant donné la loi de conservation de l'énergie, la variation d'énergie δE sur l'électrode en 0 s'exprime alors comme la somme des travaux des forces appliquées aux deux porteurs de charge considéré comme seule force appliquée.

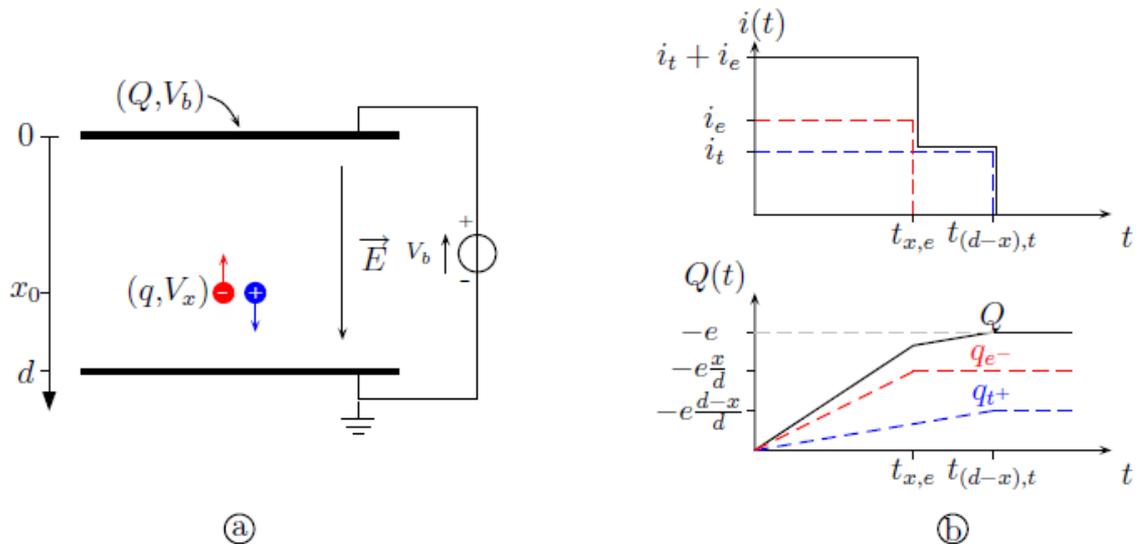


Figure 1.9. Principe de formation d'un signal dans une capacité. (a) Modélisation simplifiée d'un détecteur infini. (b) Profil du courant et de la charge induit sur l'électrode de collection[3].

La variation totale de la charge sur une électrode est donc égale au nombre de paires créées dans le détecteur. Les contributions aux variations de la charge Q induites par les deux types de porteur ainsi que sa variation totale sont tracées sur la **figure 1.9 (b)** [3].

1.7 Présentation de la structure

Les **figures (1.10)** et **(1.11)** représentent les structures n-in-p étudiée dans notre simulation.

Nous étudierons nos structures n-in-p en polarisation inverse de but de faire une comparaison sur leurs performances.

Lorsqu'une structure est irradiée, des charges positives vont être formées dans l'oxyde, ainsi des paire électrons-trous vont être créés dans la zone de charge d'espace, et comme les électrons migrent vers la région N de l'anode ces dernier vont faire un court circuit entre les deux anodes trouver dans la structure pour éviter ça nous mettons un P-stop (doper une partie de la région qui se trouve entre deux anodes avec une concentration de $1 \text{ e}+19 \text{ cm}^{-3}$).

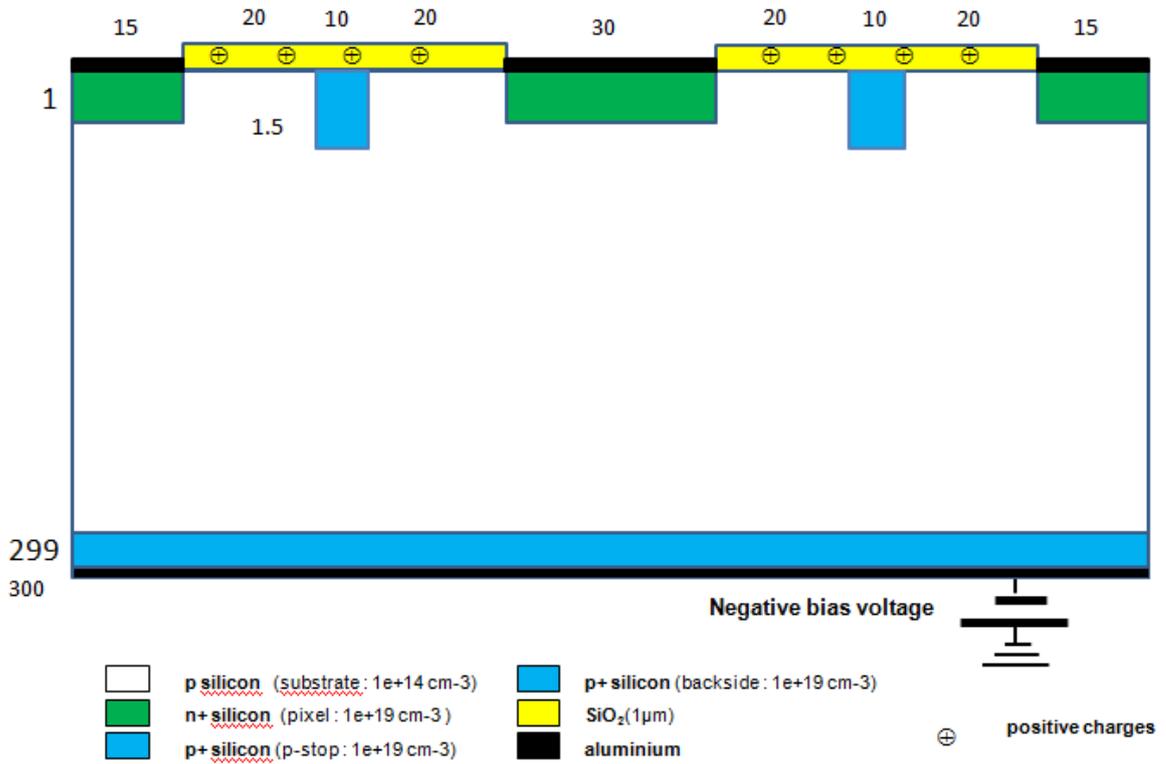


Figure 1.10. Structure n-in-p conventionnelle

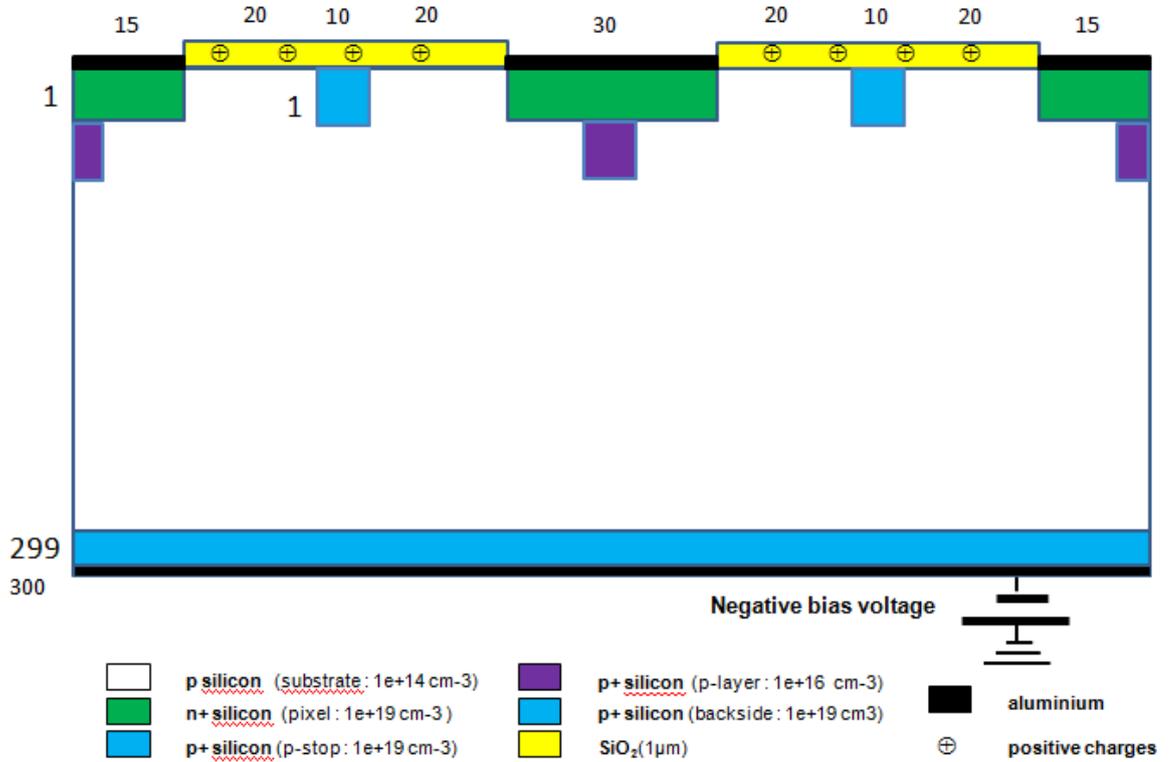


Figure 1.11. Structure n-in-p p-layer

1.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le CERN et ses fonctions ainsi que ses instruments, nous avons aussi présenté le LHC et ses faisceaux de particules par la suite nous avons donné une bref présentation sur l'expérience ATLAS.

Aussi nous avons exposé un rappel sur la physique des semi-conducteurs et expliqué le phénomène de transport de charges et la méthode de calcul de courant.

Nous avons présenté à la fin nos deux types de structures pn (structure conventionnelle et structure avec p-layer) les quelles nous faisons notre simulation comparative.

Chapitre 2 Le simulateur Atlas TCAD SILVACO

2.1 Introduction

Les simulateurs TCAD (Technology Computer-Aided Design) permettent la modélisation du comportement physique et électrique d'un composant électronique, dans le but d'économiser le temps et le coût de développement, et ainsi de pouvoir envisager et optimiser des solutions pour améliorer les performances des dispositifs. Les simulateurs existants sur le marché (ISE, SYNOPSIS, SILVACO,...) ont le même principe de fonctionnement.

Dans ce chapitre, nous présenterons le logiciel de simulation TCAD-SILVACO (ATLAS), son principe de fonctionnement et son module de simulation pour le comportement électrique des composants. Ensuite, nous présentons une description des différentes étapes de simulation.

2.2 Présentation d'ATLAS

Le logiciel de simulation ATLAS est un simulateur de modélisation bidimensionnelle de composants semi-conducteurs. Il est capable de prédire les caractéristiques électriques de la plupart des composants semi-conducteurs en régime continu, transitoire ou fréquentiel [4].

En plus du comportement électrique, exemple $I(V)$, il fournit des informations sur la distribution interne des variables électrique telles que le courant ou la tension (lignes du champ) [4].

Ceci est réalisé en résolvant numériquement les équations de Poisson et de continuité des électrons et des trous (à deux dimensions) en un nombre fini de points formant le maillage de la structure défini par l'utilisateur ou par le programme[4].

Ce simulateur est composé de deux parties :

- une partie de traitement numérique (méthode d'intégration, de discrétisation...),
- une partie formée des modèles physiques des composants semi-conducteurs les plus courants :

Modèles de recombinaison (Shockley Read Hall), d'ionisation par impact (Pearson et Monte Carlo), ainsi que les modèles de mobilité, et les statistiques de Fermi-Dirac et Boltzmann.

ATLAS permet de simuler le comportement électrique d'un composant semi-conducteur créé et modélisé comme par exemple une diode ou un transistor. Le composant étudié est représenté comme une structure maillée où chaque nœud a des propriétés qui lui sont associés telles que le type de matériau, le type de dopage, la concentration du dopant, etc.

Ainsi, pour chaque nœud, la concentration des porteurs, le champ électrique, etc. peuvent être calculés. Les électrodes sont représentées par des surfaces sur lesquelles les conditions aux limites sont imposées, comme par exemple, les tensions appliquées [4].

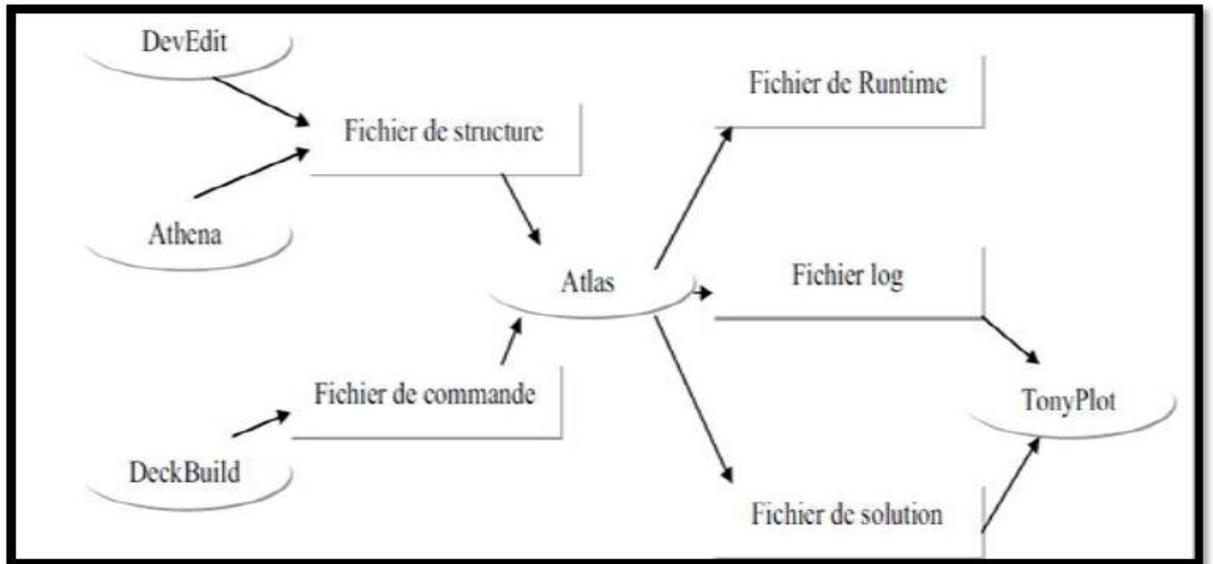


Figure 2.1. Entrées et sorties d'Atlas [4].

Dans le schéma de la **figure 2.1** nous voyons les types d'informations qui circulent en entrée et en sortie « d'Atlas ». La plupart des simulations réalisées par « Atlas » utilisent deux fichiers d'entrée [4].

Le premier fichier est un fichier script contenant les commandes pour qu'Atlas s'exécute (représenté par « Fichier de commande »). Le second fichier est un « Fichier de structure » qui définit la structure qui va être simulée.

A la sortie « d'Atlas », nous avons trois types de fichiers.

Le premier de ces fichiers est la sortie « Runtime » qui donne la progression, les erreurs et les messages d'avertissements pendant la simulation.

Le deuxième type de fichier est le fichier « log » qui stocke toutes les valeurs de tensions et de courants provenant de l'analyse du dispositif simulé (c'est le fichier du comportement électrique) [4].

Le troisième fichier de sortie est le « Fichier de solution », ce fichier stocke les données 2D ou 3D concernant les valeurs des variables solutions dans le dispositif en un point donné (c'est le fichier physique, il contient la structure dans un état particulier). Les deux derniers fichiers sont traités par l'outil de visualisation «TonyPlot» [4].

2.3 Ordre des commandes

Après la présentation de la chaîne progicielle TCAD de SILVACO, sa composition interne et le fonctionnement « d'Atlas » nous allons maintenant présenter l'ordre des commandes propres à la logique de programmation « d'Atlas ». Ainsi il existe cinq groupes de commandes, ces groupes doivent être organisés correctement (**Figure 2.2**). Si l'ordre n'est pas respecté, un message d'erreur apparaît et le programme ne s'exécute pas d'une façon correcte. Par exemple, si les paramètres ou les modèles de matériaux ne sont pas placés dans l'ordre idoine, le simulateur ne les prend pas en compte [4].

Groupe	Commandes
1. Spécification de la structure	{ MESH REGION ELECTRODE DOPING
2. Spécification des modèles des matériaux	{ MATERIAL MODELS CONTACT INTERFACE
Sélection de la méthode	METHOD
3. Spécification des solutions	{ LOG SOLVE LOAD SAVE
4. Analyse des résultats	{ EXTRACT TONYPLOT

Figure 2.2 Ordre des groupes des commandes dans un programme Atlas (les commandes fondamentales afférentes) [4].

Les commandes fondamentales sont :

- **MESH** : cette commande produit un maillage ou lit un maillage qui a été défini auparavant. L'élément de maille utilisé est le triangle.

- **REGION** : indique l'endroit des matériaux dans une maille précédemment définie. Chaque triangle doit être défini comme matériel.
- **ELECTRODE** : indique l'endroit et les noms des électrodes dans une maille précédemment définie.
- **DOPING** : indique analytiquement des profils de dopage ou prend de tels profils déjà prédéfinis dans les fichiers dédiés.
- **MATERIAL** : associe des paramètres physiques aux matériaux dans la maille. (Il faut faire attention parce que le logiciel a des paramètres de matériau définis par défaut pour les semi-conducteurs standard).
- **MODELS** : indique les carreaux constitutifs du modèle, ils indiquent les inclusions de différents mécanismes physiques, de modèles ou des autres paramètres comme par exemple la température globale pour la simulation.
- **CONTACT** : indique les attributs physiques d'une électrode.
- **INTERFACE** : indique les paramètres d'interface aux frontières de semi-conducteur/isolant. Tous les paramètres s'appliquent seulement aux nœuds de frontière exceptés la où ils sont déjà indiqués.
- **METHOD** : place les méthodes numériques à employer pour résoudre les équations et les paramètres liés à ces algorithmes.
- **LOG** : permet à toutes les caractéristiques finales de simulation d'être sauvegardées dans un fichier (ouvre un fichier de type log (log en minuscule veut dire le type de fichier, LOG en majuscule veut dire la commande dans le programme)).
- **SOLVE** : ordonne à l'Atlas d'exécuter une solution pour un ou plusieurs points de polarisation.
- **LOAD** : charge des solutions précédentes à partir de fichiers en tant que conjectures initiales à d'autres points de polarisation.

- **SAVE** : sauvegarde toutes les informations d'un point nœud du maillage dans un fichier de sortie (les fichiers de sortie sont de type structure). Les informations sauvées correspondent à un état électrique bien précis.
- **EXTRACT** : les commandes de ce type sont utilisées pour extraire les valeurs bien précises des paramètres des deux types des fichiers log ou structure.
- **TONYPLOT** : démarre le programme « TonyPlot » de post processus graphique des donnés [4].

2.3.1 BEAM

Une autre commande importante que nous avons utilisée dans notre mémoire est **BEAM**, sa position est au niveau 4 des groupes de commande [5].

On peut simuler plusieurs dispositif optoélectroniques en utilisant le lancer de rayon baser sur les principes de la géométrie optique, mais lorsque les effets de diffraction ou cohérentes deviennt importantes, ses méthodes ne sont pas suffisantes, dans ce cas nous avons besoin a une méthode qui prend en compte la nature ondulatoire de la radiation [5].

La méthode qui fait ça s'appelle la méthode de propagation beam en anglais : Beam propagation méthode (BPM). Un faisceau de la radiation est modélisé comme une source climat en utilisant l'instruction BEAM. La syntaxe dans ATLAS est décrite à travers l'exemple ci-dessous :

```
Beam num=1 x.origin=80 y.origin=-8.0 angle=90.0 wavelength=0.6 \  
  
xmin=-1 xmax=1 gauss mean=0 sigma=0.05 rays=200
```

BEAM: commende de définition d'une radiation dans l'atlas.

NUM: le numéro de la radiation dans le programme.

X.ORIGIN: l'origine de la radiation sur l'axe X.

Y.ORIGIN: l'origine de la radiation sur l'axe Y.

ANGLE: l'angle d'incidence de la radiation.

WAVELENGTH: la longueur d'onde (μm)

XMIN/XMAX : paramètres spécifions la fenêtre d'illumination (la largeur de fuseau).

Gauss : le sommet gaussien

Mean : la location de sommet gaussien

Sigma : la déviation standard de la fenêtre d'illumination.

Rays : le nombre des fuseaux

L'origine de faisceau est défini par les paramètres **X.ORIGIN** et **Y.ORIGIN** (**Figure 2.3**).

Le paramètre d'angle indique la direction de propagation du faisceau par rapport à l'axe **X**. **ANGLE = 90** est un éclairage vertical du haut. **MIN.WINDOW / MAX.WINDOW** paramètres de spécifient la fenêtre d'éclairage. Comme le montre la (**Figure 2.4**), Le faisceau est automatiquement divisé en une série de rayons de telle sorte que la somme des rayons couvrant toute la largeur de la fenêtre d'illumination. Lorsque le faisceau est divisé, ATLAS résout automatiquement la discontinuités le long des limites de la région de l'appareil.

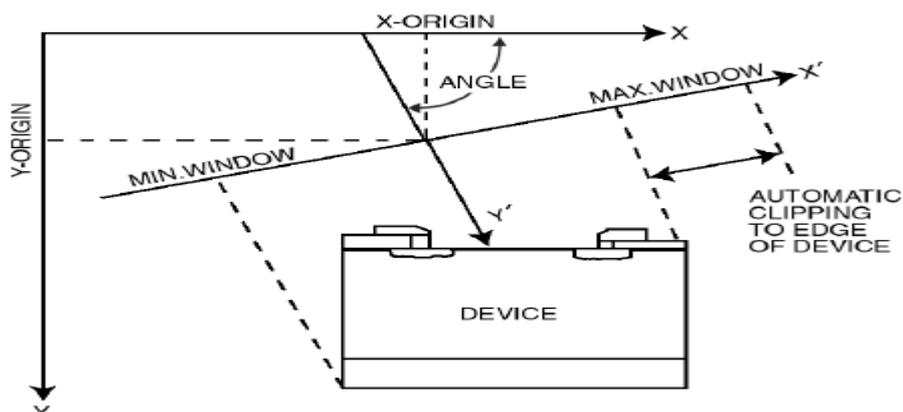


Figure2.3. Géométrie d'une irradiation [5].

2.4 Différentes étapes de simulation

Pour mieux expliquer l'outil ATLAS de manière rapide et simple nous avons jugé dans notre cadre de travail d'illustrer le fonctionnement de cet outil par l'intermédiaire d'exemple concret la structure n in p conventionnelle.

2.4.1 Spécification de la structure

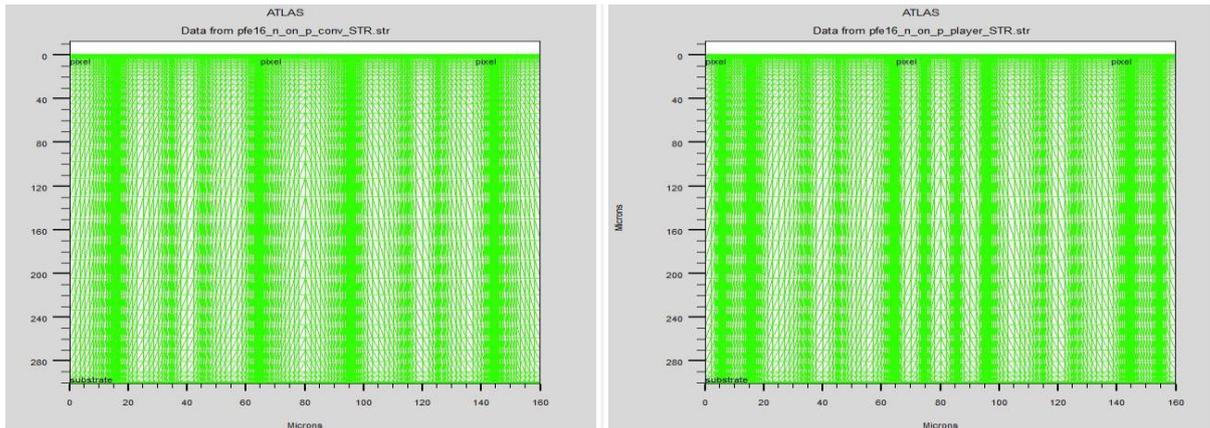
La spécification de la structure est effectuée en définissant le maillage, les régions, les électrodes et le niveau de dopage [4].

a Spécification du maillage

Le maillage joue un rôle important pour l'obtention des bonnes simulations. Celui-ci doit être fait avec la plus grande attention pour garantir la fiabilité des résultats.

La méthode numérique utilisée pour résoudre les équations physiques est la méthode des éléments finis. Son principe de base est la discrétisation par éléments finis des équations à traiter. Les éléments qui définissent la maille élémentaire utilisée par le simulateur sont des prismes. Le choix du maillage doit être fait de façon à avoir un compromis entre la vitesse d'exécution et l'exactitude des résultats, tel qu'un maillage épais produit une rapide simulation, mais les résultats sont moins précis tandis qu'un maillage fin produit un ralentissement de la simulation, mais des résultats plus précis.

Donc le maillage fin est plus intéressant de point de vue des résultats dans la simulation.



(a)

(b)

Figure 2.4. Définition du maillage pour les deux structure : (a) conventionnelle n in p, (b) p-layer n in p.

Le format général de définition du maillage est:

X.MESH LOCATION=<VALUE> SPACING=<VALUE>

X.mesh définit le maillage dans la direction x.

x.mesh loc=0.00 spac=0.5

x.mesh loc=3.00 spac=0.2

Loc définit l'intervalle du maillage (dans notre cas entre $x=0 \mu\text{m}$ et $x=3 \mu\text{m}$).

Spac définit la résolution du maillage qui doit être physiquement inférieur à la longueur de Debye.

Dans notre cas, le maillage aura une résolution de $0.5\mu\text{m}$ à partir de $x=0$ et terminera par une résolution de $0.2\mu\text{m}$ à $x=3$.

Y.MESH LOCATION=<VALUE> SPACING=<VALUE>

Y.mesh définit le maillage dans la direction Y.

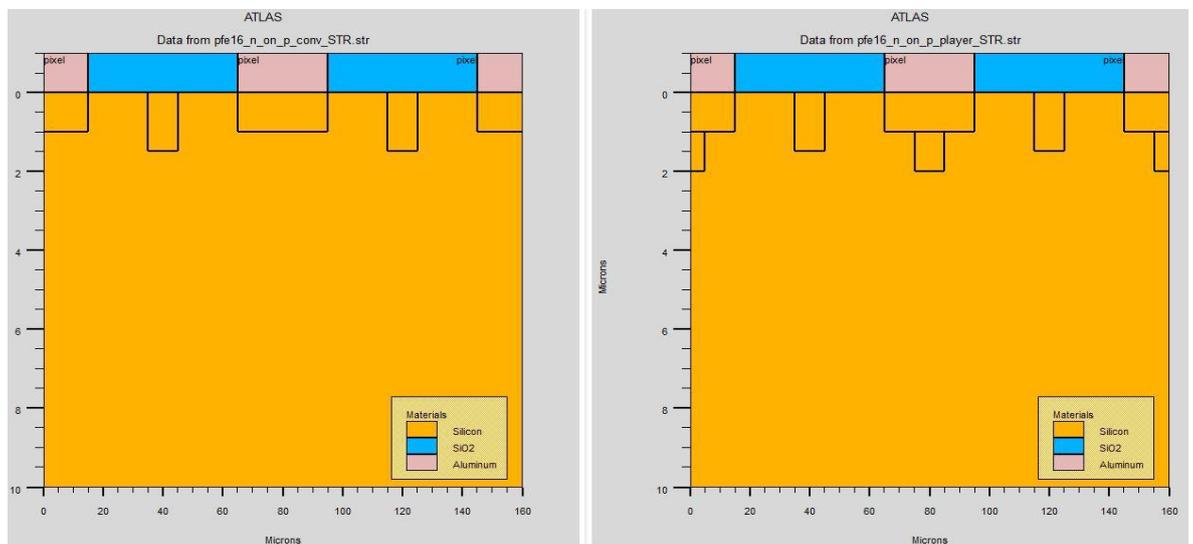
***b* Spécification des régions**

Après avoir déterminé le maillage, il est maintenant nécessaire de définir les régions. On peut avoir 200 régions différentes dans ATLAS [4].

Le format pour définir les régions est comme suit :

REGION number=<integer> <material_type> <position parameters>

Dans notre exemple une seule région de silicium occupe tout le maillage de la structure par la **figure (2.5)**.



(a)

(b)

Figure 2.5. Définition des régions pour les deux structures : (a) conventionnelle n in p, (b) p-layer n in p.

***c* Spécification des électrodes**

ATLAS a une limite de 50 électrodes qui peuvent être définies. Le format de définition d'électrodes est comme suit:

ELECTRODE NAME=<electrode name> <position_parameters>

Les instructions suivantes :

X.MIN : Spécifie le point de départ de l'électrode.

RIGHT : la position de l'électrode se situe à la droite de la structure (inverse :LEFT).

TOP : la position de l'électrode est en haut de la structure (inverse : BOTTOM).

Dans notre exemple trois anode en haut des deux structure et une cathode en bas, la **Figure (2.6)** montre la position de l'anode et la cathode par des valeurs de x et de y

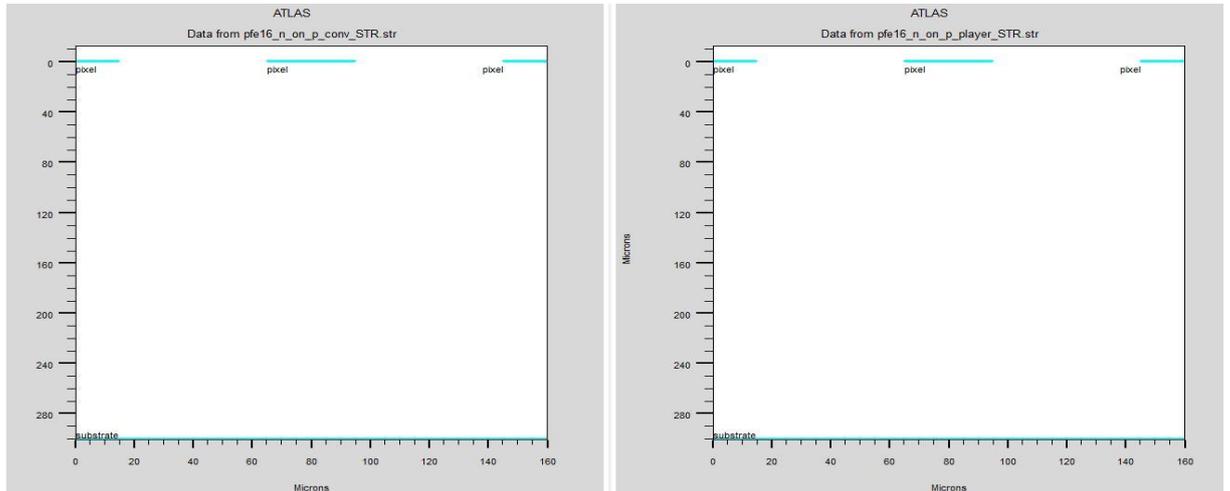


Figure 2.6. Définition des électrodes pour les deux structures avec ATLAS : (a) conventionnelle n in p, (b) p-layer n in p.

d Spécification du dopage

Le dernier aspect de la spécification de la structure qui doit être défini est le dopage **figure (2.7)**. Le format de la déclaration de dopage dans « Atlas » se présente comme suit: **DOPING <distribution _ type> <dopant _ type> <position _ paramètres>**

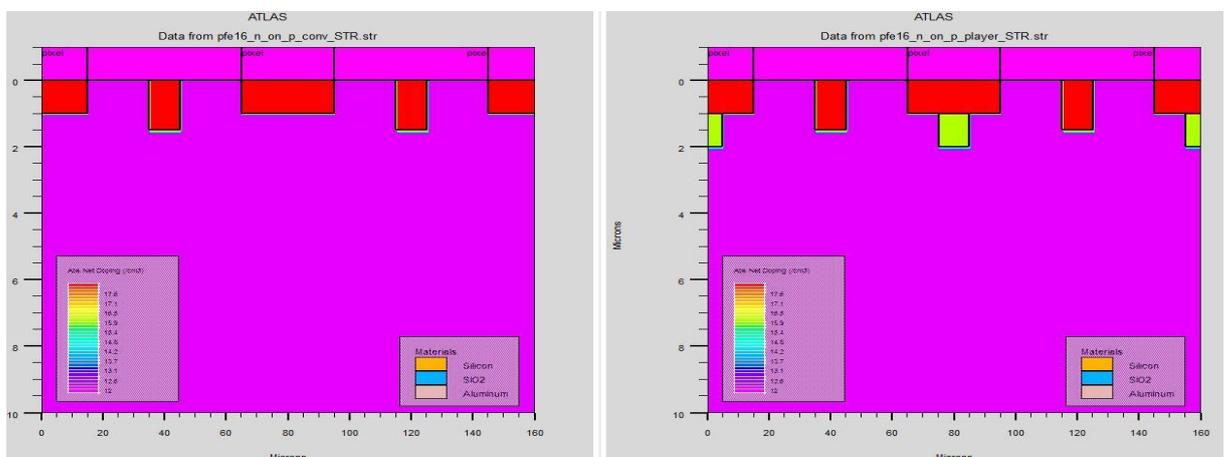


Figure 2.7. Définition de dopage pour les deux structures avec ATLAS : (a) conventionnelle n in p, (b) p-layer n in p

Une fois la structure définie on peut enregistrer ces informations dans un fichier de type.str. Ceci peut être accompli par l'instruction suivante : ***save outf = name of file.str***

De la même manière on peut visualiser le schéma de la structure à l'aide de l'outil Tonyplot en utilisant l'instruction suivante **Tonyplot** name of file.str

2.4.2 Spécification du modèle et des contacts

Après la spécification du maillage et du dopage, on peut facilement modifier les caractéristiques des matériaux utilisés (électrodes, substrat) et changer leurs paramètres qu'ATLAS les prend par défaut et définir notre choix du modèle physique qui sera utiliser pendant la simulation. Ces actions sont accomplies par les instructions suivantes : CONTACT, et MODELS [4].

a Spécification du modèle

Tous les modèles physiques sont spécifiés par les deux instructions MODELS et IMPACT. Pour spécifier:

- La dépendance de la mobilité en fonction de la concentration des porteurs on introduit le modèle **CONMOB**.
- la dépendance de la mobilité du champ électrique par **FLDMOB**.
- Le facteur de génération recombinaison par **SRH**.
- La distribution Fermi Dirac par **FERMIDIRAC**.
- Si la bande interdite devient étroite dans le cas d'un fort dopage par **BGN** D'autres modèles peuvent être introduits comme l'effet AUGER, Effet Tunnel etc..
- Model de l'ionisation par impact **Selberherr IMPACT**

b Spécification du contact

Pour allouer des conditions qui marquent la limite à l'électrode une déclaration de CONTACT doit être produite.

Contact détermine les attributs de l'électrode. La syntaxe de contact est comme suit: **CONTACT NUMBER=<n> |NAME=<ename>|ALL**

Ce qui suit est un exemple de la commande Contact.

CONTACT NAME=anode

c Spécification de l'interface

La déclaration d'interface est utilisée pour définir la densité de charge d'interface et la vitesse de recombinaison de surface aux interfaces entre les semi-conducteurs et les isolants. Par exemple, la déclaration :

interf qf=\$'oxide_charge'

2.5 Définition de la source de radiation

2.5.1 Identification d'une radiation :

Nous pouvons définir jusqu'à dix sources de radiation, Ils sont décrits en utilisant l'instruction BEAM, toutes les instructions de BEAM doivent apparaitre quelque part après les instructions MESH, REGION, DOPING, et ELECTRODE et avant chaque instruction SOLVE [5].

Dans notre exemple nous avons :

Beam num=1 x.origin=80 y.origin=-8 angle=75.0 wavelength=0.6 .

Le paramètre **num** est utilisé pour identifier une source optique, la valeur doit être comprimée entre 1 et 10.

Les sources de radiations sont ensuite désigner par la valeur de leur paramètre NUM. La puissance du faisceau optique est réglé en utilisant le paramètre **b <n>** de

l'instruction SOLVE, d'où n est le numéro de faisceau défini par NUM. par exemple si on veut une puissance de 0.5 W/cm^2 on écrit :

solve b1 = 0.5

Si pour une puissance de 1 W/cm^2 on écrit :

solve b1= 1

Pour spécifier l'origine de la source optique on utilise les paramètres **X.ORIGIN** et **Y.ORIGIN**.

Les valeurs de ses paramètres doivent être en dehors de toute région de dispositif.

Le paramètre **ANGLE** spécifié l'angle de la direction de propagation de faisceau.

Le paramètre **wavelength** spécifié la longueur d'onde de faisceau applique sur la structure.

2.5.2 Méthodes numériques

Après la spécification complète de la structure (géométrie et physique) ATLAS commence à résoudre une série d'équations (équations de continuité, équation de poisson, équations de diffusion) pour calculer les densités des porteurs, les potentiels et les courants [5].

Parmi les différentes méthodes numériques de résolution des systèmes d'équation, trois types de techniques sont utilisée dans « Silvaco-Atlas »:

- Méthode de Gummel
- Méthode de Newton
- Méthode des blocs

a Gummel

La méthode Gummel résout pour chaque inconnu en gardant tous les autres inconnus constants. Le processus est répété jusqu'à ce qu'il y ait une solution stable. Le

procédé Gummel est utilisé pour un système d'équations qui sont faiblement couplées et lorsqu'il y a convergence linéaire.

***b* Newton**

La méthode de Newton résout toutes les inconnues simultanément. Le procédé NEWTON est utilisé lorsque les équations sont fortement couplées avec convergence quadratique.

***c* Bloc**

La méthode BLOC résout quelques équations avec la méthode Gummel et les autres Avec la méthode NEWTON.

2.5.3 Déclaration output

Permet de spécifier électriquement les quantités à être conservées dans le dossier de structure et utilisation par la suite affichée «Tonyplot.», Ce qui suit est un exemple de la déclaration output :

```
output j.electron j.hole j.conduc j.total e.field ex.field ey.field flowlines \  
  
e.mobility h.mobility e.temp h.temp qss charge recomb
```

2.5.4 Spécification des solutions

Après avoir terminé la sélection de la méthode numérique, la prochaine étape est la spécification de solution. La spécification de solution se décompose des commandes

Suivantes log, solve, load, et save [5].

***a* Log**

LOG enregistre toutes les caractéristiques (I/V, C/V, etc.) du terminal dans un fichier. Toute donnée de type DC, transitoire, ou AC générée par la commande SOLVE après une commande LOG est enregistré. La commande suivante montre un exemple de la commande LOG: **tonyplot '\$filenameIVR'.log**

b Solve

La commande SOLVE suit l'instruction LOG. SOLVE effectue une Solution pour un ou plusieurs points de polarisation. Ce qui suit est un exemple de la commande SOLVE.

```
solve vsubstrate=-0.2 vstep=-0.2 vfinal=-1 name=substrate
```

c Load et save

La commande LOAD entre les solutions précédentes à partir de fichiers comme estimation initiale à d'autres points de polarisation. L'instruction SAVE entre toutes les informations d'un point de nœud dans un fichier de sortie. Ce qui suit sont des exemples des instructions LOAD et SAVE. **c**

Dans ce cas, les informations sont enregistrées dans le fichier namedile.STR après une commande SOLVE. Puis, dans une simulation différente, namedile.STR peut être chargé comme suit: **LOAD INFILE= namedile.STR**

2.5.5 Analyse des résultats

Une fois qu'une solution a été trouvée pour un problème de dispositif semi-conducteur, les informations peuvent être affichées graphiquement avec l'instruction TONYPLOT. En outre, les paramètres du dispositif peuvent être extraits avec la commande EXTRACT [5].

a Extract

L'ordre d'EXTRAIT est fourni dans l'environnement DECKBUILD. Il permet d'extraire des paramètres d'artifice. L'ordre a une syntaxe flexible qui permet de construire des routines d'EXTRAIT spécifiques. L'EXTRAIT opère sur le dossier de structure ou de courbe résolu précédent. Par défaut, l'EXTRAIT utilise le fichier journal actuellement ouvert. Pour passer outre à ce défaut, fournissez le nom d'un dossier à être utilisé par l'EXTRAIT avant la routine d'extraction. Par exemple :

```
EXTRACT INIT INF="<filename>"
```

b Tonyplot

Tonyplot permet de spécifier et compléter des fonctions des caractéristiques terminales dans les champs de texte de Fonction de Graphique.

La **figure (2.8)** représente les caractéristiques électriques I(V) de la structure conventionnel sous tonyplot.

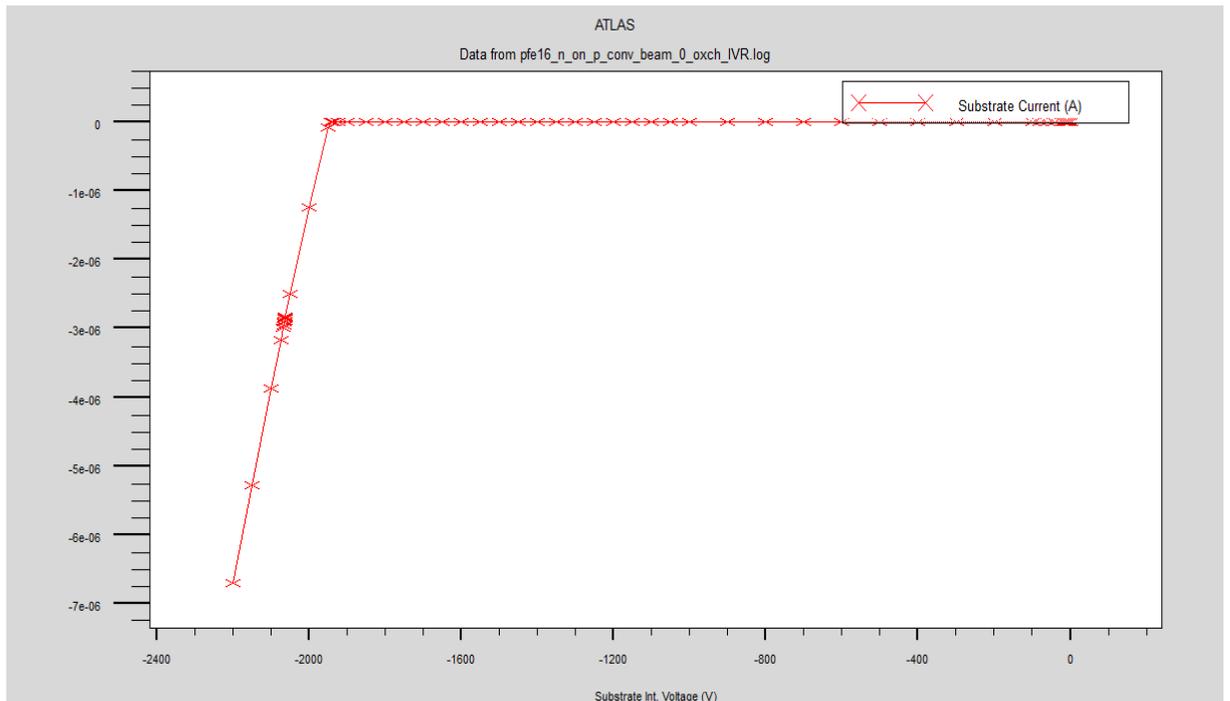


Figure 2.8. Caractéristique courant-tension sous Tonyplot.

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le logiciel de simulation des caractéristiques électriques «Atlas» de la société SILVACO que nous avons utilisé principalement pour modéliser un détecteur à base de silicium dédié pour les applications de physique à haute énergie.

Chapitre 3 Simulation des structures n-in-p

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons faire une étude comparative des performances électriques de deux détecteurs de rayonnement à semi-conducteurs représentés par deux structures appelées **n-in-p** conventionnelle et **n-in-p** p-layer. Ces performances seront déduites des caractéristiques courant-tension des deux structures polarisées en inverse. Les paramètres les plus importants auxquels nous nous sommes intéressés pour mener cette étude comparative sont : la tension de claquage, le courant de fuite, le champ électrique, le potentiel électrique, la concentration des trous.

Nous allons entamer cette étude par des simulations sans radiation puis on intégrera l'aspect radiatif sur les structures. L'influence de l'angle d'incidence des radiations sur les performances électriques sera aussi étudiée.

Dans les figures qui suivent nous avons adopté la démarche suivante : dans chaque figure, les images qui se trouvent en haut représentent la configuration 2D du champ électrique, de la concentration des trous ou bien du potentiel électrique au sein de la structure étudiée. Les images qui se trouvent en bas de la figure représentent la configuration 1D de ces paramètres, ainsi qu'en cas de comparaisons la structure conventionnelle se trouve à gauche et la structure p-layer se trouve à droite.

3.2 Simulation des structures n-in-p sans irradiation

3.2.1 profil de dopage pour les deux structures

Les figures (3.1) et (3.2) représentent la concentration des atomes donneurs et des atomes accepteurs dans les deux détecteurs sans polarisation ni radiation. Le profil des concentrations est déterminé à partir d'une ligne de découpe horizontale sur une profondeur de 100 nm et une verticale le long d'un implant de pixel.

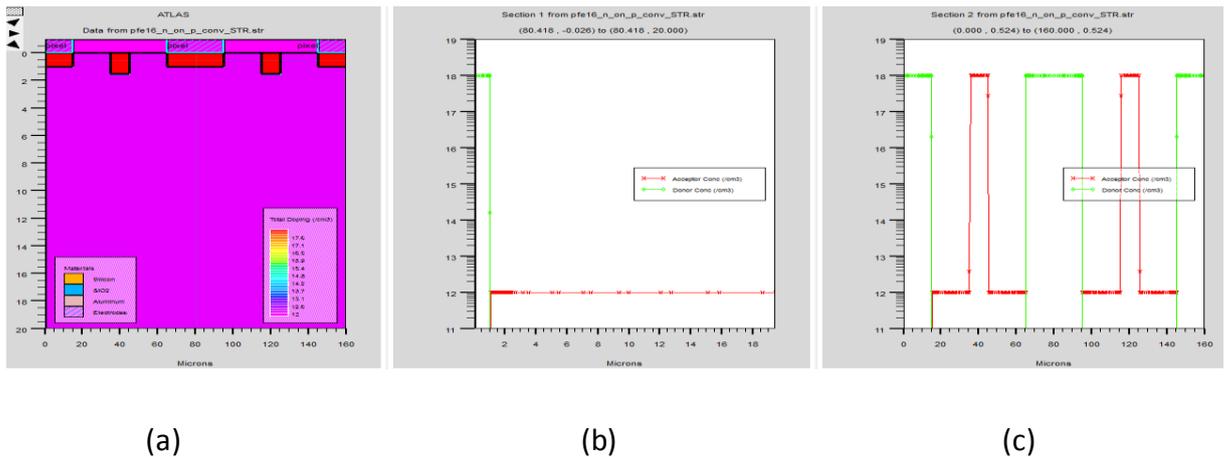


Figure 3.1. (a) Structure conventionnelle, variation de la concentration des dopants dans la structure (b) verticale et (c) horizontale.

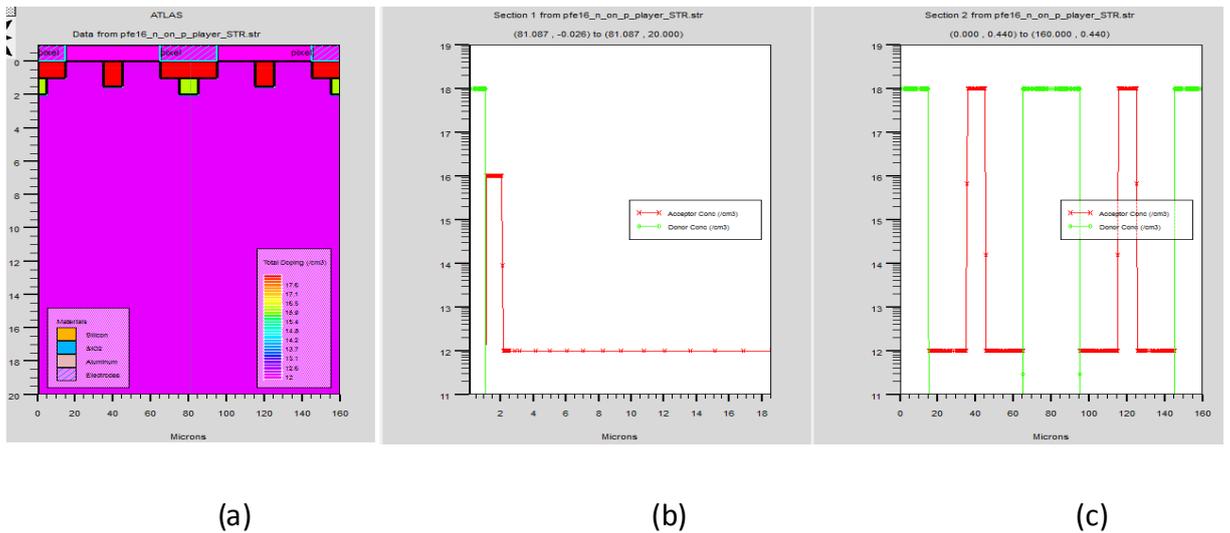


Figure 3.2. (a) Structure p-layer, variation de la concentration des dopants dans la structure (b) verticale et (c) horizontale.

La **figure (a)** représente le dopage net dans les structures, la **figure (b)** représente un cutline à $x = 80 \mu\text{m}$ sur la **figure(a)**, nous remarquons que la concentration des accepteurs est très supérieur au niveau de la jonction n+/p+ dans la structure p-layer que dans la région n+/p de la structure conventionnelle, dans la structure p-layer la concentration des accepteurs est 10^{16} cm^{-3} alors que dans la structure conventionnel est 10^{12} cm^{-3} .

La **figure (c)** représente un cutline à $y = 1 \mu\text{m}$ sur la **figure(a)**, nous remarquons que la concentration des porteurs est identique pour ce cutline.

3.3 Caractéristiques électriques sans radiation

3.3.1 Les caractéristiques courant-tension

La **figure (3.3)** représente l'évolution du courant électrique en fonction de la tension de polarisation. La **figure (3.4)** représente un zoom l'évolution de courant électrique en fonction de la tension de polarisation.

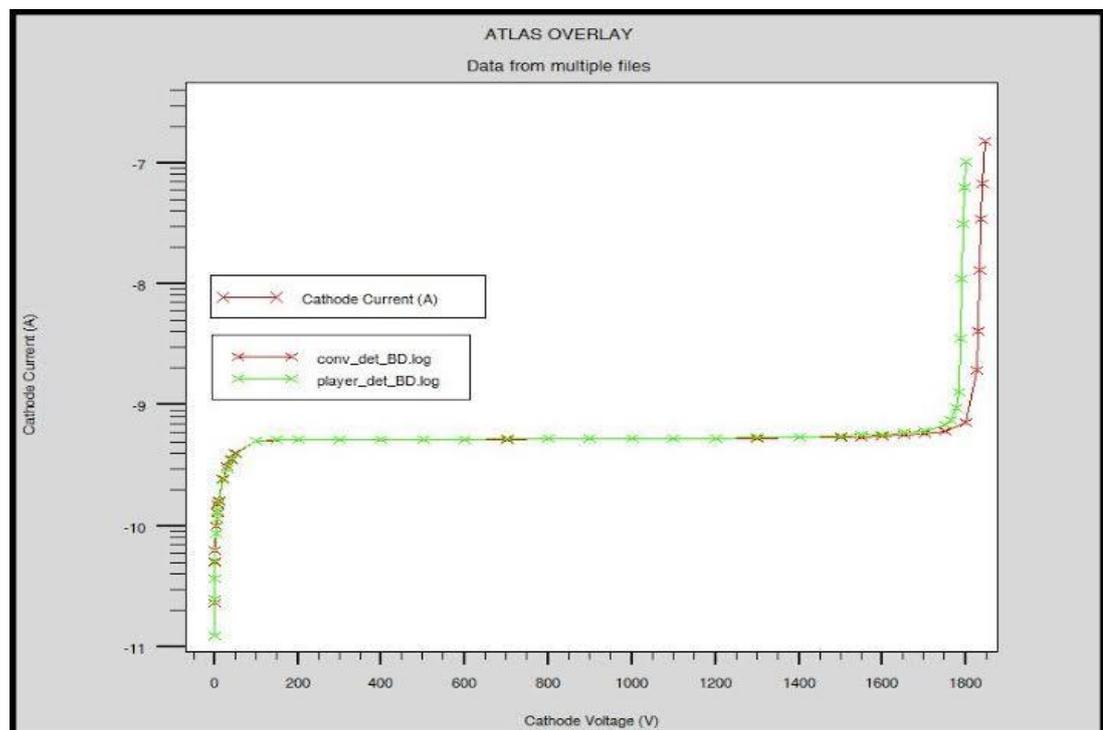


Figure 3.3. Représentation de courant électrique en fonctions de la tension électrique pour une polarisation inverse.

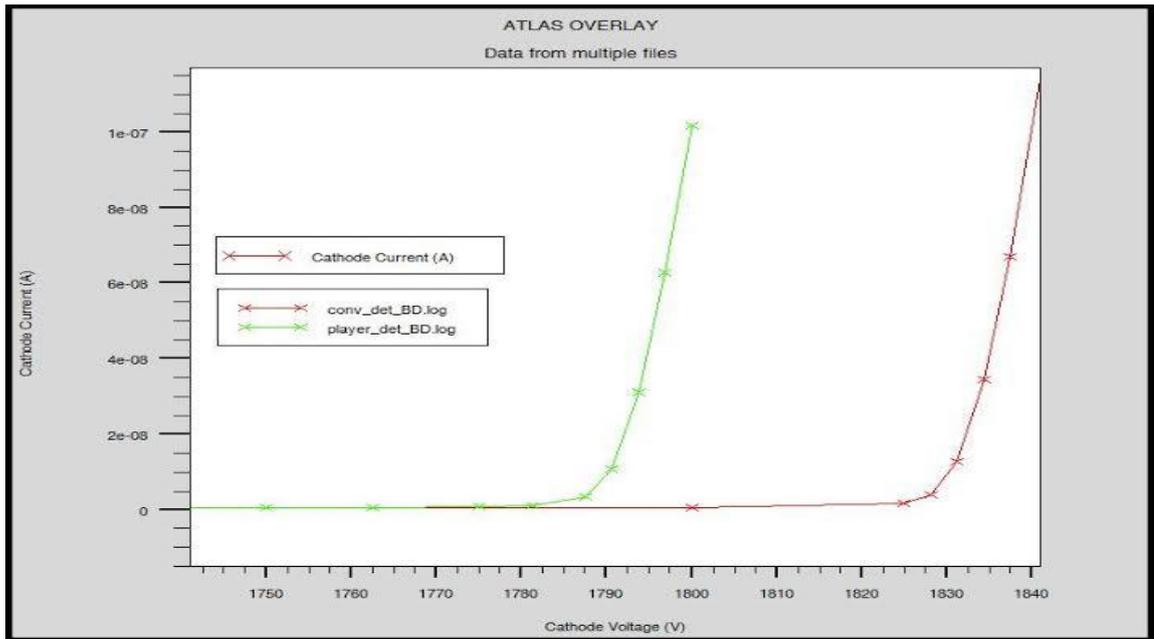


Figure 3.4. Zoom de la représentation de courant électrique en fonction de la tension électrique pour une polarisation inverse.

Nous remarquons que :

- la tension de claquage de la structure conventionnelle est plus grande que celle de la structure p-layer.
- la tension de claquage pour la structure conventionnelle avoisine le 1850 V alors que celle de la p-layer elle est à 1825 V.
- le courant de fuite est identique pour les deux structures.

3.3.2 Etude de l'évolution de la zone de charge d'espace

Pour voir la zone de charge d'espace nous devons voir l'évolution de la concentration des porteurs des charges (trous).

La **figure (3.5)** montre l'évolution de la zone de charge, nous remarquons que la zone de charge d'espace se développe lorsque la polarisation augmente.

La **figure (3.6)** est un cutline à 80 μm qui montre l'évolution de la zone de charge, nous remarquons que la zone de charge d'espace se développe lorsque la polarisation augmente.

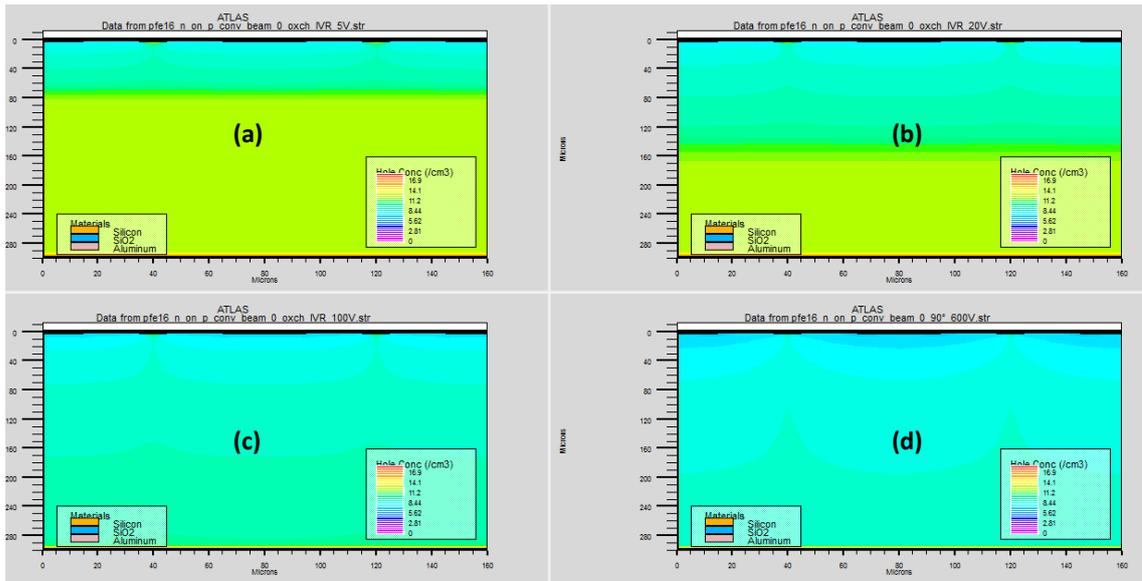


Figure 3.5. Evolution de la concentration des trous pour des valeurs de polarisation en inverse de (a) 5V, (b) 20V, (c) 100V et (d) 600V.

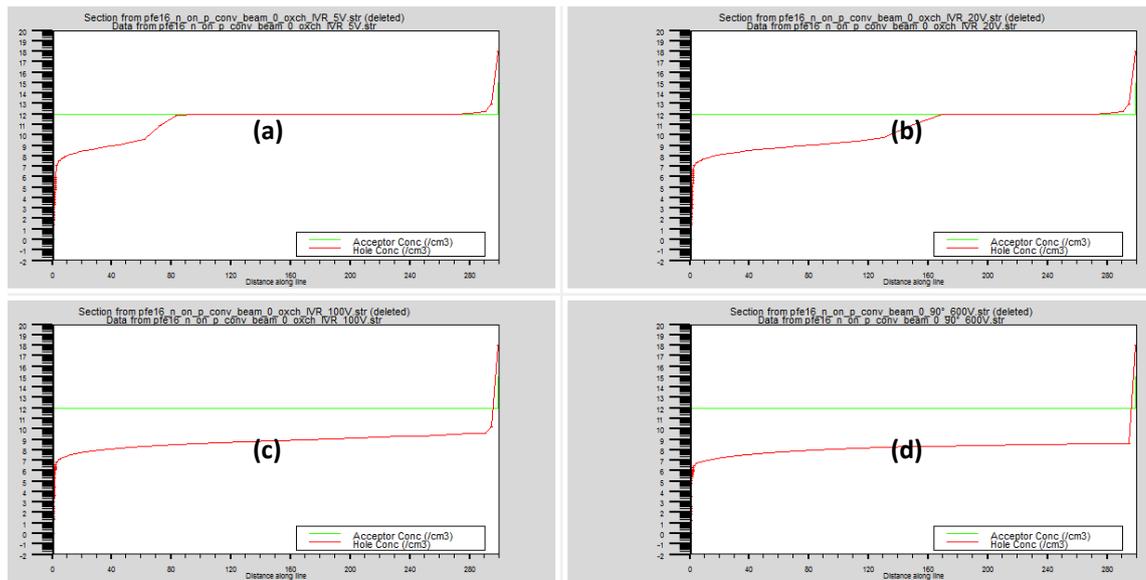


Figure 3.6. Evolution de zone de charge d'espace pour des valeurs de polarisation en inverse de (a) 5V, (b) 20V, (c) 100V et (d) 600V

Pour une tension de polarisation de 600 V nous remarquons que la zone de d'espace couvre toute la structure ce qui fait que toutes nos études comparatives seront sur des structure polariser à 600 V, car lorsque nous avons une grande zone de charge qui touche toute la structure on aura plus de création des paires électrons trous (plus de collection des charges).

3.3.3 Potentiel électrique

Les figures 3.7 et 3.8 représentent l'évolution de potentiel électrique dans les deux structures pour des polarisations de 5V, 20V, 100V et 600V. Nous remarquons que lorsque la tension de polarisation augmente, le potentiel électrique se propage avec de haut vers le bas de la structure.

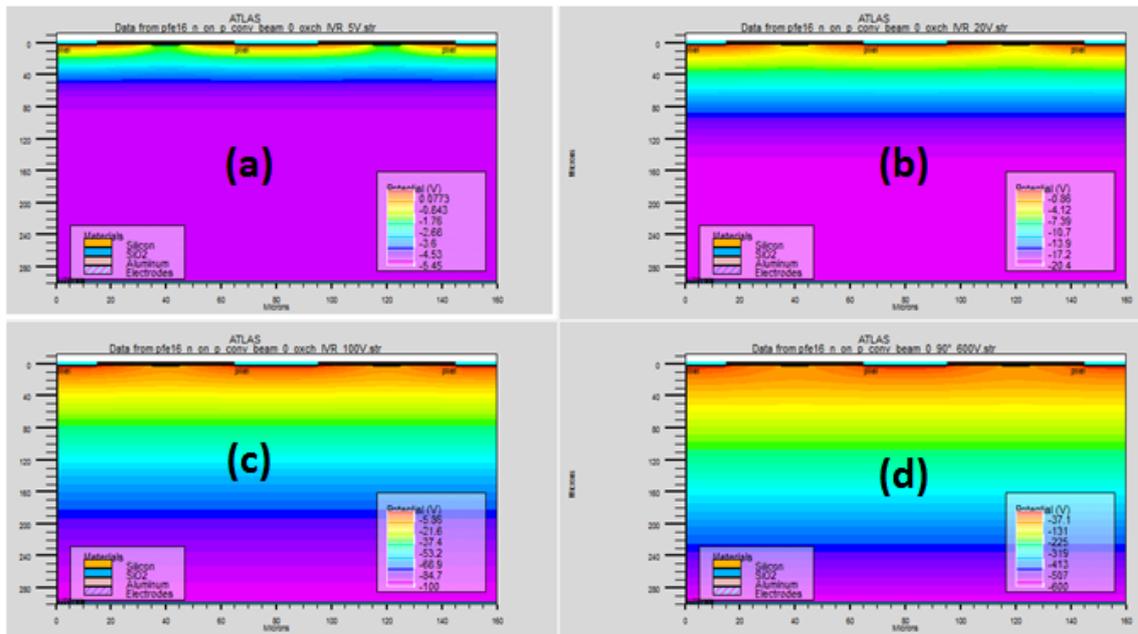


Figure 3.7. Variation du potentiel électrique dans la structure p-layer pour des valeurs de polarisation en inverse de (a) 5V, (b) 20V, (c) 100V et (d) 600V.

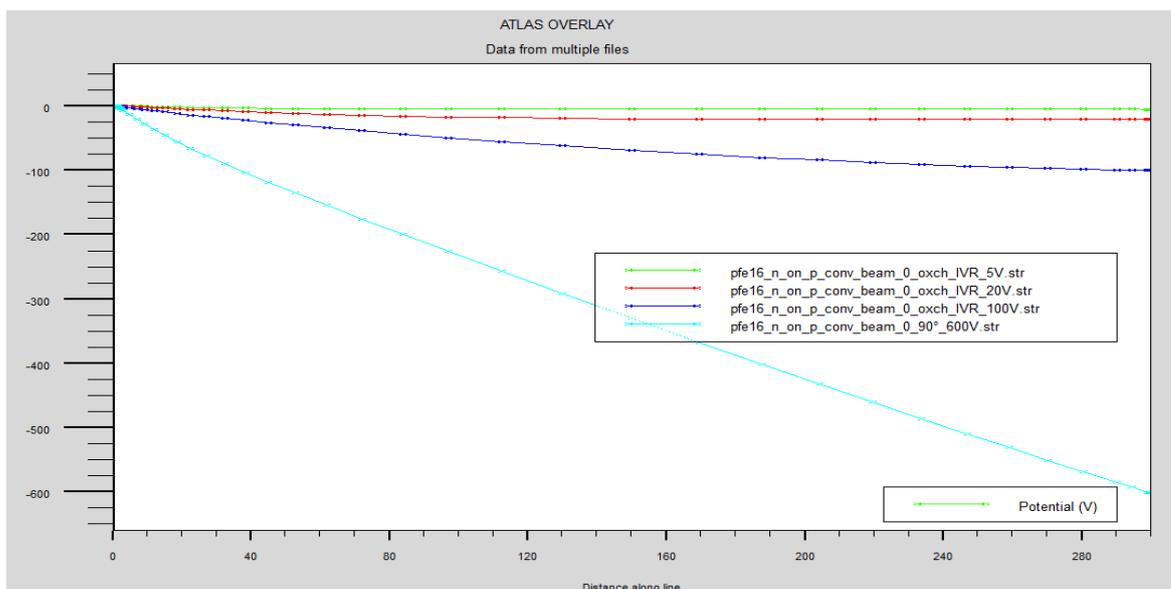


Figure 3.8. Variation du potentiel électrique dans la structure n-in-p p-layer.

3.3.4 Champ électrique

Les figures 3.9 et 3.10 représentent l'évolution du champ électrique dans la structure conventionnelle pour des polarisations de 5V, 20V, 100V, 600V nous remarquons que le champ électrique se développe à chaque fois que la tension de polarisation augmente.

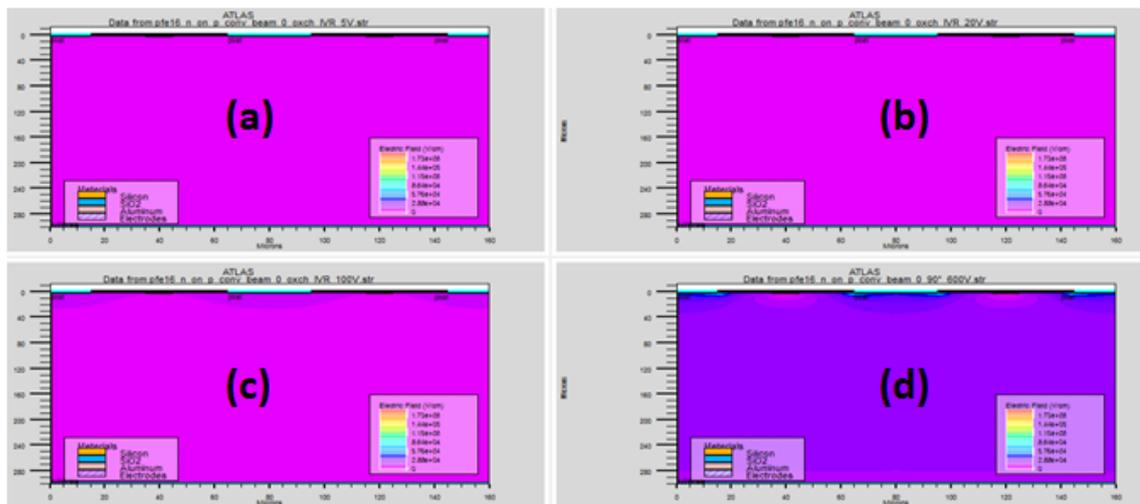


Figure 3.9. Variation du champ électrique dans la structure n-in-p conventionnelle pour des valeurs de polarisation en inverse de (a) 5V, (b) 20V, (c) 100V et (d) 600V.

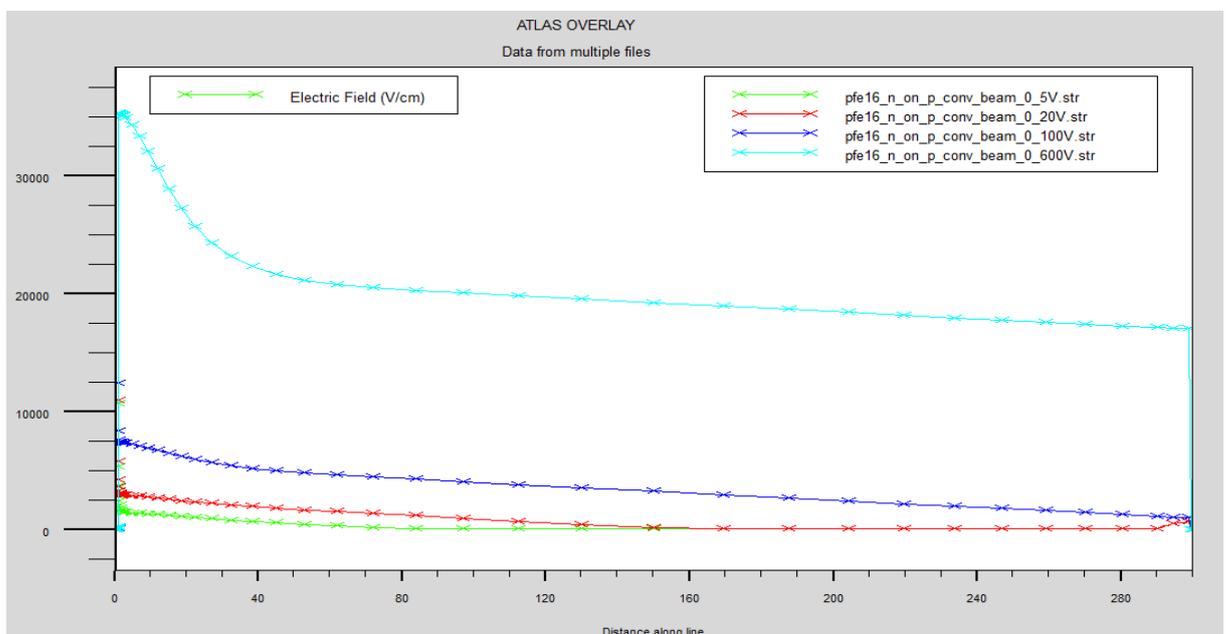


Figure 3.10. Variation du champ électrique dans la structure conventionnelle pour une ligne de découpe verticale (cutline) en $x=80 \mu\text{m}$.

Les figures 3.11 et 3.12 représentent les deux courbes de l'évolution du champ électrique, pour un cutline à $x=80\ \mu\text{m}$, nous remarquons que le champ électrique est très grand dans la région n+/p+ de la structure p-layer que dans la région n+/p de la structure conventionnelle.

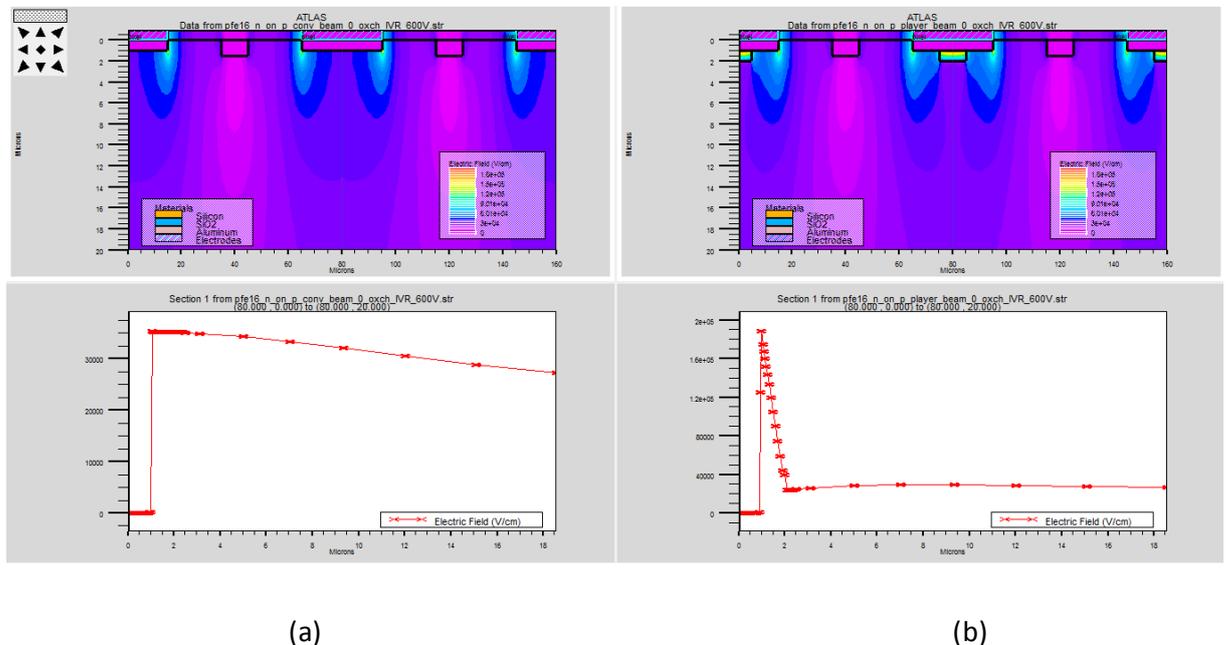


Figure 3.11. Zoom de la variation du champ électrique dans les deux structures pour une ligne de découpe verticale (cutline) en $x=80\ \mu\text{m}$. Structure (a) conventionnelle et (b) p-layer.

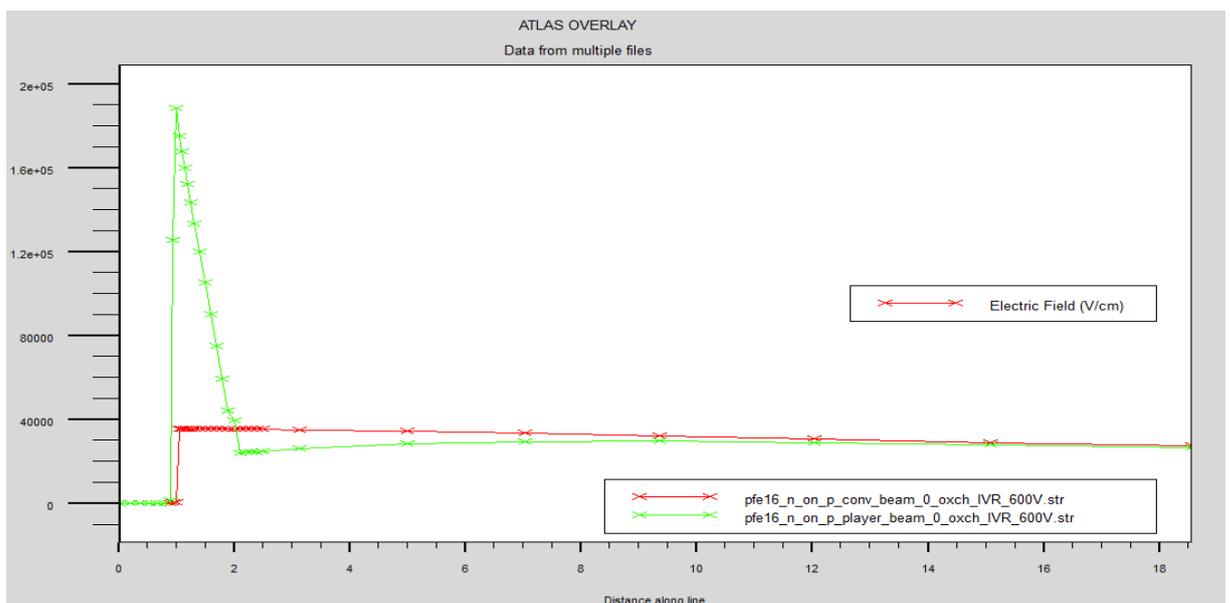


Figure 3.12. Superposition des variations du champ électrique dans les deux structures pour une ligne de découpe verticale (cutline) en $x=80$.

3.3.5 Concentration des trous

Les figures 3.13 et 3.14 représentent l'évolution de la concentration des trous dans les deux structure pour des polarisations 5V, 20V, 100V, 600V nous voyons que la concentration des trous se développe à chaque fois qu'on augmente la tension de polarisation ce qui provoque l'augmentation de la zone de charge d'espace.

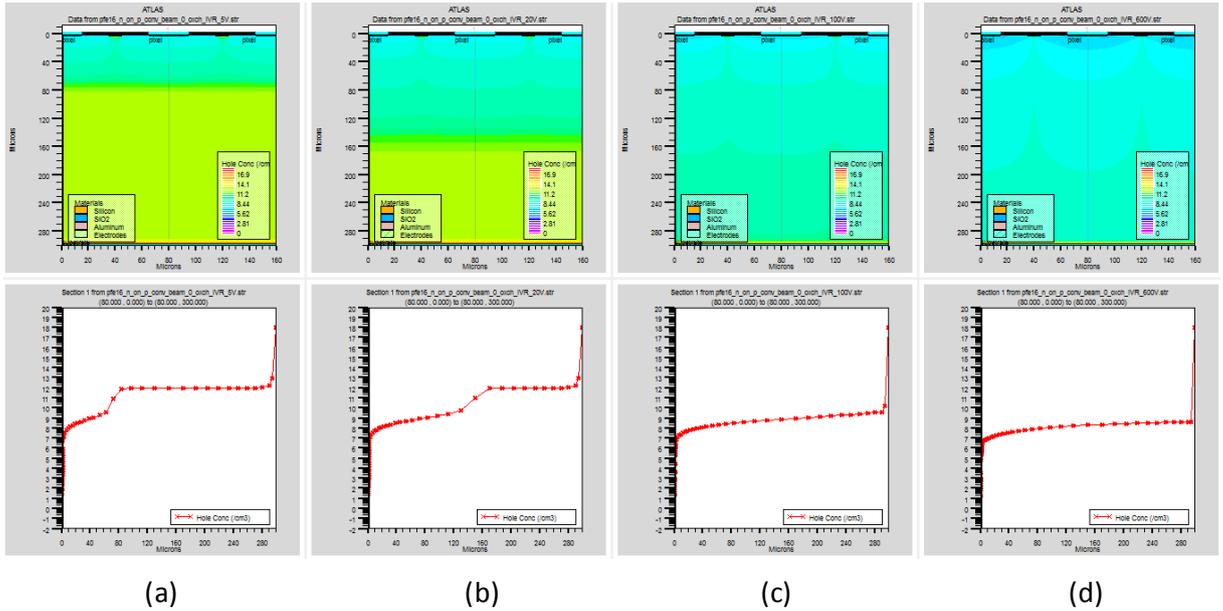


Figure 3.13. Variation de la concentration des trous dans la structure n-in-p pour des valeurs de polarisation en inverse de (a) 5V, (b) 20V, (c) 100V et (d) 600V.

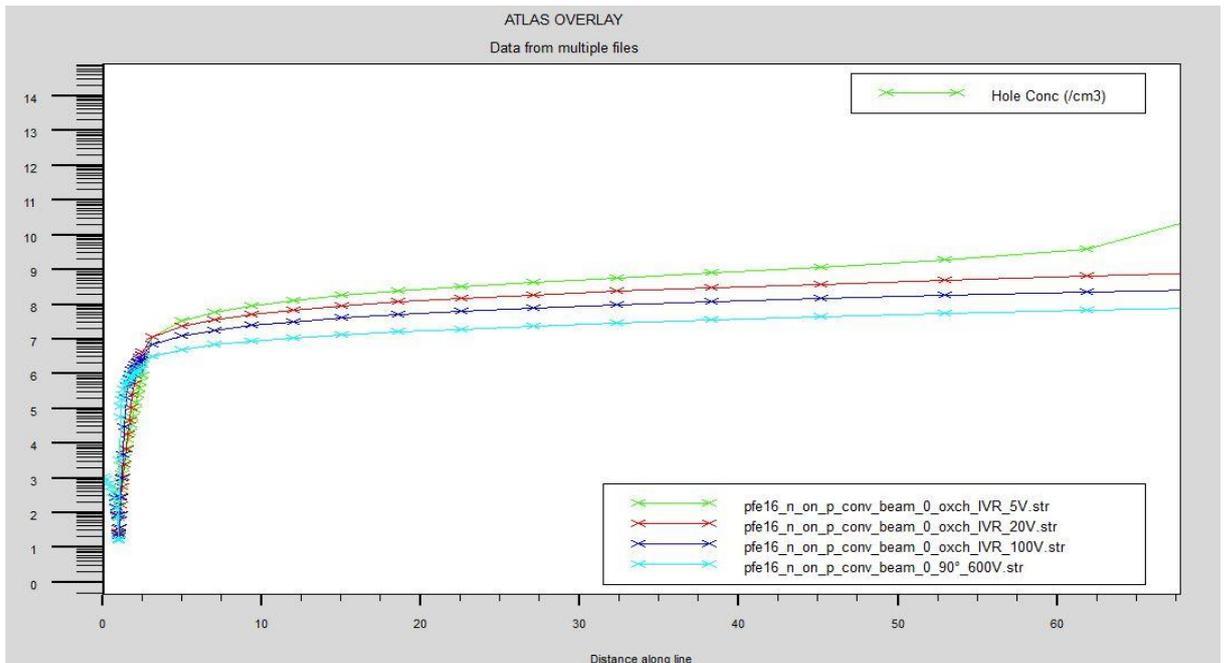
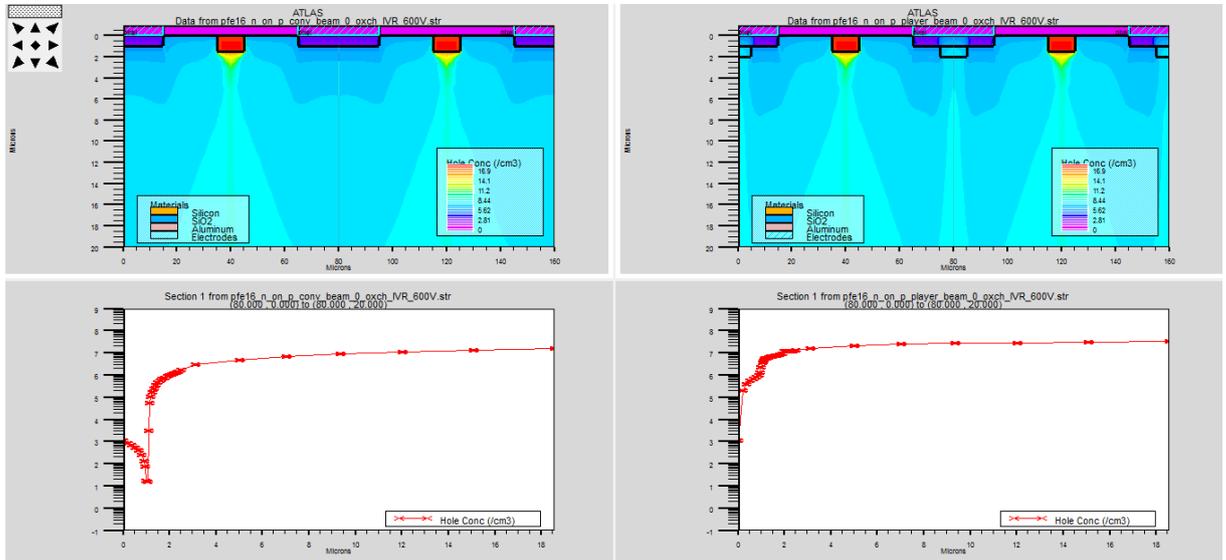


Figure 3.14. Variation de la concentration des trous dans la structure n-in-p p-layer.

Les **figure (3.15)** et **figure (3.16)** représentent les deux courbes de l'évolution de la concentration des trous pour un cutline $x=80 \mu\text{m}$, on voit que la concentration des trous est beaucoup plus grande dans la p-layer que dans la conventionnelle.



(a)

(b)

Figure 3.15. Zoom de la variation de la concentration des trous dans les deux structures pour une ligne de découpe verticale (cutline) en $x=80 \mu\text{m}$. Structure (a) conventionnelle et (b) p-layer.

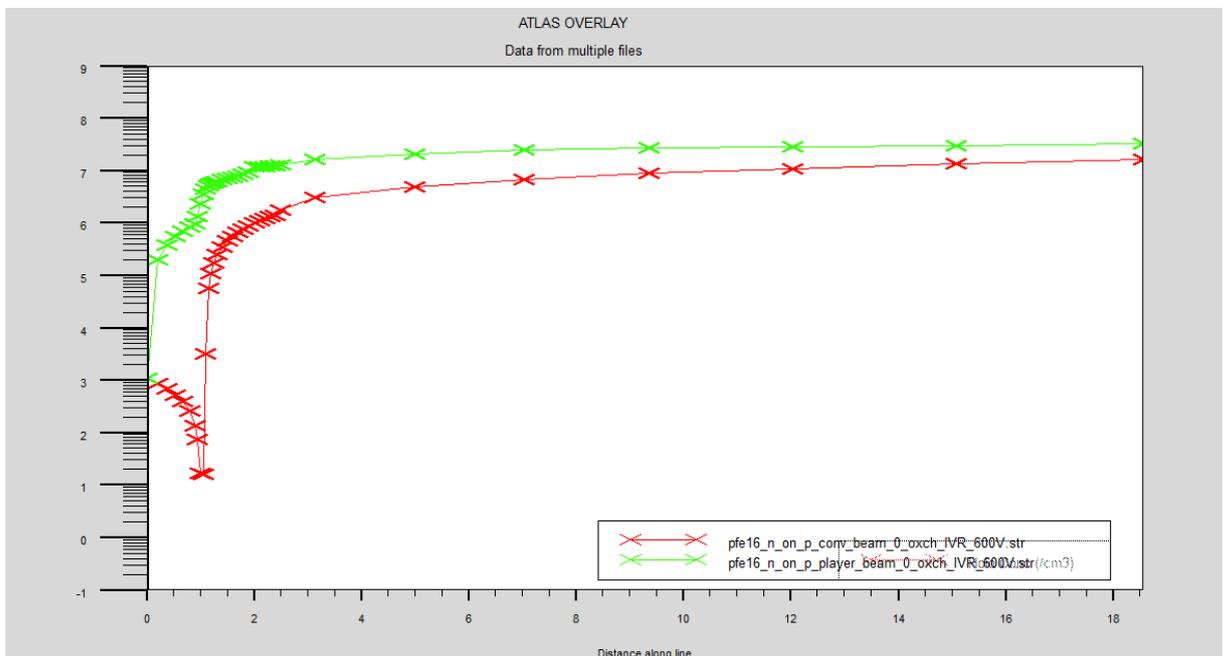


Figure 3.16. Zoom d'un cutline a $x=80 \mu\text{m}$ pour les deux structures à une tension de polarisation inverse de 600V montre la variation de la concentration des trous.

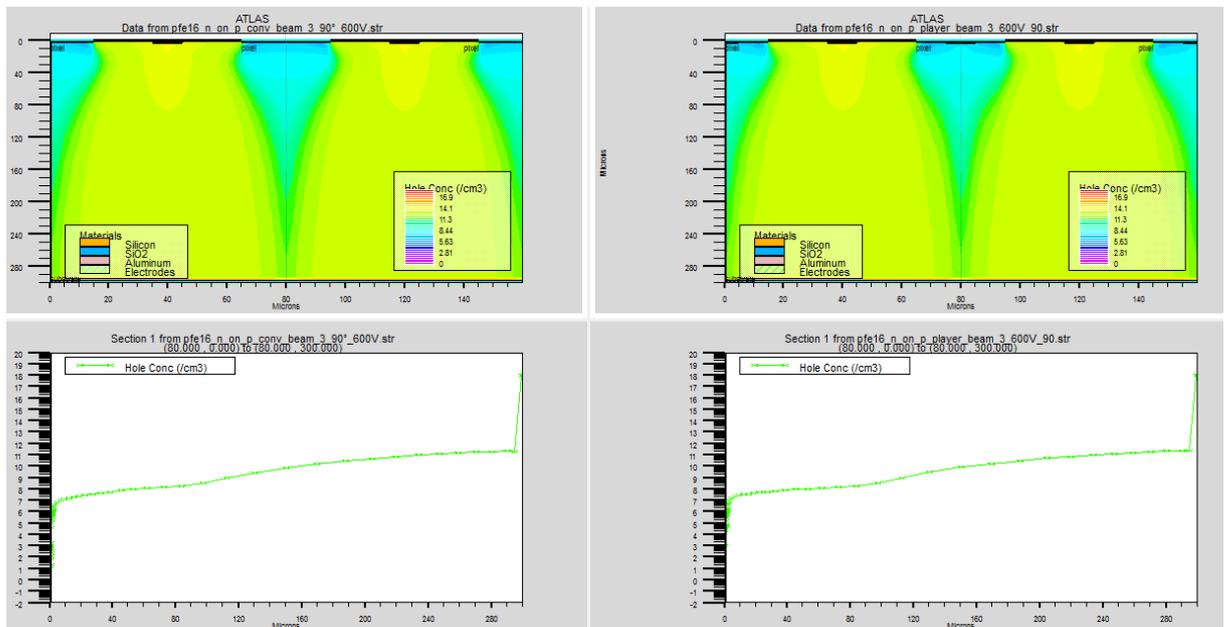
3.4 Caractéristiques électrique des structures irradiées (angle d'incidence = 90°)

Dans cette étude on va comparer les caractéristiques électriques entre les deux structures (conventionnelle et p-layer) polarisées en inverse à 600 V et sous une radiation à plusieurs puissances.

3.4.1 Puissance de radiation = 3 W/cm²

a Concentration des trous

Les figures (3.17), (3.18) montrent que la concentration des trous est supérieur dans la structure p-layer que dans la structure conventionnelle.



(a)

(b)

Figure 3.17. Zoom de la variation de la concentration des trous dans les deux structures sous une radiation pour une ligne de découpe verticale (cutline) en $x=80\ \mu\text{m}$. Structure (a) conventionnelle et (b) p-layer.

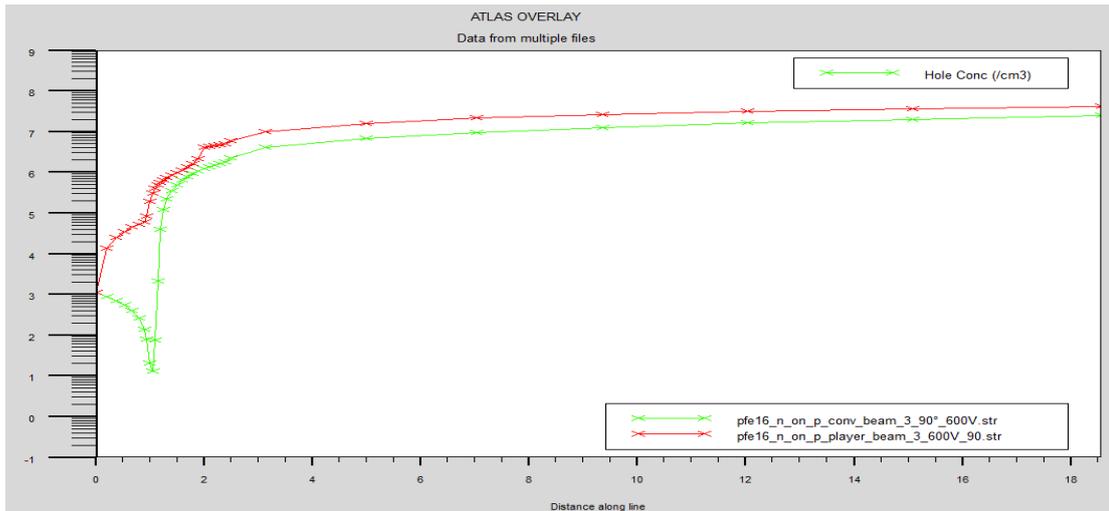


Figure 3.18. Zoom pour un Cutline à $x=80 \mu\text{m}$ montre la variation de la concentration des trous dans les deux structures polarisées en inverse sous une radiation.

b Champ électrique

La **figures 3.19** représente l'évolution du champ électrique pour les deux structures a une tension de polarisation inverse de 600V et sous une radiation d'une puissance de 3 W, on voit clairement que le champ électrique est très grand dans la structure n in p-layer que dans la structure conventionnelle exactement dans la région PN.

La **figure 3.20** représente les deux courbes de l'évolution de champ électrique, pour un cutline à $x=80$, à $y=1$ le champ électrique pour la p-layer est $1,8 \cdot 10^5 \text{V/cm}$ alors que dans la conventionnelle il est 20000V/cm .

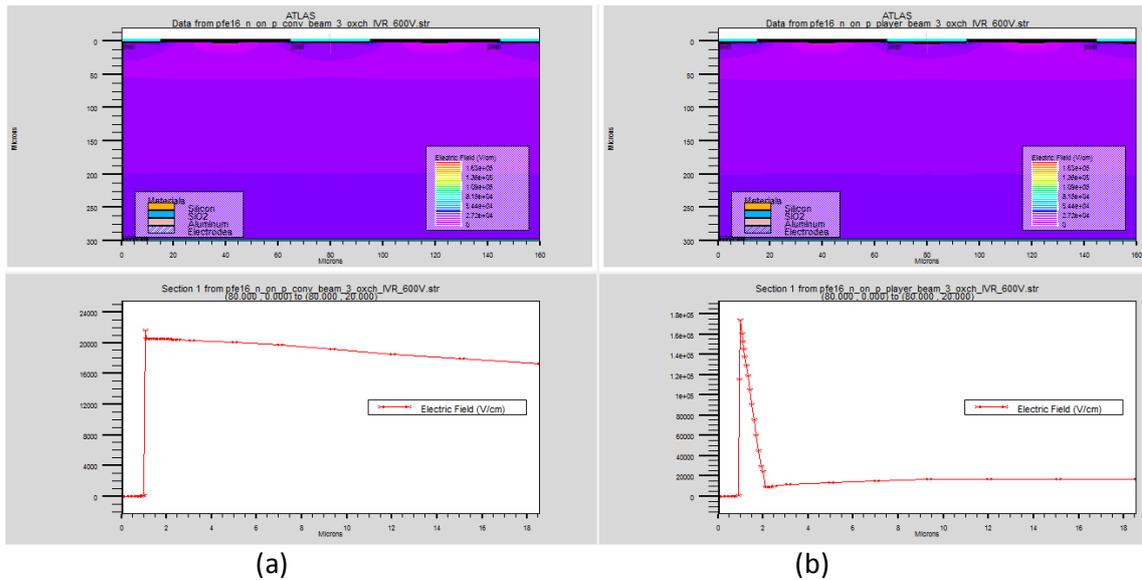


Figure 3.19. Zoom de la variation du champ électrique dans les deux structures sous une radiation pour une ligne de découpe verticale (cutline) en $x= 80 \mu\text{m}$. Structure (a) conventionnelle et (b) p-layer.

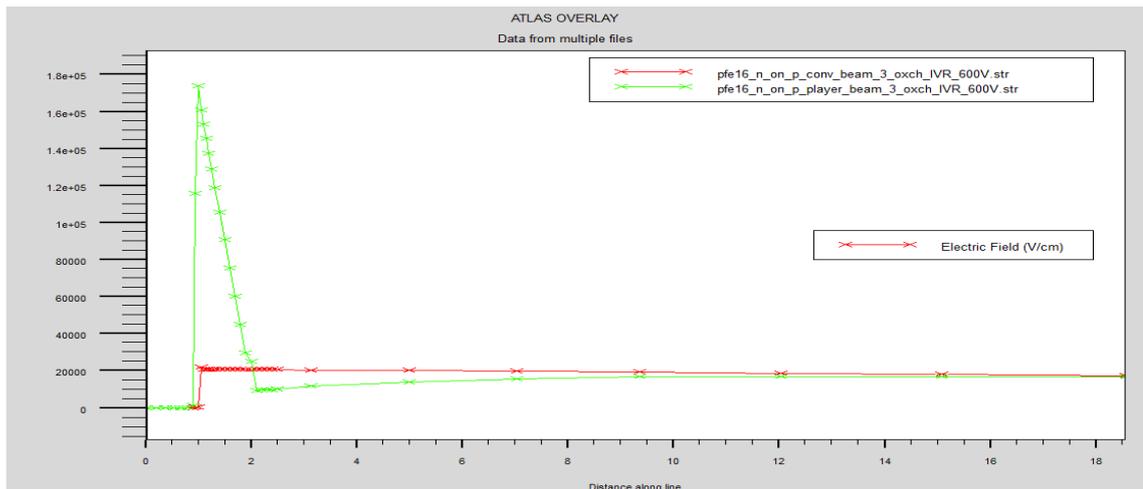


Figure 3.20 Zoom d'un cutline à $x=80$ pour les deux structures à une tension de polarisation inverse sous une radiation de 3 W montre la variation du champ électrique.

3.5 Etude de l'influence de l'angle d'incidence sur les caractéristiques électriques

Nous cherchons à augmenter les résultats précédentes pour avoir une amélioration de la collecte des charges, on aura cette augmentation si on change l'angle d'incidence car lorsque l'angle d'incidence est 90° la radiation ne peut pas traverser les métaux.

Nous remarquons d'après les **figures (3.21, 3.22 et 3.23)** que la concentration des porteurs de charges (trous) crée par des radiations ionisantes et le champ électrique dépendant de l'angle d'incidence. La quantité de charges créées augmente au fur et à mesure que l'angle d'incidence dévie de part et d'autre de la valeur de 90° .

Puisque le faisceau des radiations avec un angle d'incidence de 45° crée le maximum de charges, notre étude comparative sur les deux structures va considérer uniquement cet angle d'incidence.

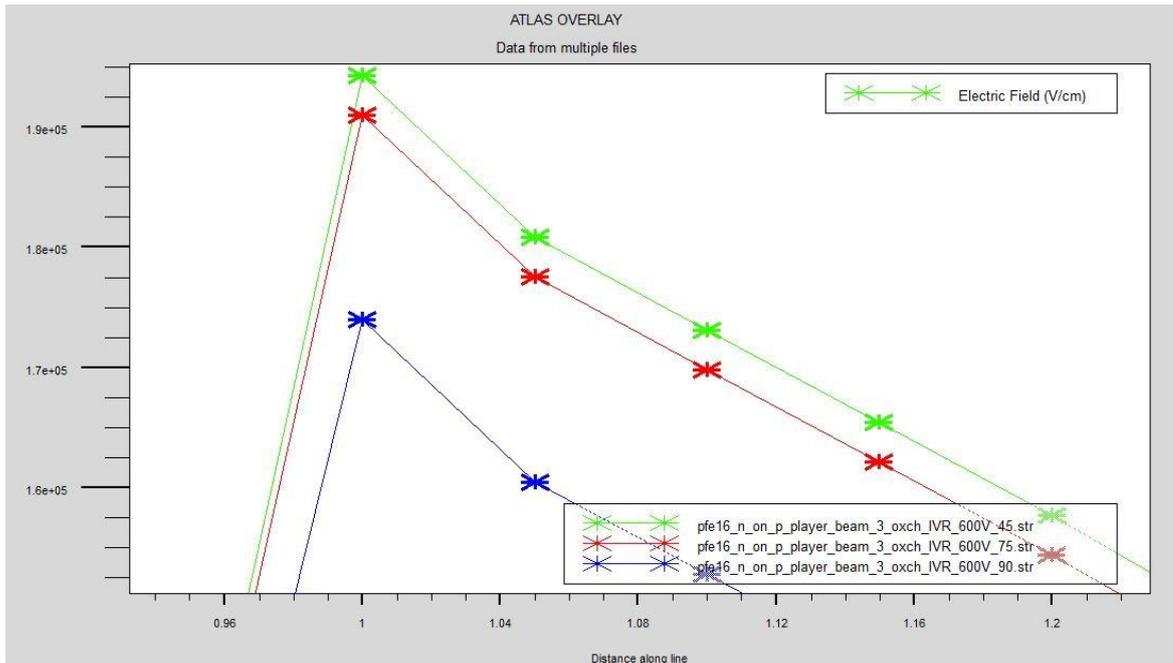


Figure 3.21. Variation du champ électrique dans la structure p-layer pour différents angles d'incidences à gauche 90°, au milieu 75° et à droite 45°.

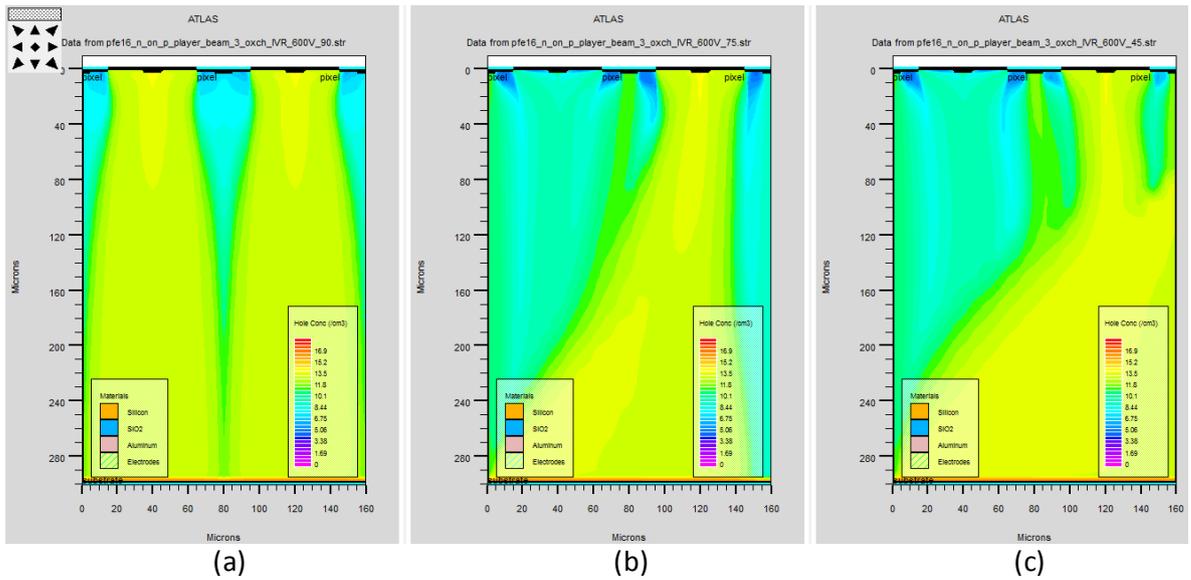


Figure 3.22. Variation de la concentration des trous dans structure n-in-p p-layer pour différents angles d'incidences (a) 90°, (b) 75°, (c) 45°.

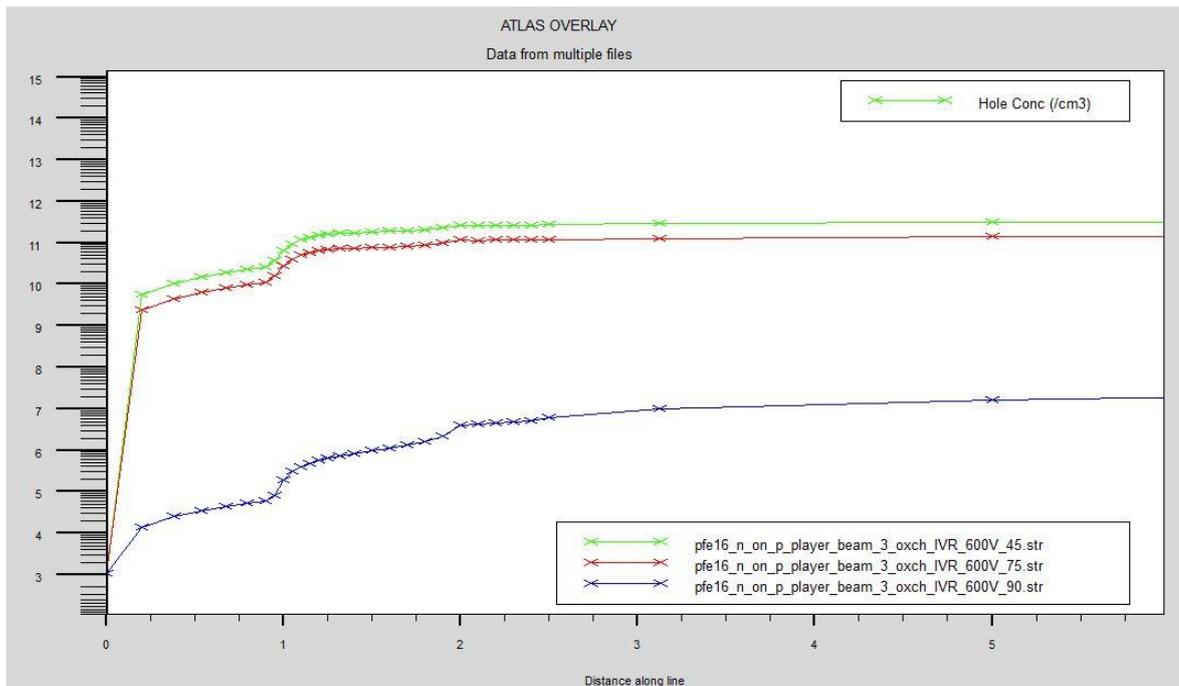


Figure 3.23. Zoom d'un cutline montre la variation de concentration des trous dans la structure n-in-p p-layer avec différentes angles d'incidences 90°, 75° et 45°.

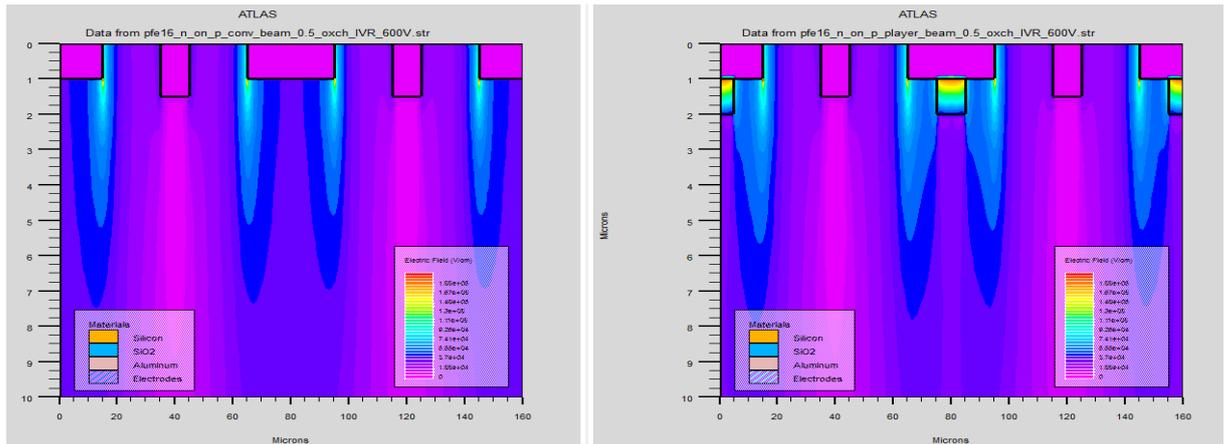
3.6 Etudes des caractéristiques électriques des deux structures irradiées

Nous comparons dans cette section l'évolution des caractéristiques électriques pour les deux structures n-in-p polarisées en inverse à 600 V sous différentes puissance de la radiation. Dans ce qui suit, dans chaque figure il y'a les deux structures, à gauche la structure conventionnelle et à droite la structure p-layer.

3.6.1 Puissance de 0.5W/cm²

a Champ électrique

La **figure 3.24** et **3.25** présentent l'évolution du champ électrique dans des structures polarisée en inverse avec 600V et sous une radiation d'une puissance de 0,5 W/cm². Pour un cutline a x=80 μm, nous remarquons que le champ électrique est très grand dans la région n+/p+ de la structure p-layer que dans la région n+/p de la structure conventionnelle.



(a)

(b)

Figure 3.24. Zoom de la variation du champ électrique dans les deux structures sous une radiation pour une ligne de découpe verticale (cutline) en $x=80\ \mu\text{m}$. Structure (a) conventionnelle et (b) p-layer.

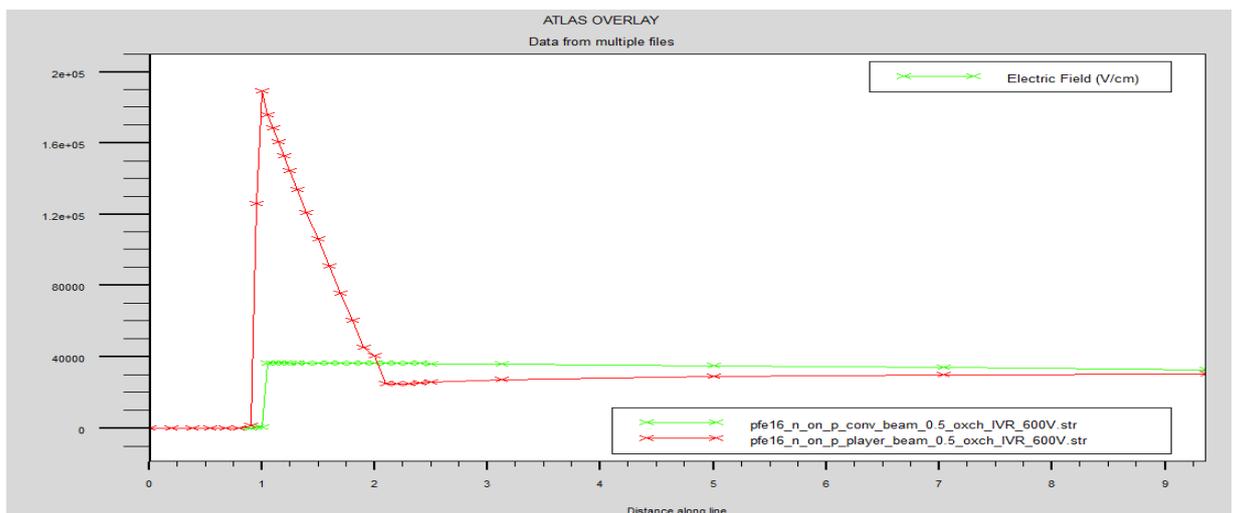
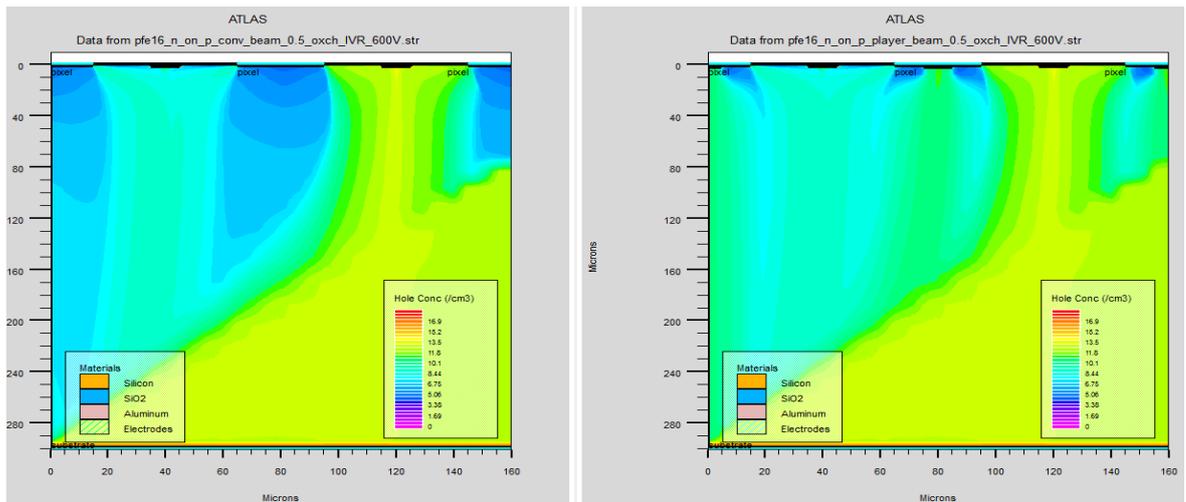


Figure 3.25. Zoom d'un cutline à $x=80\ \mu\text{m}$ pour les deux structures polarisées en inverse et sous une radiation d'une puissance $0,5\ \text{W}/\text{cm}^2$ montre la variation du champ électrique.

b Concentration des trous

Le **figure 3.26** et **3.27** présentent l'évolution de la concentration des trous dans des structures polarisées en inverse avec 600V et sous une radiation d'une puissance de $0,5\ \text{W}/\text{cm}^2$. Pour un cutline à $x=80\ \mu\text{m}$, nous remarquons que la concentration des trous est très grande dans la région n+/p+ de la structure p-layer que dans la région n+/p de la structure conventionnelle.



(a)

(b)

Figure 3.26. Zoom de la variation de la concentration des trous dans les deux structures sous une radiation pour une ligne de découpe verticale (cutline) en $x=80\ \mu\text{m}$. Structure (a) conventionnelle et (b) p-layer.

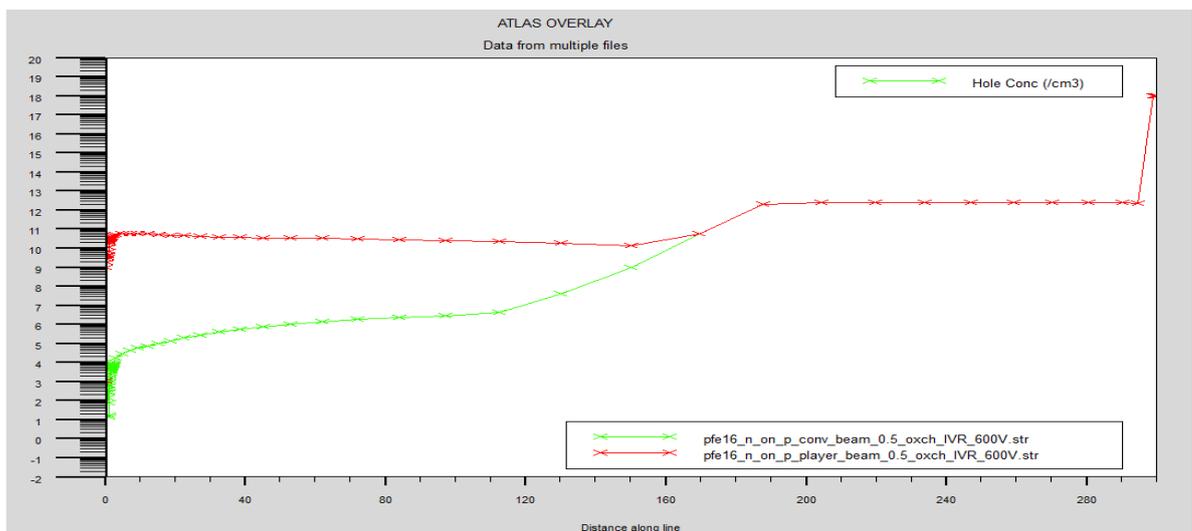


Figure 3.27. Zoom d'un cutline à $x=80\ \mu\text{m}$ pour les deux structures polarisées en inverse, sous une radiation d'une puissance $0,5\ \text{W}/\text{cm}^2$ montre la variation de la concentration des trous.

3.6.2 Puissance de $1,5\ \text{W}/\text{cm}^2$

a Champ électrique

La **figure 3.28** et **3.29** présentent l'évolution du champ électrique dans des structures n-in-p polarisée en inverse avec 600V et sous une radiation d'une puissance de $1,5\ \text{W}/\text{cm}^2$. Pour un cutline à $x=80$, nous remarquons que le champ électrique est

très grand dans la région n+/p+ de la structure p-layer que dans la région n+/p de la structure conventionnelle.

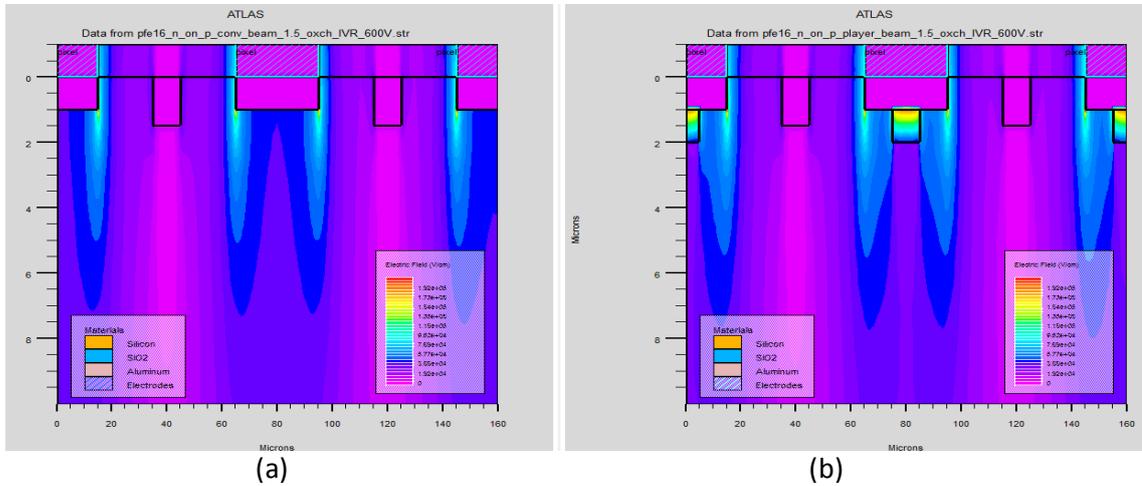


Figure 3.28. Zoom de la variation du champ électrique dans les deux structures sous une radiation pour une ligne de découpe verticale (cutline) en $x=80\ \mu\text{m}$. Structure (a) conventionnelle et (b) p-layer.

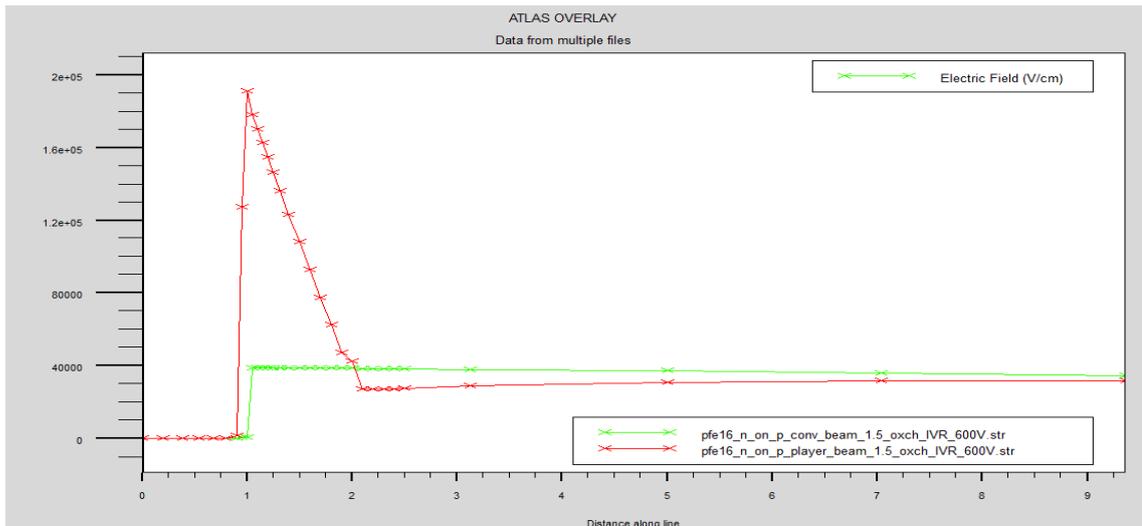


Figure 3.29. Zoom d'un cutline à $x=80\ \mu\text{m}$ pour les deux structures polarisées en inverse et sous une radiation d'une puissance $1,5\ \text{W}/\text{cm}^2$ montre la variation du champ électrique.

b Concentration des trous

La **figure 3.30** et **3.31** présentent l'évolution de la concentration des trous dans des structures n-in-p polarisée en inverse avec 600V et sous une radiation d'une puissance de $1,5\ \text{W}/\text{cm}^2$. Pour un cutline à $x=80$, nous remarquons que le champ électrique est très grand dans la région n+/p+ de la structure p-layer que dans la région n+/p de la structure conventionnelle.

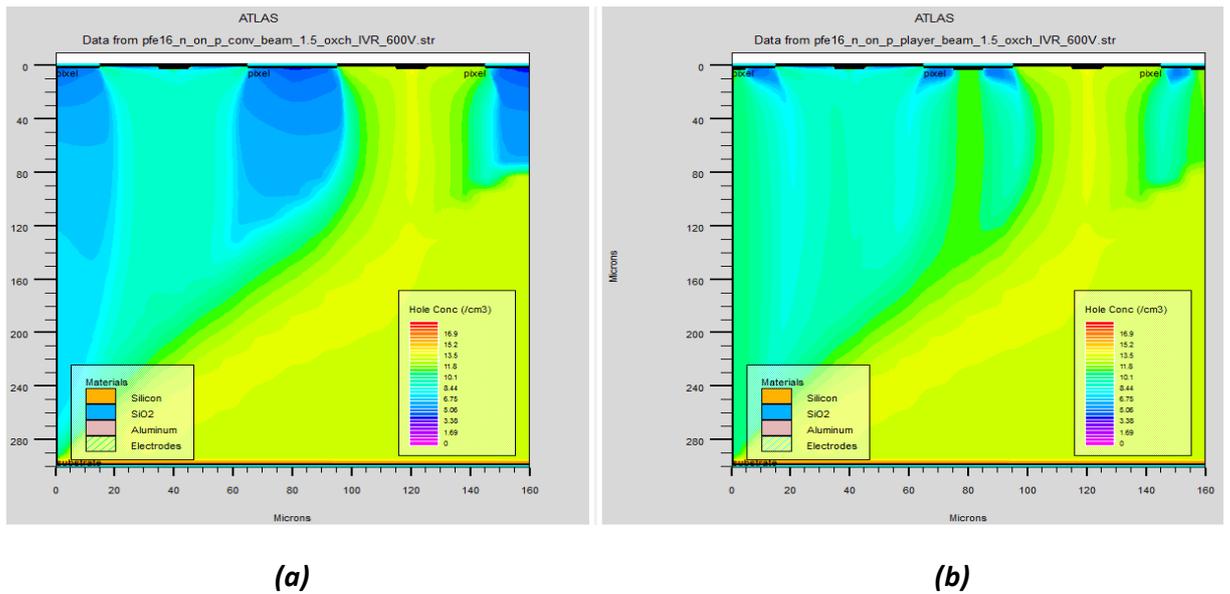


Figure 3.30. Zoom de la variation la concentration des trous dans les deux structures sous une radiation pour une ligne de découpe verticale (cutline) en $x=80\ \mu\text{m}$. Structure (a) conventionnelle et (b) p-layer.

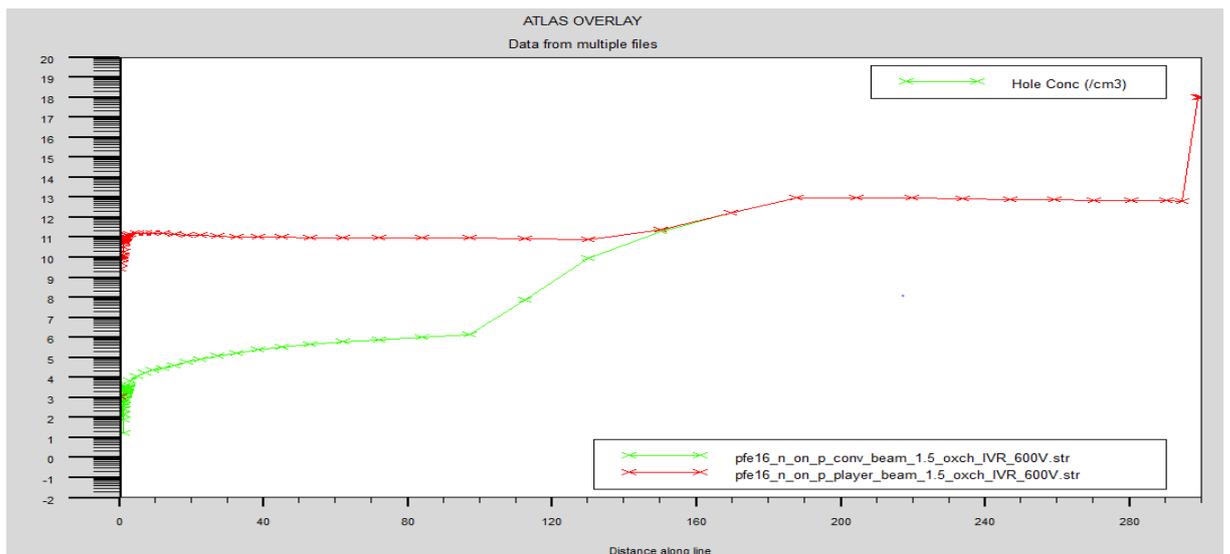


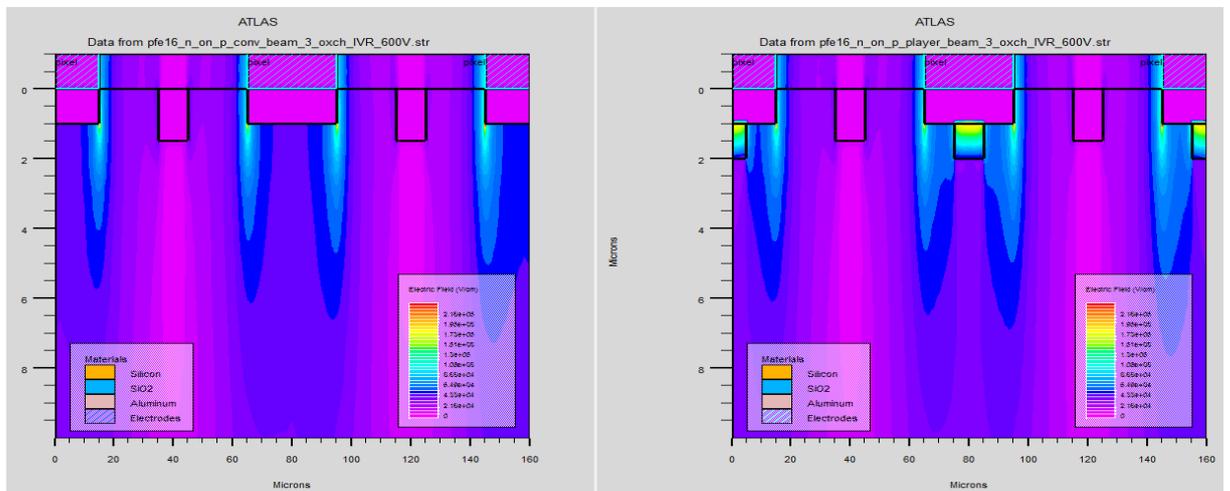
Figure 3.31. Zoom d'un cutline à $x=80\ \mu\text{m}$ pour les deux structures polarisées en inverse, sous une radiation d'une puissance $1,5\ \text{W}/\text{cm}^2$ montre la variation de la concentration des trous.

3.6.3 Puissance de $3\ \text{W}/\text{cm}^2$

a Champ électrique

La **figure 3.32** et **3.33** présentent l'évolution du champ électrique dans une structures polarisées en inverse avec 600V et sous une radiation d'une puissance de $3\ \text{W}/\text{cm}^2$, pour un cutline a $x=80$, nous remarquons que le champ électrique est très

grand dans la région n+/p+ de la structure p-layer que dans la région n+/p de la structure conventionnelle.



(a)

(b)

Figure 3.32. Zoom de la variation du champ électrique dans les deux structures sous une radiation pour une ligne de découpe verticale (cutline) en $x=80\ \mu\text{m}$. Structure (a) conventionnelle et (b) p-layer.

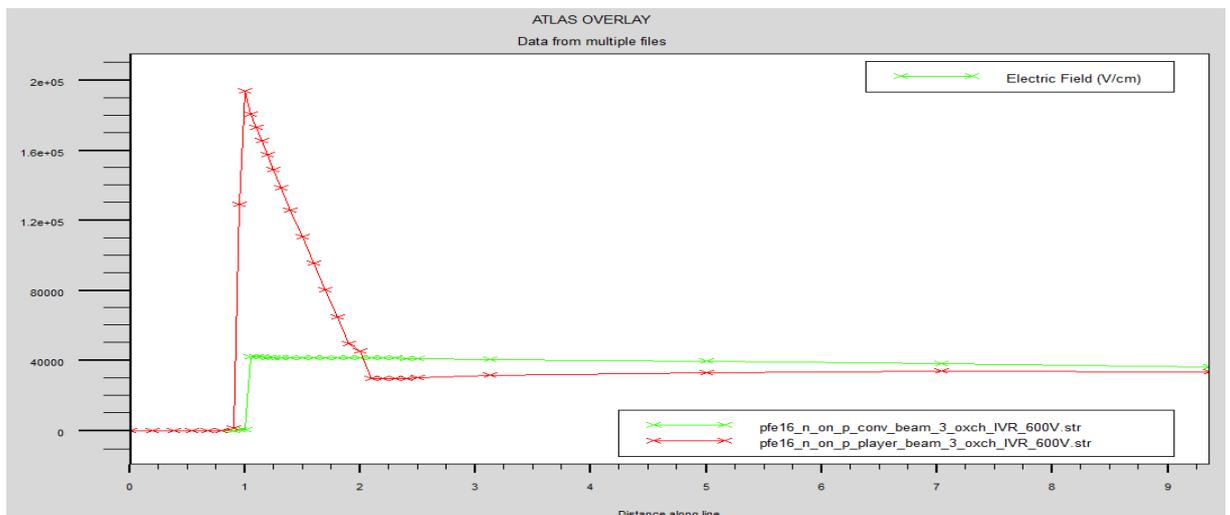


Figure 3.33. Zoom d'un cutline à $x=80\ \mu\text{m}$ pour les deux structures polarisées en inverse et sous une radiation d'une puissance $3\ \text{W}/\text{cm}^2$ montre la variation de champ électrique.

b Concentration des trous

La **figure 3.34** et **3.35** présentent l'évolution de la concentration des trous dans une structures polarisées en inverse avec 600V et sous une radiation d'une puissance de $3\ \text{W}/\text{cm}^2$, pour un cutline a $x=80$, nous remarquons que le champ électrique est très

grand dans la région n+/p+ de la structure p-layer que dans la région n+/p de la structure conventionnelle.

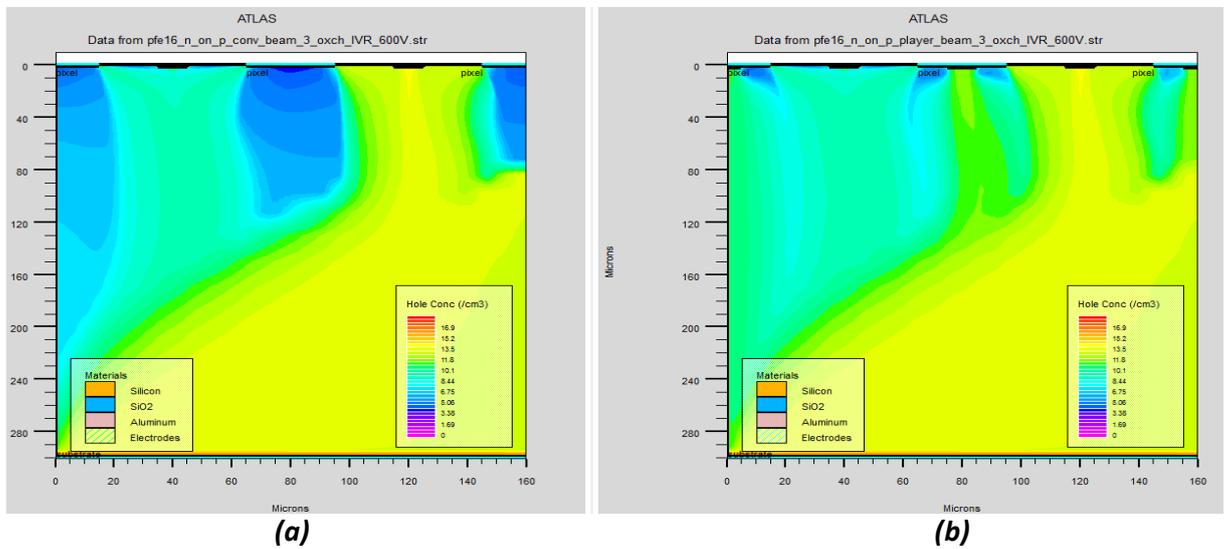


Figure 3.34. Zoom de la variation de la concentration des trous dans les deux structures sous une radiation pour une ligne de découpe verticale (cutline) en $x=80\ \mu\text{m}$. Structure (a) conventionnelle et (b) p-layer.

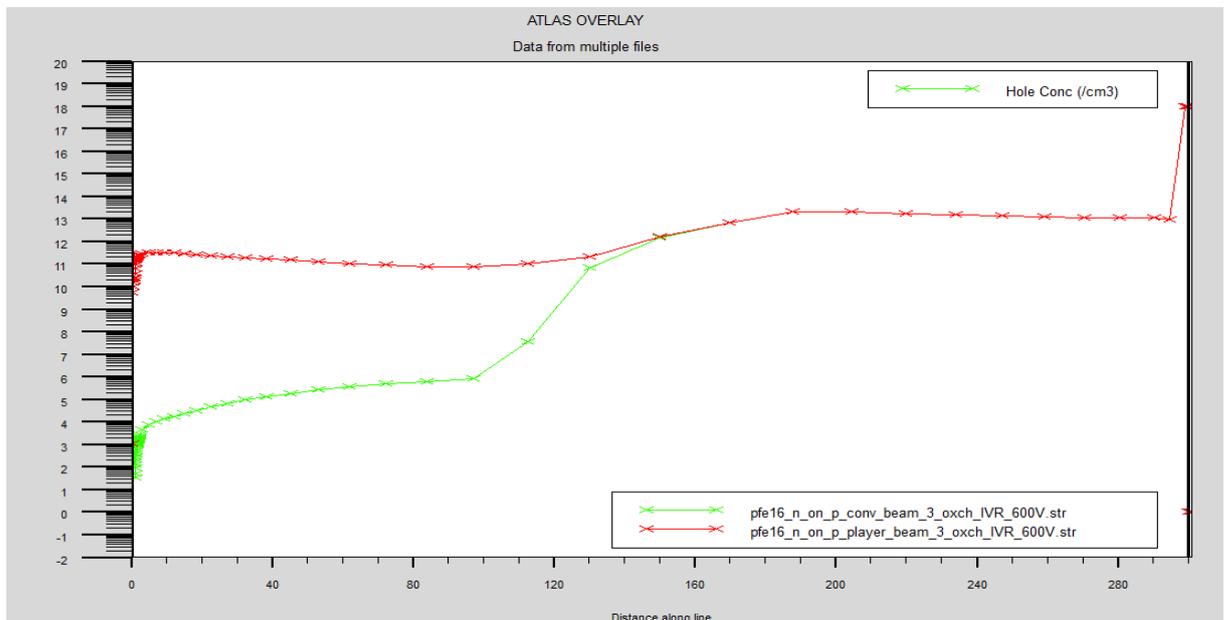


Figure 3.35. Zoom d'un cutline à $x=80\ \mu\text{m}$ pour les deux structures polarisées en inverse, sous une radiation d'une puissance $3\ \text{W}/\text{cm}^2$ montrent la variation de la concentration des trous.

3.7 Influence de la puissance de la radiation sur la caractéristique courant –tension

La **figure (3.36)** présente les différentes caractéristiques courant-tension pour différentes radiation sur la structure conventionnelle, qui sont: 0,5 W, 1,5 W et 3W .Ces caractéristiques I/V montrent clairement que la tension de claquage augmente avec l'augmentation de la radiation. En ce qui concerne le courant de fuite, ce dernier augmente aussi.

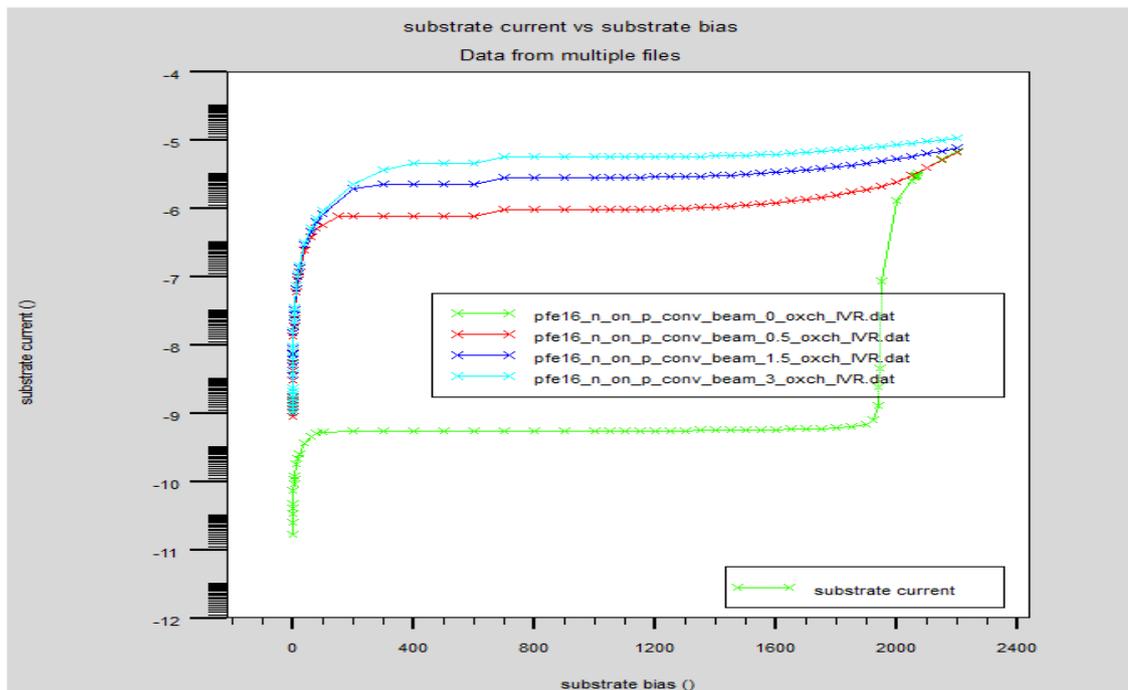


Figure 3.36. Caractéristiques courant-tension pour différentes valeurs de radiation.

3.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait une étude comparative entre deux dispositifs à semi-conducteur dédiés à la détection des particules issues d'une radiation ionisante. Cette comparaison a été effectuée à l'aide de l'outil de simulation ATLAS du logiciel SILVACO. A travers cette simulation nous avons déterminé les performances électriques pour les deux dispositifs qui sont représentées par deux structures de type diode (n-p) nommées n-in-p conventionnelle et n-in-p p-layer.

Dans cette étude, nous avons étudié des performances électriques importantes du dispositif semi-conducteur qui sont : le potentiel électrique, le champ électrique, la concentration des trous et la tension de claquage.

Nous avons étudié ces paramètres sans radiation et avec radiation tout en modifiant l'angle d'incidence.

Les résultats obtenus à travers cette étude montrent que la structure p-layer est plus performante que la conventionnelle car la génération des paires électron-trou et la collection des charges électriques au niveau du pixel est plus importante.

Conclusion générale

Dans ce travail, nous avons discuté les différents phénomènes et mécanismes de la détection dans le cas d'un détecteur de la structure n-in-p et nous avons remarqué qu'ils interviennent dans la modification des courbes courant-tension. La connaissance et la maîtrise de ces phénomènes conduit évidemment à une possibilité d'améliorer de plus en plus le comportement de ces structures et par conséquent à leur parfaite utilisation dans les applications industrielles.

L'un des outils d'étude de ces composants est la simulation de leurs caractéristiques électriques par des logiciels technologiques puissants qui représente le sujet de notre travail. Parmi ces logiciels de simulation, le simulateur TCAD développé par le groupe SILVACO est un simulateur de modélisation des composants capable de prédire les caractéristiques électriques de la plupart des composants semi-conducteurs en régime continu, transitoire ou fréquentiel. En plus il fournit des informations sur la distribution interne de variables telles que les concentrations des porteurs, le champ électrique ou le potentiel, etc.

La simulation des caractéristiques électriques en utilisant ce logiciel a permis de connaître l'influence de quelques paramètres sur l'évolution des caractéristiques électriques comme la radiation, l'angle d'incidence . Nous avons également simulés les caractéristiques électriques des structures n-in-p conventionnelle et n-in-p p-layer à différents puissances de la radiation.

En conclusion, le champ électrique de nouveau détecteur est plus important que celui du détecteur conventionnel, cela conduit à une séparation plus rapide des paires électron-trou générées, ce qui réduit le temps de collection.

Références bibliographiques

- [1] R. Negru, "Conception et modélisation de pixels de photodétection", thèse de doctorat, Ecole polytechnique X-Français, France, Juin 2008.
- [2] CERN : <https://www.home.cern/fr/about>.
- [3] B. Chantepie, "Étude et réalisation d'une électronique rapide à bas bruit pour un détecteur de rayons X à pixels hybrides destiné à l'imagerie du petit animal", thèse de doctorat, Université de la méditerranée aix-Marseille II, France, Décembre 2008.
- [4] K. Zeghdar "Simulation des caractéristiques courant-tension à base d'une diode Schottky en Phosphure d'indium InP", Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider de Biskra, Juin 2014.
- [5] "ATLAS User's manual", Silvaco International inc, Device Simulation Software, December 2006.
- [6] LHC : <https://www.home.cern/fr/topics/large-hadron-collider>.
- [7] Experience ATLAS: <https://home.cern/fr/about/experiments/atlas>.