



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur
Et de la Recherche Scientifique
Université de Tissemsilt



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département des Sciences et de la Technologie

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme

De Master académique en

Filière : Électroniques

Spécialité : Instrumentation

Présentée par : **Araba Djalila**

Thème

Simulation et optimisation d'une cellule solaire PIN

Soutenu le, 29/06/2026

Devant les membres du jury

Nehal Mohamed El Fateh	Président	M.C.B	Univ-Tissemsilt
Ahmed Sahnoune	Examineur	M.C.B	Univ-Tissemsilt
Hamri Yazid Zakaria	Encadrant	M.C.B	Univ-Tissemsilt
Belkassa Missoum	Co-Encadrant	M.A.A	Univ-Tissemsilt

Année universitaire : 2025-2026

Remerciement

Avant tout, Je remercie Dieu Le Tout-Puissant de m'avoir donné le courage, la force et la patience nécessaires pour accomplir ce modeste travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à mon encadrant, Monsieur Hamri Yazid Zakaria, pour son encadrement exemplaire, sa grande générosité scientifique et ses précieux conseils. Il a été pour moi un véritable modèle et comme un père par ses orientations bienveillantes, ses encouragements continus et son soutien paternel tout au long de ce parcours. Que Dieu le récompense grandement.

Mes remerciements les plus chaleureux s'adressent également à mon Co-encadrant, Monsieur Belkassa Missoum, pour son aide précieuse, sa disponibilité et ses conseils judicieux qui m'ont grandement guidée et aidée à surmonter les difficultés durant la réalisation de ce projet.

Je saisis également cette occasion pour exprimer ma haute considération et mon profond respect aux membres du jury :

Monsieur Nehal Mohamed El Fateh et Monsieur Sahnoun Ahmed, pour avoir honoré ce travail en acceptant de l'évaluer et de l'examiner. Leurs remarques et suggestions seront d'une valeur inestimable pour enrichir ce mémoire.

Enfin, j'adresse mes vifs remerciements à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail.

Dédicace

À mon père, qui m'a appris à être généreux sans rien attendre en retour. Il a toujours été un soutien solide pour moi et un exemple de courage. Je demande à Dieu de lui accorder une longue vie et de le récompenser pour tout ce qu'il a fait.

À ma mère, qui est pour moi une source d'affection et de tranquillité. Elle a passé tant de nuits à veiller pour que je puisse réussir. Ses prières ont toujours été mon plus grand secret et m'ont guidé dans mes choix. Que Dieu la protège et lui garde une bonne santé.

Quand je les vois, j'oublie ma fatigue et je sens que leurs prières m'aident à avancer. Je suis vraiment fier d'être leur enfant. C'est pour cela que je leur dédie ce travail, qui est le résultat de mes efforts, en témoignage de mon amour et de ma reconnaissance.

Résumé

ملخص

في هذا العمل، قمنا بدراسة بهدف تحسين أداء خلية شمسية كهروضوئية من نوع NIP ذات بنية $\text{ZnO/Si:N/Si:I/Si:P}$ باستخدام برنامج المحاكاة WxAMPS-1D حددنا العوامل الأساسية التي تؤثر على الأداء وقمنا بتعديلها بشكل فردي. حافظنا على معاملات طبقة النافذة ZnO ثابتة، بينما قمنا بتغيير سُمك ونسبة التطعيم لكل من طبقة Si:N وطبقة Si:P وطبقة Si:I أظهرت النتائج أن إضافة الطبقة الجوهرية Si:I تحسن الأداء بشكل كبير. ارتفع المردود من 24.10% إلى 30.20% مع تحسن في الجهد وتيار الخلية. يعود هذا التحسن إلى توسيع منطقة الانحلال وتعزيز تجميع الحاملات. تعتبر هذه النتائج مهمة لتحسين كفاءة الخلايا الشمسية من نوع NIP باستخدام السيليكون البلوري والمحاكاة العددية.

الكلمات المفتاحية: خلية شمسية NIP ، سيليكون بلوري، المحاكاة العددية، WxAMPS-1D، تحسين الأداء، الطبقة الجوهرية، الكفاءة الكهروضوئية.

Résumé

Dans ce travail, nous avons étudié l'optimisation des performances d'une cellule photovoltaïque NIP de type $\text{ZnO/Si:N/Si:I/Si:P}$ à l'aide du logiciel de simulation WxAMPS-1D. nous avons identifié et ajusté individuellement les facteurs de performance clés. nous avons maintenu constants les paramètres de la couche fenêtre en ZnO tout en faisant varier l'épaisseur et le taux de dopage des couches Si:N , Si:P et Si:I . les résultats ont montré que l'ajout de la couche centrale Si:I améliorait significativement les performances. Le rendement est passé de 24,10 % à 30,20 %, avec des améliorations de la tension et du courant. Cette amélioration est attribuée à l'expansion de la zone de désintégration et à une agrégation accrue des porteurs de charge. ces résultats sont importants pour l'amélioration du rendement des cellules solaires de type NIP utilisant du silicium cristallin et la simulation numérique.

Mots-clés : cellule solaire NIP, silicium cristallin, simulation numérique, WxAMPS-1D, optimisation des performances, couche centrale, rendement photovoltaïque.

Abstract

In this work, we investigated the performance optimization of a ZnO/Si:N/Si:I/Si:P type NIP photovoltaic cell using the WxAMPS-1D simulation software. We identified and individually adjusted the key performance factors. we kept the ZnO window layer parameters constant while varying the thickness and doping ratio of the Si:N, Si:P, and Si:I layers. the results showed that adding the Si:I core layer significantly improved performance. the efficiency increased from 24.10% to 30.20%, with improvements in voltage and current. this improvement is attributed to the expansion of the decay zone and enhanced carrier aggregation. these findings are significant for improving the efficiency of NIP-type solar cells using crystalline silicon and numerical simulation.

Keywords: NIP solar cell, crystalline silicon, numerical simulation, WxAMPS-1D, performance optimization, core layer, photovoltaic efficiency.

Sommaire

Introduction générale

Chapitre I : Etat de l'art

I.1 Introduction	1
I.2 L'énergie photovoltaïque	2
I.3 Le rayonnement solaire	3
I.3.1 Nature et Origine du Rayonnement.....	3
I.3.2 La Constante Solaire et l'Atmosphère	4
I.3.3 Les Composantes du Rayonnement au Sol	4
I.3.4 Bilan Énergétique	5
I.4 L'Effet Photovoltaïque.....	5
I.4.1 Principes et Mécanismes de Conversion	5
I.5 Création du Champ Électrique Interne	7
I.6 Comportement des Porteurs de Charge.....	8
I.6.1 Dans les régions neutres (N et P)	8
I.6.2 Dans la zone de charge d'espace	8
I.7 Le Courant Photoélectrique J Total	8
I.8 Les avantages & inconvénients de l'Énergie Photovoltaïque	8
I.8.1 Les Avantages	9
I.8.2 Les Inconvénients et Défis Majeurs	9
I.9 Conclusion	10

Chapitre II : Technologies photovoltaïques

II.1 Introduction	12
II.2 Les Technologies des Cellules Photovoltaïques.....	12
II.2.1 Première Génération : Le Silicium Cristallin.....	13
II.2.2 Deuxième Génération : Les Couches Minces	13
II.2.3 Troisième Génération : Technologies Avancées et Organiques	14
II.3 Les filières technologiques	14
II.3.1 La filière silicium (Si).....	15
II.4 Les technologies à couches minces (thin film).....	15

II.4.1 Le silicium amorphe (a -Si)	16
II.5 Les composés de type CdTe, et CIGS	16
II.5.1 Les cellules organiques et plastiques	16
II.6 Architecture détaillée d'une cellule photovoltaïque standard	17
II.6.1 Les contacts métalliques	17
II.6.2 La couche antireflet (ARC).....	18
II.6.3 La couche fenêtre (Window Layer)	18
II.6.4 L'émetteur et la base couche tampon (jonction p-n)	19
II.7 L'optimisation avancée des cellules photovoltaïques	20
II.7.1 Le BSF (Back Surface Field) : le miroir électronique	21
II.7.2 La texturisation : dompter la lumière par la géométrie	21
II.7.3 Synergie avec les couches antireflets et la passivation	22
II.8 Conclusion	23

Chapitre III : Logiciel de simulation

III.1 Introduction	24
III.2 Modélisation et la méthodologie de conception de la cellule photovoltaïque	24
III.3 WxAMPS-1D	27
III.3.1 Méthodologie de conception.....	28
III.3.2 Analyse des résultats de simulation	28
III.3.3 Indicateurs de performance.....	29
III.4 Avantage du WxAMPS-1D.....	29
III.5 Comment réaliser une simulation du logiciel WxAMPS-1D	31
III.6 Les paramètres d'entrées	31
III.6.1 Paramètres ambiants et de contact (fenêtre « Ambient »)	31
III.7 Propriétés des matériaux (fenêtres Electrical et Defect)	33
III.7.1 Paramètres électriques de base	33
III.7.2 Modélisation des défauts	33
III.7.3 Paramètres optiques (fenêtre « Optical »)	34
III.8 Paramètres de sortie.....	35
III.8.1 Caractéristique I(V)	35
III.8.2 Réponse spectrale	36
III.9 Conclusion.....	37

Chapitre IV : Résultat et discussion

IV.1 Introduction.....	38
IV.2 Structure de la cellule solaire photovoltaïque en silicium	38
IV.2.1 Le substrat	39
IV.2.2 Le contact arrière.....	39
IV.2.3 La couche absorbeur Si : P	40
IV.2.4 Couche tampon en Si : N.....	40
IV.2.5 Contact avant d'Oxyde de Zinc (ZnO).....	40
IV.3 Résultats et discussions.....	41
IV.3.1 Simulation d'une cellule en silicium standard	43
IV.4 Simulation d'une cellule en silicium NIP	43
IV.4.1 L'effet de l'épaisseur du Si : N	44
IV.4.2 L'étude de l'effet du dopage du Si : N.....	46
IV.4.3 L'étude de l'effet du l'épaisseur du Si : P	48
IV.4.4.L'étude de l'effet du dopage du Si : P.....	50
IV.4.5 L'étude de l'effet du l'épaisseur de la couche Intrinsèque	52
IV.5 Conclusion	54

Conclusion générale.

Références et bibliographies.

Liste Des Figures

Chapitre I : Etat de l'art

Figure I.1 : des énergies renouvelables.....	1
Figure I.2 : principe de L'énergie photovoltaïque.....	3
Figure I.3 : Spectre du rayonnement solaire.....	4
Figure I.4 : rayonnement solaire transmis à la terre.	5
Figure I.5 : l'effet Photovoltaïque.	7

Chapitre II : Technologies photovoltaïques

Figure II.1 : types des cellules solaires.....	12
Figure II.2 : Matériaux solides cristallisés Monocristallin et Polycristallin.....	13
Figure II.3 : Couches minces avancées.....	16
Figure II.4 : Cellule de silicium amorphe	15
Figure II.5 : Structure d'une cellule solaire.....	17
Figure II.6 : Illustration de contacts métalliques.	18
Figure II.7 : Les différentes couches utilisées dans la fabrication de cellules solaires à couches minces en configuration substrat (a) et de superstrat (b).....	20
Figure II.8 : Champ de surface arrière(BSF).....	21
Figure II.9 : Schéma de principe des réflexions lumineuses sur une surface texturée.	22

Chapitre III : Logiciel de simulation

Figure III.1 : Fenêtre de présentation du logiciel WxAMPS-1D.....	28
Figure III.2 : Présentation des indicateurs de performance du WxAMPS-1D.....	29
Figure III.3 : Modélisation des conditions ambiantes dans WxAMPS-1D.....	32
Figure III.4 : Insertion des paramètres électriques dans WxAMPS-1D.....	33
Figure III.5 : La fenêtre d'insertion des paramètres optiques.....	34
Figure III.6 : présentation des parametres d'illumination et de polarisation du WxAMPS-1D.	35
Figure III.7 : Fenêtre de l'AMPS-1D propre à la réponse spectrale.....	36

Chapitre IV : Résultat et discussion

Figure IV.1 : Schéma simplifié d'une cellule solaire PV en couche mince, a) cas standard de ZnO/Si:N/Si:P, b) cas NIP ZnO/Si:N/Si:I /Si:P.....	39
Figure IV.2 : Influence de l'épaisseur de la couche tampon Si : N sur les caractéristiques de la cellule.	45
Figure IV.3 : Influence de la densité de dopage de la couche tampon Si:N sur les caractéristiques.	47
Figure IV.4 : Influence de l'épaisseur de la couche Si:P sur les caractéristiques de la cellule.	49
Figure IV.5 : Influence de la densité de dopage de la couche absorbante Si:P sur les caractéristiques de la cellule.....	51
Figure IV.6 : Influence de l'épaisseur de la couche intrinsèque Si:I sur les caractéristiques de la cellule.....	53

Liste de tableau

Chapitre III : Logiciel de simulation

Tableau III.1 : Comparatif des logiciels de simulation des cellules photovoltaïques 26

Tableau III.2 : Comparaison entre les deux programmes WxAMPS-1D et AMPS-1D[32].30

Chapitre IV : Résultat et discussion

Tableau IV.1 : Paramètres de la cellule solaire utilisés dans le logiciel WxAMPS-1D. 43

Tableau IV.2 : Les paramètres sortie obtenus pour une cellule standard ZnO/Si:N/Si:P.... 43

Tableau IV.3 : Les paramètres obtenus en fonction de la variation de la densité de dopage de la couche tampon Si:N..... 44

Tableau IV.4 : Les paramètres obtenus en fonction de la variation de la densité de dopage de la couche tampon Si:N..... 46

Tableau IV.5 : Influence de l'épaisseur de la couche absorbante Si:P sur les caractéristiques de la cellule..... 48

Tableau IV.6 : Influence de l'épaisseur de la couche intrinsèque Si:I sur les caractéristiques de la cellule..... 52

Liste des symboles

N_C	Densité effective d'états des électrons dans la bande de conduction	$1/\text{cm}^3$
N_V	Densité effective d'états des trous dans la bande de valence	$1/\text{cm}^3$
E_g	Gap d'énergie interdite d'un matériau	eV
N_d	Concentration des atomes donneurs	cm^3
N_a	Concentration des atomes accepteurs	cm^3
T	Température absolue	K
λ	Longueur d'onde	μm
I	Courant de la cellule	A
I_0	Courant de saturation	A
I_{cc}	Courant de court-circuit	A
J_{cc}	Densité du courant de court-circuit	mA/cm^2
J_{ph}	Photo-courant	mA/cm^2
V_{co}	Tension en circuit ouvert	V
FF	Facteur de forme	%
Q	Rendement de conversion	%
P_{max}	Puissance maximum	mW/cm^2
α	Coefficient d'absorption	$1/\text{cm}$
R	Coefficient de réflexion	%
c	Vitesse de la lumière	m/s
E	Energie du photon	eV
ρ	Résistivité	$\Omega \cdot \text{cm}$
R_s	Résistance série	Ω
R_{sh}	Résistance parallèle	Ω
q	Charge élémentaire d'électrons	C
χ_e	Affinité électronique	eV

$\mu_n ,$ μ_p	Mobilité des électrons, trous	cm^2/V s
----------------------	-------------------------------	-----------------------------

Liste des abréviations

AM : Air Mass.

AM0 : Spectre solaire hors atmosphère.

AM1.5G : Spectre solaire terrestre (globale).

Z.C.E : Zone décharge d'espace.

CBD : Dépôt par bain chimique (Chemical Bath déposition).

MEB : Microscope Electronique à Balayage (SEM : Scanning Electron Microscopie).

TCO : oxyde conducteur transparent.

ZnO : oxyde de zinc.

Si:N : Silicium dopé N.

Si:P : Silicium dopé P.

Si:I : Silicium intrinsèque.

WxAMPS-1D : Analyse des Microelectronics et structure photonique.

PV : Photovoltaïque.

Introduction générale :

Au 21^{ème} siècle, le défi majeur de la transition énergétique est le développement et l'exploitation des énergies renouvelables. L'énergie renouvelable est l'option principale pour bâtir des économies à faible intensité de carbone. L'énergie solaire se distingue par son caractère propre, abondant et inépuisable. Elle fait face à la croissance continue de la demande énergétique mondiale et aux enjeux environnementaux liés à l'utilisation massive des combustibles fossiles. la conversion photovoltaïque est au cœur de cette dynamique. Elle permet de transformer directement l'énergie lumineuse en électricité. Cette transformation s'effectue grâce à l'interaction entre les photons et les électrons d'un matériau semi-conducteur. Ce matériau est généralement structuré en jonction PN. Parmi les architectures avancées, la structure NIP suscite un grand intérêt en ingénierie photovoltaïque. Elle est constituée d'un empilement de trois couches : dopée N, intrinsèque I, et dopée P. l'insertion de la couche intrinsèque élargit la zone de charge d'espace, réduit les taux de recombinaison et améliore la collecte des porteurs de charge photogénérés. L'objectif principal de ce travail de fin d'études est d'explorer en détail et d'optimiser les performances d'une cellule photovoltaïque NIP de type ZnO/Si:N/Si:I/Si:P. pour ce faire, nous avons utilisé l'outil de simulation numérique WxAMPS-1D. cette analyse nous a donné l'opportunité d'examiner les répercussions de la fluctuation des paramètres géométriques et physiques sur les caractéristiques électriques de sortie. Ces caractéristiques électriques de sortie comprennent notamment la tension en circuit ouvert, la densité de courant de court-circuit, le facteur de forme et le rendement de conversion global. Les paramètres géométriques et physiques incluent l'épaisseur et le taux de dopage des diverses couches. Notre étude est divisée en quatre chapitres principaux qui forment la base de notre mémoire.

Le premier chapitre se concentre sur l'état actuel de l'énergie photovoltaïque, le rayonnement solaire et les mécanismes physiques de l'effet photovoltaïque.

Le deuxième chapitre examine les différentes générations de technologies photovoltaïques et décrit en détail l'architecture d'une cellule standard.

Le troisième chapitre présente le logiciel de simulation utilisé, WxAMPS-1D, en expliquant sa conception et ses paramètres d'entrée.

Le quatrième chapitre contient l'ensemble de nos résultats de simulation et de nos discussions sur l'optimisation de la cellule standard et de la cellule NIP.

Chapitre I : État de l'art

I.1 Introduction

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables représentent aujourd'hui le défi majeur de la transition énergétique du XXI^{ème} siècle, s'affirmant comme l'option principale pour bâtir des économies à faible intensité de carbone. Contrairement aux combustibles fossiles et nucléaires, qui constituent des réserves limitées et polluantes, une source d'énergie est dite renouvelable lorsque sa consommation ne limite pas son utilisation future, car elle est naturellement reconstituée à une échelle de temps compatible avec l'histoire de l'humanité. Ces "énergies de flux", telles que le solaire, l'éolien, l'hydraulique, la géothermie et la biomasse, offrent une alternative inépuisable et non polluante permettant de lutter contre les impacts environnementaux graves comme l'effet de serre et les pluies acides. En plus de respecter l'environnement, ces sources permettent une production d'électricité décentralisée, mise en œuvre directement sur les lieux de consommation pour garantir une meilleure sécurité d'approvisionnement. Toutefois, leur caractère aléatoire et intermittent impose des transformations technologiques radicales et le recours au génie électrique de pointe pour optimiser le dimensionnement et l'exploitation des systèmes de récupération d'énergie. Ainsi, l'alignement des innovations techniques et des politiques énergétiques est indispensable pour lever les obstacles à cette croissance et assurer, d'ici 20 à 30 ans, un système énergétique durable basé sur le remplacement des ressources traditionnelles par ces énergies de remplacement [1].



Figure I.1: des énergies renouvelables[2].

Face à la croissance continue de la demande énergétique mondiale et aux enjeux environnementaux majeurs liés à l'utilisation massive des énergies fossiles comme le charbon, le pétrole et le gaz naturel depuis la révolution industrielle, le développement de sources d'énergie renouvelables est devenu une priorité absolue. Parmi ces alternatives, l'énergie solaire se distingue par son caractère propre, abondant et inépuisable, offrant un fort potentiel pour une transition énergétique durable. Le processus au cœur de cette technologie est la conversion photovoltaïque, qui permet de transformer directement l'énergie lumineuse en électricité grâce au transfert de l'énergie des photons aux électrons d'un matériau semi-conducteur. ce mécanisme physique complexe s'opère au sein d'une cellule solaire (jonction PN) à travers quatre étapes fondamentales : l'absorption des photons dont l'énergie est supérieure à la largeur de la bande interdite ($h \cdot \sigma > Eg$), la génération de paires de porteurs de charge (électron et trou), leur migration par diffusion, et enfin leur séparation induite par le champ électrique interne, créant ainsi une tension électrique aux bornes de la cellule[3].

L'objectif de ce travail est d'explorer en détail les fondements technologiques et les processus optoélectroniques impliqués, en analysant les caractéristiques courant-tension $I(V)$ et puissance-tension $P(V)$, ainsi que les paramètres de performance essentiels tels que le courant de court-circuit (I_{cc}), la tension en circuit ouvert (V_{co}), la puissance maximale et les rendements quantiques externe (EQE) et interne (IQE). Une attention particulière sera portée à l'optimisation des structures à base de silicium, notamment les cellules NIP, afin de mieux comprendre les facteurs influençant leur rendement et leur réponse spectrale dans le paysage énergétique.

I.2 L'énergie photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque est issu du terme « photovoltaïque » qui désigne le processus physique permettant de transformer directement l'énergie lumineuse du soleil en énergie électrique, plus précisément en courant continu utilisable pour alimenter des appareils ou recharger des batteries. Ce mécanisme repose sur l'interaction entre les photons et les électrons d'un matériau semi-conducteur, généralement structuré en jonction PN, où l'énergie solaire est convertie selon quatre étapes fondamentales : l'absorption des photons d'énergie $h\nu > E_g$, la génération de paires de porteurs de charge (électron et trou), leur migration par diffusion, et enfin leur séparation par un champ électrique interne qui génère une tension aux bornes de la cellule. La performance de cette conversion est évaluée par des paramètres de sortie précis tels que le courant de court-circuit (I_{cc}), la tension en circuit ouvert (V_{co}).

Chapitre I : État de l'art

La puissance maximale et les rendements quantiques. aujourd'hui, cette technologie ne cesse d'évoluer à travers l'étude de nouvelles structures[4].

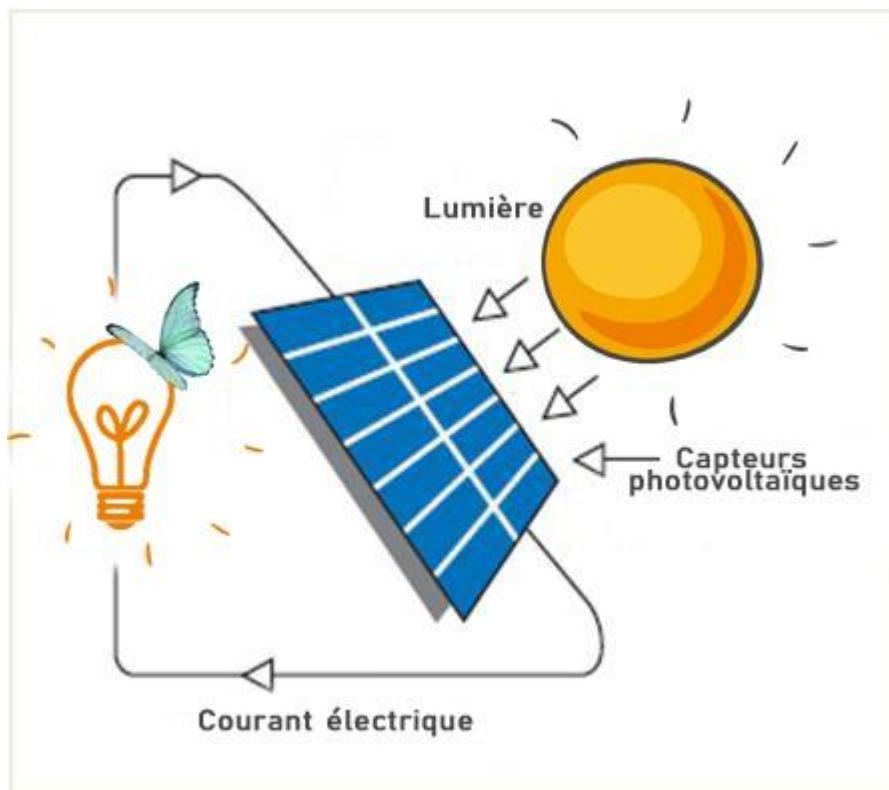


Figure I.2: principe de L'énergie photovoltaïque [5].

I.3 Le rayonnement solaire

I.3.1 Nature et Origine du Rayonnement

Le Soleil est un réacteur à **fusion nucléaire** (transformation de l'hydrogène en hélium) qui dégage une énergie immense depuis environ 5 milliards d'années. Cette énergie est émise sous forme d'**ondes électromagnétiques** voyageant à la vitesse de la lumière ($3 \cdot 10^8$ m/s).

Selon la physique quantique, ce rayonnement est un flux de particules appelées **photons**. L'énergie d'un photon est inversement proportionnelle à sa longueur d'onde λ , selon la formule

$$: E = h \cdot \sigma = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (I.1) \quad [6].$$

Le spectre solaire s'étend des ondes radio aux rayons gamma, mais l'essentiel de l'énergie se situe dans le **visible** (entre 0,4 et 0,75 μm) et le **proche infrarouge** (jusqu'à 4 μm)[7].

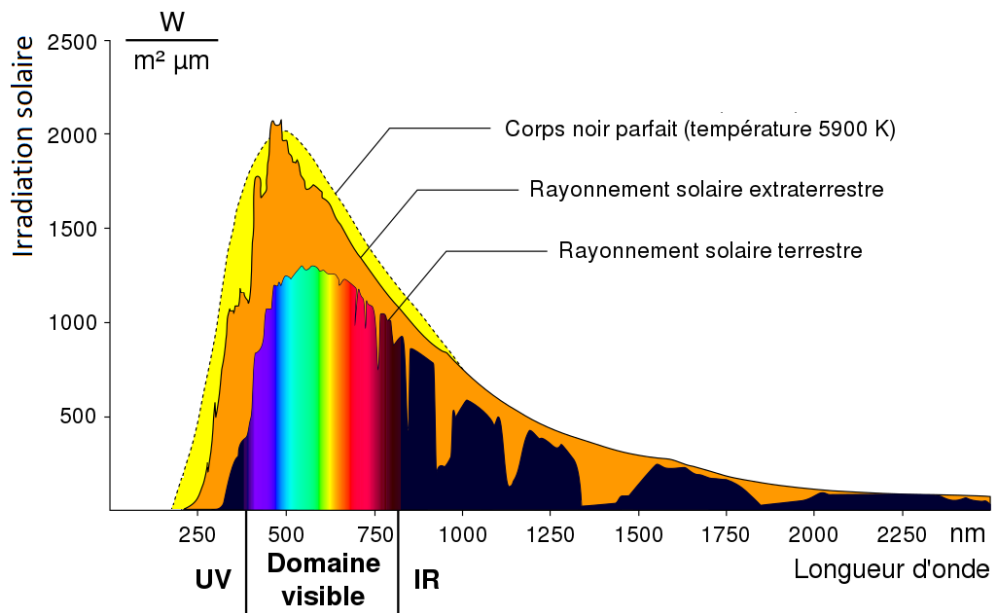


Figure I.3: Spectre du rayonnement solaire [8].

I.3.2 La Constante Solaire et l'Atmosphère

Avant d'entrer dans l'atmosphère, à une distance moyenne Terre-Soleil de 150 millions de km, la puissance reçue est appelée **constante solaire**, soit environ **1367 W/m²**.

Cependant, en traversant l'atmosphère, le rayonnement subit des perturbations (absorption et diffusion). L'épaisseur d'air traversée est caractérisée par la **Masse d'Air (AM)**[9] :

- **AM 1** : Le soleil est au zénith (trajet le plus court), l'énergie au sol est d'environ 1000 W/m²[10].
- **AM 1.5** : C'est le standard utilisé par les scientifiques (inclinaison de 45°). le trajet est 1,5 fois plus long que le trajet direct[10].

I.3.3 Les composantes du rayonnement au sol

Une fois au sol, le rayonnement se divise en trois types :

- **Le rayonnement direct** : Reçu directement du soleil sans changement de direction.
- **Le rayonnement diffus** : Provenant de toutes les directions du ciel après avoir été dispersé par les nuages et les particules.
- **L'albédo** : La fraction du rayonnement solaire global réfléchi par le sol.

Chapitre I : État de l'art

Le **rayonnement global** est la somme de ces trois composantes.

I.3.4 Bilan Énergétique

La ressource solaire est la plus abondante sur Terre : l'énergie reçue en **une seule heure** pourrait suffire à couvrir les besoins mondiaux pendant **un ans**.

Pourtant, tout n'est pas absorbé. sur un éclairement moyen de 340 W/m^2 à la limite de l'atmosphère[11] :

- Environ **100 W/m^2** sont réfléchis vers l'espace[12].
- Le reste est absorbé : **un tiers** par l'atmosphère et **deux tiers** par la surface terrestre.

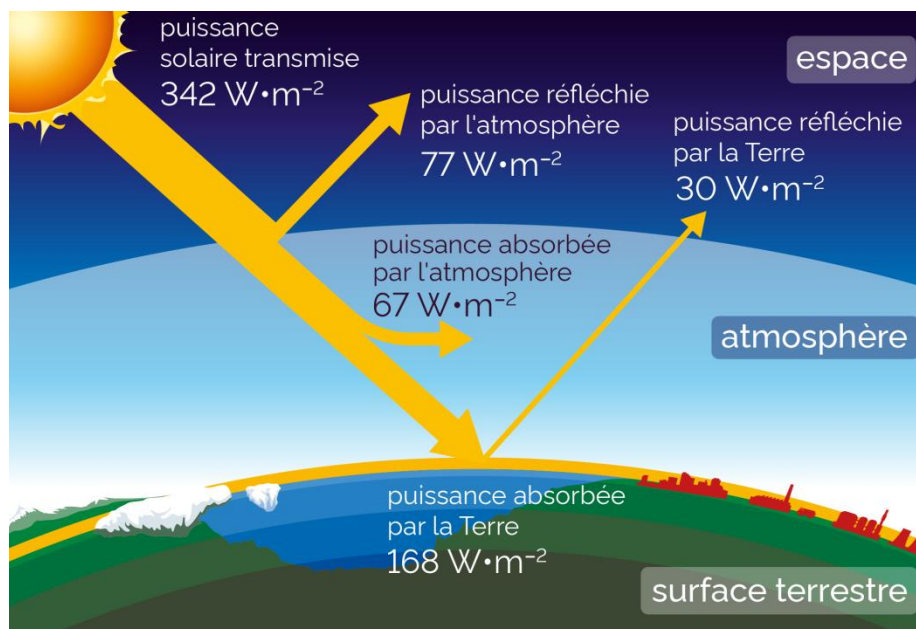


Figure I.4: rayonnement solaire transmis à la terre [13].

I.4 L'Effet Photovoltaïque

I.4.1 Principes et Mécanismes de Conversion

L'**effet photovoltaïque** est un phénomène physique découvert en **1839** par le physicien français **Edmond Becquerel**. il consiste en la transformation directe de l'énergie lumineuse issue du rayonnement solaire en **énergie électrique de type continu**, directement utilisable grâce à des cellules solaires. ce processus repose sur la capacité de certains matériaux à générer des charges électriques lorsqu'ils sont soumis à un flux de photons[14].

Chapitre I : État de l'art

➤ **Le rôle crucial des semi-conducteurs** : La conversion photovoltaïque nécessite l'utilisation de matériaux **semi-conducteurs**, car ils possèdent une structure de bandes spécifique : une **bande de valence** (où se trouvent les électrons liés) et une **bande de conduction** (où les électrons peuvent circuler). ces deux bandes sont séparées par une **bande interdite**, appelée **gap** [15].

- L'interaction commence par l'**absorption des photons** par le matériau.
- Cette absorption n'est possible que si l'énergie du photon est supérieure ou égale à l'énergie du gap ($E_{\text{photon}} > E_g$).
- Lorsqu'un photon est absorbé, un **électron de valence** est excité et passe dans la bande de conduction, laissant derrière lui un « **trou** » (charge positive) dans la bande de valence.
- **La structure de la cellule et la séparation des charges** : Pour transformer cette excitation en courant électrique, la cellule est généralement constituée d'une **jonction PN**, formée par le contact entre un semi-conducteur de type N et un de type P[16].
- Cette jonction crée un **champ électrique interne** permanent.
- Ce champ agit comme un trieur : il pousse les électrons libres vers la zone N et les trous vers la zone P.
- Dans la zone de charge d'espace (ZCE), les paires créées sont immédiatement dissociées par ce champ, générant un **photo-courant de génération**.

➤ **Étapes fondamentales de la transformation** : Selon la littérature, le passage du rayonnement à l'électricité se résume en trois mécanismes essentiels :

- **Absorption des photons** dont l'énergie est suffisante pour franchir le gap du matériau.
- **Création de porteurs de charges** (paires électron/trou) au sein du semi-conducteur.
- **Collecte des particules générées** grâce au champ électrique de la jonction, permettant au courant de circuler vers un circuit extérieur via des électrodes.

Exemple du Silicium : Le silicium, matériau de base de l'industrie, possède un **gap indirect** de 1,12 eV à 300 K. Pour ce type de matériau, l'absorption d'un photon nécessite parfois

l'intervention d'un **phonon** (vibration du réseau) pour permettre la transition électronique, ce qui influence l'efficacité de l'absorption selon la longueur d'onde[17].

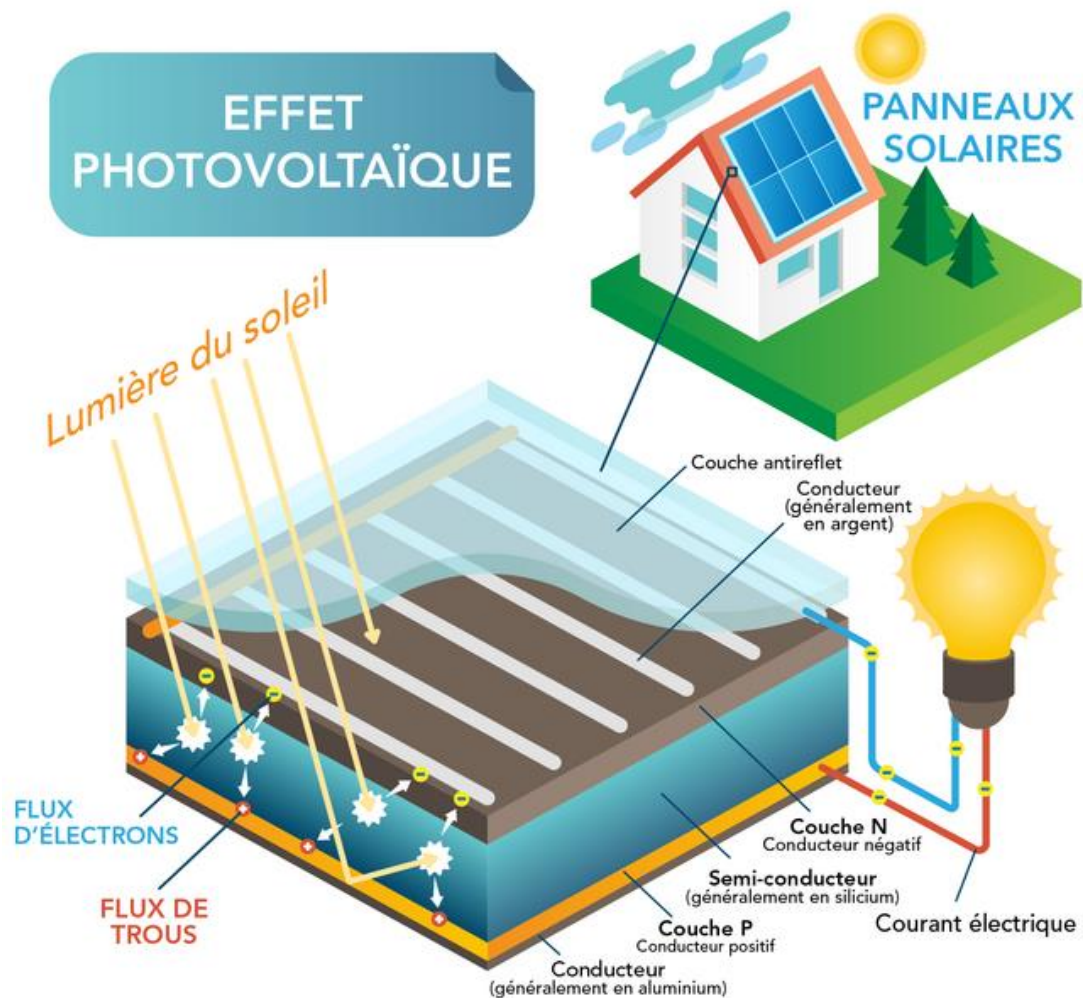


Figure I.5: l'effet Photovoltaïque [18].

I.5 Création du Champ Électrique Interne

Pour extraire efficacement ces charges, l'existence d'un **champ électrique interne** est indispensable afin de dissocier les paires électron-trou. Cette barrière de potentiel peut être créée par différentes structures :

- **Homojonction** : Une jonction PN utilisant le même semi-conducteur.
- **Hétérojonction** : Une jonction PN composée de deux semi-conducteurs différents.
- **Jonction Schottky** : Un contact entre un métal et un semi-conducteur.

I.6 Comportement des Porteurs de Charge

Lorsque les photons incidents créent des porteurs de charge, leur comportement diffère selon la zone où ils apparaissent :

I.6.1 Dans les régions neutres (N et P)

Les porteurs minoritaires qui atteignent la **zone de charge d'espace** par diffusion sont propulsés par le champ électrique vers la région où ils deviennent majoritaires :

- Les **trous** migrent vers la région P.
- Les **électrons** se déplacent vers la région N.

Ce mouvement engendre ce que l'on appelle un **photo-courant de diffusion**.

I.6.2 Dans la zone de charge d'espace

Les paires électron-trou créées directement dans cette zone sont immédiatement dissociées par le champ électrique : les électrons sont dirigés vers la région N et les trous vers la région P. ce processus génère un **photo-courant de génération**[19].

I.7 Le Courant Photoélectrique J Total

Le résultat final de ces deux contributions (diffusion et génération) donne naissance au **photo-courant (I_{ph})**. ce courant est proportionnel à l'intensité de la lumière incidente: plus l'éclairement est fort, plus la création de porteurs minoritaires est importante, augmentant ainsi le courant total produit par la cellule[20].

I.8 Les avantages & inconvénients de l'Énergie Photovoltaïque

Bien que l'énergie solaire s'impose comme une solution incontournable pour la transition énergétique, son déploiement massif se heurte à plusieurs défis de nature économique, technique et environnementale, dans cette partie nous allons présenter les avantages ainsi que les inconvénients de cette technologie.

Chapitre I : État de l'art

I.8.1 Les Avantages

La photovoltaïque présente des atouts indéniables qui justifient son attractivité croissante.

- **Énergie propre et durable** : C'est une ressource gratuite, non toxique et largement répartie sur la surface de la Terre.
- **Fiabilité et Autonomie** : Les systèmes sont extrêmement fiables, silencieux et nécessitent peu d'entretien car ils ne possèdent pas de pièces mobiles.
- **Flexibilité** : La production peut être décentralisée (directement chez l'utilisateur) et s'adapter à divers besoins, du milliwatt au mégawatt.
- **Résistance** : Les matériaux utilisés (verre, aluminium) sont conçus pour durer plus de 20 à 25 ans et résister aux intempéries comme la grêle[21].

I.8.2 Les inconvénients et défis majeurs

Malgré ses bénéfices, plusieurs obstacles freinent encore son exploitation optimale :

- **Coûts d'installation élevés** : le facteur économique reste le frein principal. l'investissement initial est lourd (environ 1000 euros par m² d'installation).pour les grandes productions, le système n'est pas toujours immédiatement rentable car il faut environ 3 ans pour que le panneau produise l'énergie nécessaire à sa propre fabrication[22].de plus, le coût augmente considérablement si l'installation nécessite des batteries de stockage.
- **Intermittence et dépendance aux conditions climatiques** : la production d'énergie dépend directement de l'ensoleillement, variabilité temporelle : la production s'arrête la nuit et diminue fortement par mauvais temps.
 - **Saisonnier** : en été, les jours sont longs et la production est maximale, mais les besoins énergétiques sont parfois plus faibles qu'en hiver, ce qui impose un stockage complexe et coûteux de l'énergie non utilisée.
- **Contraintes Spatiales et Géographiques** :
 - **Surfaces importantes** : le rendement de conversion étant encore faible, de très grandes superficies sont nécessaires pour installer les panneaux.

- **Emplacement stratégique** : les zones équatoriales sont les plus favorables, mais elles présentent des difficultés d'intégration (comme les forêts denses qu'il ne faut pas détruire) ou des contraintes paysagères[23].

- **Impact Écologique de la Fabrication** : Paradoxalement, la production des panneaux est un processus énergivore qui utilise des produits chimiques. de plus, le recyclage des composants ayant résisté plus de 20 ans aux intempéries constitue un défi environnemental complexe à la fin du cycle de vie du production[24].

I.9 Conclusion

En conclusion, ce chapitre a permis d'explorer les enjeux majeurs de la conversion photovoltaïque dans le cadre de la transition énergétique actuelle. À travers l'étude des différentes générations de cellules, nous avons mis en évidence la prédominance du silicium cristallin et l'émergence prometteuse des technologies en couches minces. l'analyse approfondie du fonctionnement physique[25], notamment la création de paires électron-trou et leur séparation par le champ électrique interne, a souligné l'importance cruciale des semi-conducteurs. La structure PIN, au cœur de notre étude, offre des perspectives d'optimisation significatives pour améliorer le rendement de conversion tout en réduisant les coûts de production. Cependant, des défis subsistent, tels que l'intermittence de la ressource solaire et les coûts d'installation qui freinent encore une rentabilité immédiate. Les simulations effectuées démontrent que l'ajustement précis des paramètres géométriques et physiques est la clé pour surpasser les limitations actuelles des dispositifs. L'avenir du photovoltaïque réside ainsi dans l'innovation constante des matériaux et des procédés de fabrication, comme le roll-to-roll pour les cellules organiques. finalement, malgré les problématiques de recyclage et d'investissement, le solaire s'affirme comme une solution durable et fiable pour l'autonomie énergétique[26]. Ce mémoire ouvre la voie à des recherches futures visant à intégrer ces dispositifs optimisés dans des environnements variés, des façades urbaines aux supports flexibles.

Chapitre II : Technologies photovoltaïques

Chapitre II : Les technologies photovoltaïques

II.1 Introduction

Pour que l'énergie solaire se développe vraiment partout, il est essentiel de bien connaître et d'améliorer les matériaux semi-conducteurs qui transforment la lumière du soleil en électricité. ce deuxième chapitre va faire le tour de toutes les technologies importantes qui façonnent le marché et la recherche dans ce domaine[27].on commencera par retracer l'histoire des cellules solaires, en voyant leurs trois générations successives : du silicium cristallin de départ aux technologies plus récentes comme les couches minces ou les organiques. Ensuite, on regardera en détail comment une cellule photovoltaïque standard est faite, de sa structure à sa forme. Pour finir, on parlera des techniques plus poussées pour les améliorer, comme l'ajout d'un champ de surface arrière (BSF) ou le fait de texturer la surface[28].ces méthodes sont capitales pour bien gérer les charges électriques et augmenter le rendement de la cellule.

II.2 Les technologies des cellules photovoltaïques

Le photovoltaïque s'impose aujourd'hui comme la voie la plus propre pour la production d'énergie, exploitant une source abondante et durable. Historiquement, on distingue **trois générations** de cellules, chacune répondant à des enjeux de rendement, de coût et de flexibilité.

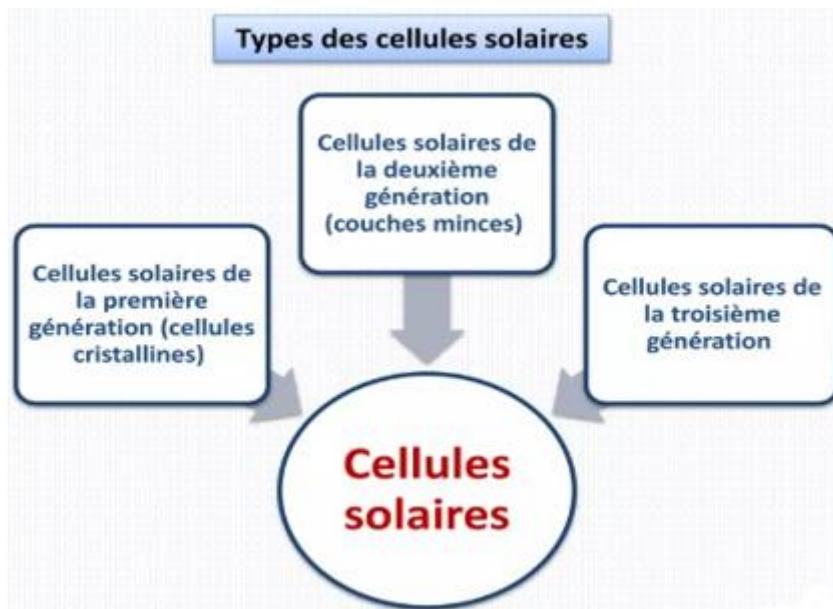


Figure II.1 : Types des cellules solaires[29].

Chapitre II : Les technologies photovoltaïques

II.2.1 Première Génération : Le Silicium Cristallin

Cette technologie, la plus ancienne, domine encore **90 % du marché** mondial grâce à sa robustesse et sa longévité (environ 35 ans). elle utilise des structures massives de silicium dopé, d'une épaisseur comprise entre **0,15 et 0,4 mm**[30].

- **Le Silicium Monocristallin** : Constitué d'un seul cristal pur, il offre les meilleurs rendements du marché (entre **16 et 24 %**)[31]. Son processus de fabrication est cependant complexe et onéreux (figure II.2.a).

- **Le Silicium Polycristallin** : Composé de plusieurs cristaux assemblés (aspect mosaïque), il est plus économique à produire mais présente un rendement légèrement inférieur, aux alentours de **15 à 18 %**[32] (figure II.2.b).

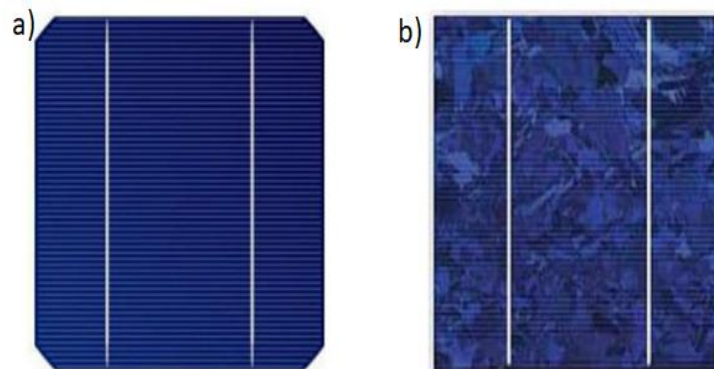


Figure II.2 : Matériaux solides cristallisés Monocristallin (a) et Polycristallin (b)[33].

II.2.2 Deuxième génération : Les couches minces

L'objectif de cette génération est de réduire la masse et le coût de production. Contrairement à la structure ordonnée du silicium cristallin, ces matériaux sont déposés en couches très fines (de l'ordre du **micron**) sur des supports comme le verre ou la céramique.

- **Matériaux utilisés** : On y retrouve le Tellure de Cadmium (**CdTe**), le **CIGS** (Cuivre, Indium, Gallium, Sélénium), ainsi que le **silicium amorphe**.

- **Caractéristiques** : Le silicium amorphe possède une structure désordonnée. Pour compenser ses défauts structurels, on y ajoute de l'hydrogène (silane), ce qui améliore la collecte des charges.

Chapitre II : Les technologies photovoltaïques

- **Performance** : Bien qu'ils absorbent fortement la lumière, leur rendement reste inférieur à la première génération, oscillant entre 7 et 13 %[34].

II.2.3 Troisième génération : Technologies avancées et organiques

Apparue dans les années 1990, cette génération vise à combiner **haute performance et très bas coûts** de revient grâce à des matériaux innovants et des processus de fabrication simplifiés (comme l'impression en continu "roll-to-roll")[35].

- **Flexibilité** : Sa caractéristique majeure est sa souplesse, permettant une intégration sur des supports variés : toitures, véhicules, façades, tentes et même vêtements.

- **Types de cellules** :

- **Cellules Photo-électro-chimiques** : Notamment les cellules à colorant (Dye sensitised solar cell « DSSC »).

- **Photovoltaïque organique (OPV)** : Utilise des molécules ou des polymères organiques. bien que prometteurs pour leur coût, les rendements actuels des polymères restent modestes (entre 4 et 5 %)[36].

II.3 Les filières technologiques

Le marché de la photovoltaïque repose sur l'exploitation de matériaux semi-conducteurs qui convertissent le rayonnement solaire en électricité. bien que de nombreuses variantes existent en laboratoire, le secteur industriel se divise principalement en trois grandes familles technologiques : le silicium cristallin, les couches minces et les cellules organiques ces trois filières coexistent pour répondre à des besoins énergétiques diversifiés, allant des grandes centrales solaires au sol jusqu'aux applications mobiles et urbaines[37]. L'enjeu industriel majeur reste l'optimisation constante des rendements de conversion et la durabilité des composants face aux conditions climatiques extrêmes. cette dynamique technologique assure au secteur une place centrale dans le mix énergétique mondial et la décarbonation durable de l'économie.

Chapitre II : Les technologies photovoltaïques

II.3.1 La filière silicium (Si)

Le silicium demeure le matériau de référence grâce à son abondance dans la croûte terrestre, à sa stabilité chimique et à son absence de toxicité[38]. On distingue deux catégories majeures selon le procédé de cristallisation :

a. Le silicium monocristallin : issu de la méthode Czochralski, est constitué d'un cristal unique et pur

- Fabrication : issu de la méthode Czochralski, il est constitué d'un cristal unique et pur. Les cellules se reconnaissent à leur couleur bleu foncé ou noire uniforme et à leurs coins arrondis.

- Performance : c'est la technologie offrant le meilleur rendement (historiquement entre **12 %** et **20 %**, et aujourd'hui supérieur à **22 %** en milieu industriel)[39].

- Contrainte : Son coût de production est plus élevé en raison de la complexité du processus de tirage du cristal.

b. Le silicium multicristallin (ou Polycristallin) :

- Fabrication : obtenu par refroidissement d'un bloc de silicium fondu, créant une structure hétérogène de multiples cristaux.

- Performance : le rendement est légèrement inférieur (environ **10 à 14 %** dans le texte, approchant les **17 à 19 %** aujourd'hui)[40].

- Avantage : sa fabrication est plus simple et moins coûteuse, ce qui en a longtemps fait le leader du marché mondial.

II.4 Les technologies à couches minces (thin film)

Visent à réduire drastiquement la quantité de matière première et l'épaisseur des cellules afin d'abaisser le coût du watt-crête (W_c) (Figure II. 3).



Figure II. 3 : Couches minces avancées[41].

Chapitre II : Les technologies photovoltaïques

II.4.1 Le silicium amorphe (a -Si)

Il s'agit de silicium non cristallisé déposé sur du verre ou des supports souples. bien que son rendement soit faible (environ 7 %), il présente l'avantage de mieux fonctionner sous un rayonnement diffus ou en cas d'ombrage partiel[42] (figure II.4).



Figure II.4 : Cellule de silicium amorphe[41].

II.5 Les composés de type CdTe, et CIGS

Ces technologies utilisent des matériaux tels que le tellure de cadmium ou le diséléniure de cuivre et d'indium.

- **Potentiel :** ils offrent des rendements prometteurs (jusqu'à **19 %**), mais sont confrontés à des défis majeurs, notamment en raison de la toxicité du cadmium et de la rareté des ressources en indium et tellure, ce qui limite souvent leur utilisation à des applications industrielles spécifiques[43].

II.5.1 Les cellules organiques et plastiques

C'est la technologie la plus récente, basée sur des polymères ou des molécules organiques.

- **Évolution :** après des débuts avec des rendements inférieurs à **1 %** dans les années 1980 [44], la recherche a permis d'atteindre des records (environ **6 %** au moment de l'écriture de ce texte, et dépassant aujourd'hui les **15 %** en laboratoire[45]).

- **Avantages :** ces cellules sont légères, potentiellement très peu coûteuses à produire par impression (roll-to-roll) et extrêmement flexibles.

Chapitre II : Les technologies photovoltaïques

- Limites actuelles : la stabilité reste leur point faible majeur. Leur durée de vie est limitée par la dégradation rapide des matériaux organiques sous l'effet de l'humidité et des rayons UV (environ **1 000** heures sont mentionnées, mais les recherches actuelles visent à prolonger cette durée pour assurer leur viabilité commerciale).

II.6 Architecture détaillée d'une cellule photovoltaïque standard

Une cellule solaire classique n'est pas un bloc monolithique, mais un assemblage complexe de six composants essentiels conçus pour maximiser la capture des photons et l'extraction des électrons.

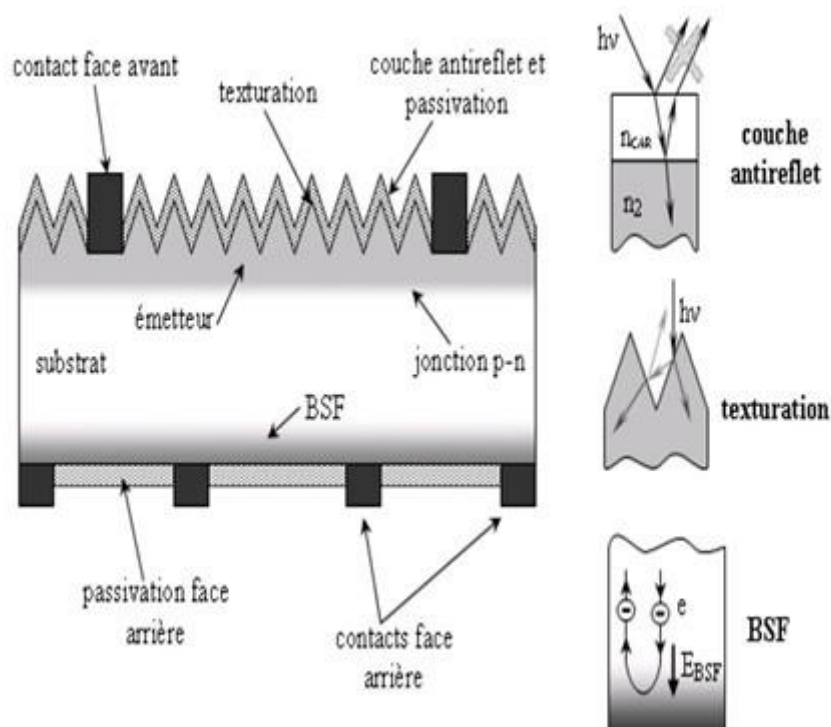


Figure II. 3 : Structure d'une cellule solaire[33].

II.6.1 Les contacts métalliques

Servent de « ponts » pour acheminer le courant électrique vers l'extérieur.

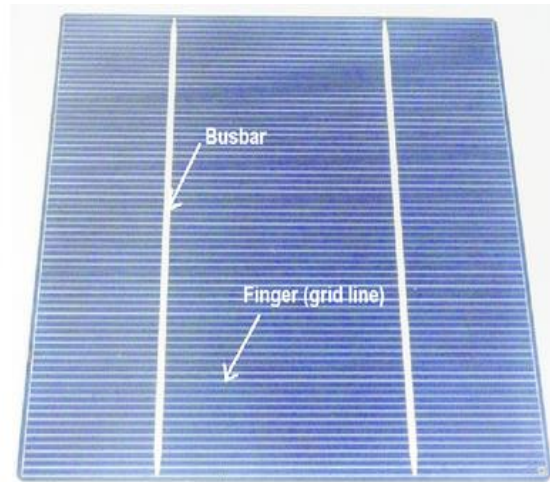


Figure II.4 : Illustration de contacts métalliques[46].

- Configuration : une cellule possède deux contacts, un sur la face avant (souvent sous forme de grille pour laisser passer la lumière) et un sur la face arrière.
- Rôle : faciliter la collecte des porteurs de charge (majoritaires et minoritaires) générés par l'effet photovoltaïque.
- Composition : les métaux utilisés incluent l'argent (Ag), l'aluminium (Al), le cuivre (Cu), le nickel (Ni), le fer (Fe) et parfois le potassium (K)[47].

II.6.2 La couche antireflet (ARC)

Le silicium nu est naturellement très réfléchissant. La couche antireflet est donc cruciale pour optimiser le rendement.

- Fonction : réduire la réflexion de la lumière sur la face avant pour augmenter la transmission des photons vers les couches actives.
- Technologie avancée : pour atteindre de hautes performances, on utilise souvent une double couche antireflet.
- Matériaux : outre les matériaux classiques, le sulfure de zinc (ZnS) avec un indice de réfraction $n = 2,36$ est fréquemment utilisé pour améliorer l'absorption [48].

II.6.3 La couche fenêtre (Window Layer)

Est située en haut de la structure. Elle joue un rôle de filtre et de conducteur.

Chapitre II : Les technologies photovoltaïques

- **Propriété** : elle est composée de matériaux à large gap énergétique (E_g) pour laisser passer un maximum de rayons lumineux sans les absorber prématurément.
- **Utilité** : elle facilite la circulation des électrons vers les contacts tout en protégeant les couches inférieures.

II.6.4 L'émetteur et la base couche tampon (jonction p-n)

C'est le cœur de la cellule où se produit la séparation des charges.

➤ L'Émetteur (Couche de type n)

C'est la couche supérieure de la cellule, celle qui reçoit directement le rayonnement solaire.

- **Caractéristiques** : Elle est très fine (quelques dizaines de nanomètres) pour permettre aux photons de la traverser sans être tous absorbés en surface. Elle est fortement **dopée négativement** (généralement au phosphore), ce qui signifie qu'elle possède un surplus d'électrons libres.
- **Rôle** : Elle sert à collecter les électrons et à former la partie supérieure de la barrière de potentiel.

➤ La Base ou l'absorbeur (Couche de type p)

C'est la partie la plus volumineuse de la cellule, située sous l'émetteur. Le terme "**Absorbeur**" désigne la couche de matériau semi-conducteur où les photons sont réellement convertis en paires électrons-trous

- **Mécanisme** : Lorsqu'un photon possède une énergie supérieure à la largeur de la bande interdite (**Band gap**) du matériau, il est absorbé. Cette énergie permet de faire passer un électron de la bande de valence à la bande de conduction[49].
- **Optimisation** : Dans les technologies **couches minces** (CdTe, CIGS), l'absorbeur est une couche spécifique ultra-mince optimisée pour capturer la lumière sur une très faible distance, grâce à un coefficient d'absorption beaucoup plus élevé que celui du silicium.
- **Caractéristiques** : Elle est beaucoup plus épaisse (environ **150 à 200** micromètres pour le silicium cristallin) et est **dopée positivement** (généralement au bore). Elle présente un déficit d'électrons, créant ainsi des "trous".

Chapitre II : Les technologies photovoltaïques

- **Rôle** : Elle constitue le réservoir principal de la cellule et assure le transport des porteurs de charge vers les contacts arrière.

➤ La Jonction p-n : La zone de déplétion

À l'interface entre l'émetteur (n) et la base (p), les électrons et les trous se recombinent pour créer une **Zone de Charge d'Espace (ZCE)**.

- **Fonctionnement** : Cette zone crée un champ électrique permanent. Lorsqu'un photon arrache un électron à un atome, le champ électrique de la jonction "force" l'électron à aller vers l'émetteur (n) et le trou vers la base (p). Sans cette jonction, les charges se recombineraient instantanément et ne produiraient aucun courant (figure II.5).

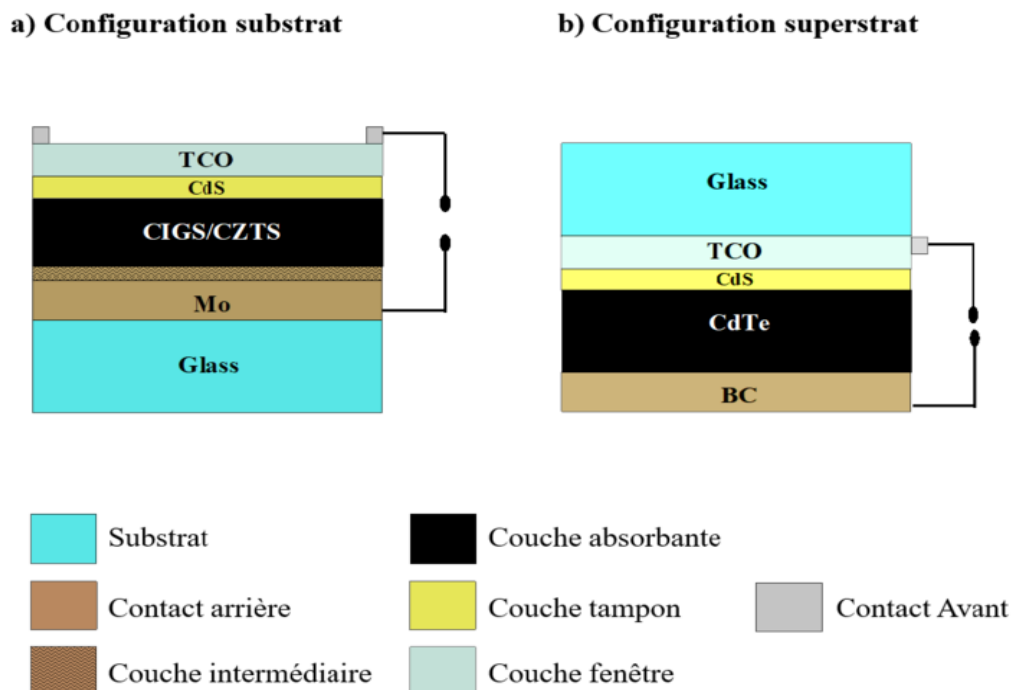


Figure II.6 : Les différentes couches utilisées dans la fabrication de cellules solaires à couches minces en configuration substrat (a) et de superstrat (b)[50].

II.7 L'optimisation avancée des cellules photovoltaïques

L'amélioration du rendement d'une cellule solaire repose sur un équilibre délicat entre la gestion optique (capturer le maximum de photons) et la gestion électrique (extraire le maximum d'électrons sans pertes).

Chapitre II : Les technologies photovoltaïques

II.7.1 Le BSF (Back Surface Field) : le miroir électronique

L'introduction d'un champ de surface arrière (BSF) est une étape cruciale pour minimiser la recombinaison des porteurs de charge au niveau des contacts métalliques arrière, qui agissent souvent comme des « puits » de perte d'énergie. En créant une zone fortement dopée (notée p^+ pour les cellules de type p), on génère une discontinuité dans la bande de valence. ce champ électrique interne agit comme une barrière de potentiel sélective qui repousse les porteurs minoritaires (les électrons dans une base p) loin de la surface arrière pour les rediriger vers la jonction p-n principale[51]. Ce confinement augmente localement la densité de porteurs, ce qui se traduit par une hausse significative de la tension en circuit ouvert (V_{co}) et du courant de court-circuit (I_{cc}). Aujourd'hui, cette technologie évolue vers des structures plus complexes, comme le PERC (Passivated Emitter and Rear Cell), dans lesquelles une couche diélectrique supplémentaire renforce cette isolation.

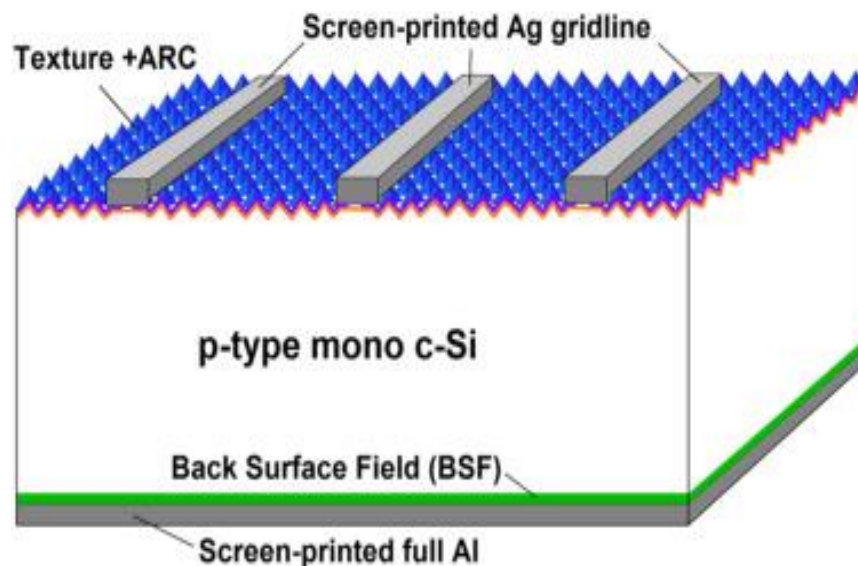


Figure II.7 : Champ de surface arrière(BSF)[52].

II.7.2 La texturisation : dompter la lumière par la géométrie

La texturisation de surface consiste à modifier la morphologie du silicium afin de piéger les photons. Pour le silicium monocristallin, cette opération est réalisée par une attaque chimique anisotrope qui révèle des structures pyramidales suivant les plans cristallins. L'impact est double :

- **Réduction drastique de la réflectance** : sur une surface plane, le silicium réfléchit naturellement environ 35 % de la lumière ; grâce aux pyramides, un rayon réfléchi par une face

Chapitre II : Les technologies photovoltaïques

à une probabilité quasi certaine de frapper une face adjacente (double réflexion). Mathématiquement, si R est le coefficient de réflexion d'une surface plane, la réflectance globale chute à R^2 , tombant sous les **10 %** avant même l'application de traitements chimiques[53].

- **Allongement du chemin optique** : en changeant l'angle d'entrée de la lumière, les photons ne traversent plus la cellule verticalement, mais de manière oblique. Ce parcours prolongé augmente statistiquement les chances d'interaction avec les atomes de silicium, favorisant ainsi la création de paires électron-trou, en particulier pour les longueurs d'onde proches de l'infrarouge, qui sont plus difficiles à absorber.

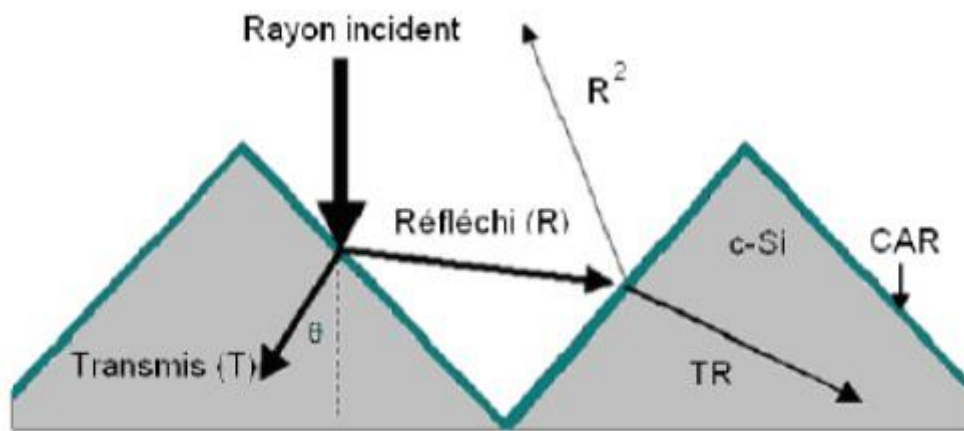


Figure II.8 : Schéma de principe des réflexions lumineuses sur une surface texturée[54].

R est le coefficient de réflexion, T le coefficient de transmission et $T+R=1$ (l'absorption est négligée) [55].

II.7.3 Synergie avec les couches antireflets et la passivation

Pour parfaire ces deux méthodes, l'industrie ajoute systématiquement une couche antireflet (ARC), généralement du nitrure de silicium (SiN_x). Cette couche utilise les interférences destructives pour annuler les réflexions résiduelles, ce qui donne aux panneaux leur couleur bleue ou noire caractéristique. De plus, le (SiN_x) joue un rôle de passivation chimique en saturant les liaisons pendantes à la surface du silicium, ce qui empêche les électrons de se « perdre » dans les défauts du réseau. l'association du BSF pour la gestion arrière, de la texturisation pour la gestion frontale et de la passivation pour la qualité cristalline permet aujourd'hui d'atteindre des rendements industriels supérieurs à 22 %[56].

II.8 Conclusion

Dans ce deuxième chapitre nous a bien fait comprendre à quel point les structures photovoltaïques sont différentes et complexes. Même si les panneaux solaires de première génération, ceux en silicium cristallin (qu'il soit monocristallin ou Polycristallin), dominent toujours le marché industriel parce qu'ils sont robustes et très performants, les technologies plus récentes, comme celles en couches minces ou les panneaux organiques, semblent très prometteuses. Elles offrent plus de souplesse, demandent moins de matières premières et coûtent moins cher à fabriquer. en étudiant en détail comment est faite une cellule standard, on a compris que son efficacité ne dépend pas seulement du matériau qui capte la lumière[57]. Elle dépend surtout de la façon dont tous ses éléments travaillent ensemble : les contacts en métal, les couches qui empêchent les reflets (ARC) et la qualité de la jonction p-n. et en plus, certaines techniques sont indispensables pour améliorer tout ça. La texturisation géométrique, qui aide à mieux capter la lumière, et à l'effet BSF, qui retient mieux l'électricité à l'arrière. Ces deux choses sont cruciales pour limiter les pertes d'énergie à l'intérieur, que ce soit par les reflets ou par la recombinaison. une fois qu'on a compris toutes ces bases techniques, il devient crucial d'utiliser des outils informatiques pour simuler et voir à l'avance comment ces structures se comportent. C'est d'ailleurs le sujet de notre prochain chapitre, entièrement consacré à la simulation.

Chapitre III : Logiciel de simulation

III.1 Introduction

L'objectif de ce travail est de simuler la structure physique d'une cellule solaire NIP afin d'analyser ses principaux paramètres de sortie : la tension de circuit ouvert (V_{co}), le courant de court-circuit (I_{cc}), le facteur de forme (FF) et le rendement de conversion (η). Pour parvenir à cela, il est indispensable d'utiliser un logiciel spécialisé capable de modéliser ces paramètres parmi les nombreux outils disponibles, nous avons choisi d'utiliser le logiciel WxAMPS (Microelectronics and Photonic Structural Analysis), développé comme une version améliorée du programme AMPS-1D déjà connu pour son utilisation dans plusieurs travaux scientifiques de grandes qualités, le WxAMPS-1D se distingue par sa précision, sa flexibilité et son interface conviviale. l'utilisation de l'outil de simulation WxAMPS-1D est primordiale pour constater l'effet des différents paramètres de chaque couche sur les performances de la cellule[58].

Pour obtenir un rendement de conversion optimal. Ce logiciel utilise l'équation de poisson, l'équation de continuité pour trous libres et l'équation de continuité pour électrons libres. par conséquent, les résultats de la caractéristique de transport sont le fruit de la résolution de ces équations. Dans ce chapitre, nous présenterons et détaillerons la structure et le fonctionnement de cet outil.

III.2 Modélisation et la méthodologie de conception de la cellule photovoltaïque

La phase de conception est la clé de toute étude numérique. Elle ne se limite pas à une simple juxtaposition de couches, mais repose sur une modélisation précise des propriétés physiques, optiques et électroniques de chaque matériau.

Il existe une quantité importante et la variété des programmes sont justifiées par plusieurs motifs, comme les genres de cellules, les propriétés physiques, les paramétrages, les structures, etc. cependant, leur nombre ne s'explique pas uniquement par des aspects liés à la cellule directement. on distingue également d'autres critères, comme la dimension d'étude (1D, 2D ou 3D), la disponibilité (gratuit ou payant) et la compatibilité (versions et systèmes d'exploitation).[59] toutes ces différences sont synthétisées et présentées dans le tableau III.1 ci-après.

Chapitre III : Logiciel de Simulation

N°	Simulateurs	Dimensions	Disponibilité	Compatibilité	Capacités
1	PC1D	1D	Gratuit	Toutes les versions jusqu'à Windows 7	Capable de simuler la plupart des cellules solaires mais parfaite pour celles à silicium(C-Si)
2	ASA	1D	Payant	Windows 7 ou 8	Cellule à couches minces: a-Si:H, μ c-Si:H et a-Si:H/ μ c-Si:H cellule tandem
3	AMPS	1D	Gratuit	MacOS 10.9 et tout Windows à partir du 7	Cellules C-Si, a-Si:H, CIGS, CZTS.
4	WxAMPS	1D	Gratuit	Toutes les versions de Windows jusqu'à 7 Vista	Toutes les fonctionnalités incluant celles des cellules solaires tandems
5	SCAPS	1D	Gratuit	Compatible avec Windows et Linux	Cellules solaires à Couches minces:CIGS,CdTe,GaAs,C-Si et a-Si:H.
6	SETFOS	1D	Payant	Compatible avec Windows et Linux (x86 et ARM)	Cellules organiques, pérovskites, quantum-dots, cellule tandem pérovskites/Silicium.
7	Gpvdms	1D	Payant	Windows Vista 7/8	Cellules pérovskites, polymers, C-Si, a-Si:H et CIGS

Chapitre III : Logiciel de Simulation

8	AFORS-HET	1D	Gratuit	Windows XP/Vista/7/8/8.1/Linux	Cellules a-Si:H/c-Si.
9	ASPIN	2D	Gratuit	Windows 7/8.1/10	Cellules hétérojonction CIGS, a-Si: H/C-Si,a-Si:H p-i-n.
10	PECSIM	N/A	Gratuit	Windows 7/8.1/10	Cellules solaires pérovskites ,dye-sensitized(DSCs).
11	ADEPT	1D	Gratuit	Windows 10, Windows Server 2016, Processor: Intel Core i7 ou équivalent.	Cellules solaires C-Si,GaAs,AlGaAs/GaAs tandem,CIGS,CdTe et couche mince a-Si:H
12	TCAD	2D,3D	Payant	Windows 7/8.1/10 et 10(64-bit),Linux6/7	Cellules solaires CMOS, puissance, mémoire et image sensors.
13	ATLAS	2D,3D	Payant	Windows et Linux (aucune version mentionnée)	Cellule solaires organique, tandem et photodétecteur.
14	MSCS	1D	Gratuit	Windows/Linux ,version Web très performante	Cellule multi-jonction III-V haute efficacité.

Tableau III.1 : Comparatif des logiciels de simulation des cellules photovoltaïques

Chapitre III : Logiciel de Simulation

Afin de mener à bien les travaux de simulation, nous avons décidé de nous tourner vers le WxAMPS1D munie de nouvelles fonctionnalités, comme la gestion de structures multicouches, l'insertion de défauts complexes et une visualisation avancée des résultats. il repose sur une base de calcul physique robuste et offre une interface graphique basée sur la bibliothèque multiplateforme WxWidgets, ce qui le rend accessible aussi bien aux chercheurs qu'aux étudiants dans le domaine de l'énergie solaire[33].

III.3 WxAMPS-1D

Le logiciel WxAMPS-1D (Wx Analysis of Microelectronics and Photonic Structures) constitue une évolution majeure et polyvalente de l'outil AMPS-1D d'origine, spécifiquement optimisé pour la simulation unidimensionnelle de dispositifs à deux terminaux, comme les photodiodes, les capteurs et les cellules photovoltaïques de nouvelle génération. basé sur le code source initial développé à l'université d'État de Pennsylvanie, ce simulateur intègre désormais une interface utilisateur intuitive basée sur la bibliothèque WxWidgets, offrant une plus grande flexibilité pour l'analyse des interactions complexes entre les propriétés intrinsèques des matériaux, telles que la largeur de bande interdite, le dopage et la distribution des défauts, et les performances globales du dispositif sous diverses excitations lumineuses, électriques ou thermiques. Sur le plan numérique, WxAMPS-1D se distingue par un algorithme hybride optimisé qui combine les méthodes de Newton et de Gummel, garantissant ainsi une plus grande stabilité et une meilleure convergence lors des calculs. Il intègre également des paramètres de circuits réels, comme les résistances en série et en parallèle. Il excelle dans la modélisation de structures avancées, telles que les hétérojonctions et les cellules tandem, grâce à l'implémentation de modèles de transport par effet tunnel sophistiqués (intra-bande et assisté par pièges), dans lesquels la mobilité des porteurs peut être définie en fonction du champ électrique.

Il permet également de simuler une vaste gamme de matériaux, du silicium cristallin aux couches minces telles que le CdTe et le CIGS, en proposant deux approches de modélisation fondamentales, choisies par l'utilisateur dès l'accueil : le modèle « lifetimepicture » pour les structures monocristallines à faible densité de défauts, et l'approche par densité d'états (DOS), indispensable pour caractériser les matériaux amorphes ou polycristallins. cette dualité méthodologique, complétée par une base de données collaborative de type wiki pour favoriser l'échange scientifique, positionne WxAMPS-1D comme un outil de recherche indispensable

Chapitre III : Logiciel de Simulation

pour optimiser les rendements de conversion et comprendre en profondeur les diagrammes de bandes et les taux de recombinaison[60].

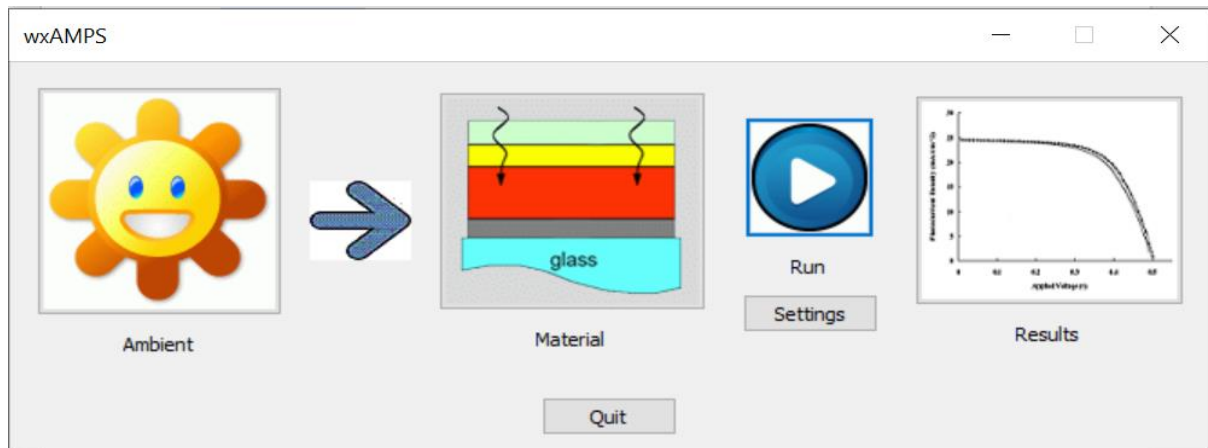


Figure III.1 : Fenêtre de présentation du logiciel WxAMPS-1D[33].

III.3.1 Méthodologie de conception

La conception et l'élaboration de la structure nécessite l'ajustement précis de plusieurs variables critiques, tout en respectant les limites thermodynamiques et matérielles :

- Propriétés physiques : épaisseur des couches, taux de dopage (N_A , N_D) et affinité électronique.
- Paramètres optoélectroniques : largeur de la bande interdite (Gap), mobilité des porteurs de charge et coefficients d'absorption[61].
- Interfaces : densité d'états de défauts et vitesses de recombinaison de surface.

III.3.2 Analyse des résultats de simulation

Une simulation réussie permet d'extraire une cartographie complète du comportement de la cellule sous éclairement (mesures effectuées sous le spectre AM1.5).

- Caractérisation électrique : l'extraction de la courbe J-V (densité de courant-tension) permet de visualiser la réponse globale du dispositif.
- Dynamique des porteurs : analyse du diagramme des bandes d'énergie, essentielle pour comprendre le transport des charges ainsi que les profils de génération et de recombinaison qui dictent les pertes internes.
- Réponse spectrale : la courbe d'efficacité quantique (EQ) permet d'évaluer la capacité de la cellule à transformer chaque photon incident en électron collecté selon sa longueur d'onde.

Chapitre III : Logiciel de Simulation

- Champs internes : visualisation du champ électrique au sein de la zone de charge d'espace (ZCE), qui est à l'origine de la séparation des paires électron-trou.

III.3.3 Indicateurs de performance

L'aboutissement du processus consiste à quantifier l'efficacité du dispositif via quatre paramètres fondamentaux déduits des données numériques :

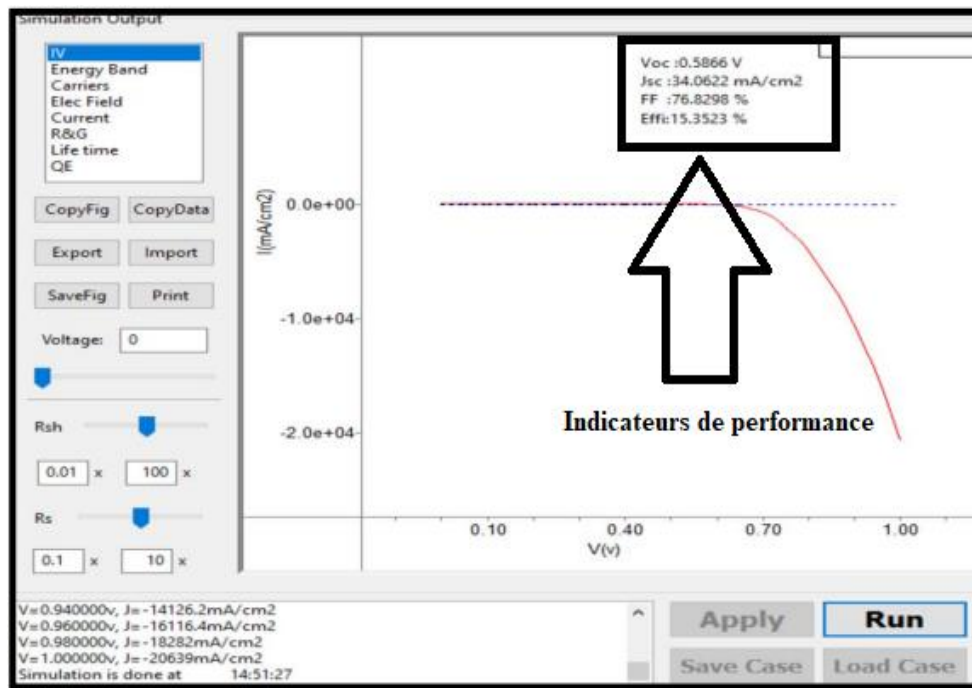


Figure III.2 : Présentation des indicateurs de performance du WxAMPS-1D.

- (Tension en circuit ouvert) : potentiel maximal lorsque le courant est nul ;
- (Densité de courant de court-circuit) : courant maximal collecté sans tension externe ;
- (Facteur de forme) : mesure de la « propreté » de la courbe J-V, reflétant les résistances série et shunt ;
- (Rendement de conversion) : rapport entre la puissance électrique produite et la puissance lumineuse incidente.

III.4 Avantage du WxAMPS-1D

Le logiciel WxAMPS-1D est une version modernisée et améliorée des outils de simulation dans le domaine de solaire photovoltaïques.

Chapitre III : Logiciel de Simulation

- **Interface et ergonomie** : WxAMPS-1D dispose d'une interface graphique conviviale et intuitive, ce qui le rend accessible aux utilisateurs sans compétences particulières en programmation.

- **Capacités techniques et flexibilité** : WxAMPS-1D permet d'insérer un nombre illimité de couches, contrairement à d'autres logiciels qui ne permettent qu'un nombre limité de couches.

WxAMPS-1D permet d'importer et d'exporter plusieurs types de fichiers (spectre, résultats, etc.). À l'inverse, d'autres logiciels n'acceptent que des fichiers binaires, ce qui limite la flexibilité du traitement automatisé.

Analyse spectrale : contrairement à d'autres logiciels, WxAMPS-1D permet d'introduire un nombre illimité de longueurs d'onde afin d'améliorer la précision de la simulation.

- **Algorithmes et physique du transport** : Stabilité des calculs : l'algorithme de WxAMPS-1D allie avec maestria les méthodes de Newton et de Gummel, ce qui assure une convergence optimale et une stabilité inébranlable des résultats.

La modélisation réaliste de WxAMPS-1D permet de prendre en compte les effets des résistances série et shunt, même lorsqu'ils ne sont pas directement liés à la diode principale.

Précision : le WxAMPS-1D est considéré comme très précis.

Tableau récapitulatif :

Critère	WxAMPS-1D
Objectif principal	Simulation avec interface graphique (GUI).
Facilité d'utilisation	Conviviale, adaptée aux non-programmeurs
Flexibilité	Simulation facile de nouveaux matériaux.
Mises à jour	Régulières et compatibles avec les systèmes modernes.
Applications	Recherches académiques et éducation.

Tableau III.2 : Comparaison entre les deux programmes WxAMPS-1D et AMPS-1D[33].

III.5 Comment réaliser une simulation du logiciel WxAMPS-1D

La procédure de simulation dans l'interface WxAMPS-1D repose sur une architecture méthodologique rigoureuse en trois étapes visant à caractériser précisément les dispositifs photovoltaïques.

- **Configuration de l'Environnement** : dans un premier temps, l'utilisateur définit les conditions opératoires globales, telles que la température de fonctionnement, les tensions de polarisation et le spectre solaire. une innovation majeure par rapport à la version classique est la capacité du logiciel à intégrer un nombre illimité de longueurs d'onde pour l'analyse spectrale, ce qui permet d'obtenir des résultats plus précis[62].
- **Définition des propriétés physiques** : la deuxième phase consiste à paramétrer les caractéristiques intrinsèques du dispositif, classées en trois catégories : les contacts (avant et arrière), les régions actives (couches semi-conductrices ou isolantes) et les conditions d'illumination. L'intégration d'une base de données modifiable via des tableurs simplifie grandement la gestion des couches et l'ajustement des coefficients d'absorption.
- **Résolution numérique et analyse** : une fois ces paramètres établis, le logiciel entame le processus de calcul, déterminant d'abord les solutions à l'équilibre (diagramme de bandes, champ électrique et densités de porteurs sans polarisation externe). Ces solutions servent ensuite de base à un processus itératif permettant d'obtenir la caractérisation complète du dispositif sous tension ou en présence d'un éclairage. Contrairement à l'AMPS-1D original, qui nécessitait cinq boîtes de dialogue distinctes, WxAMPS-1D centralise toutes ces fonctions dans une fenêtre unique, ce qui améliore l'efficacité.

Enfin, l'utilisateur peut visualiser en temps réel l'impact de paramètres externes grâce à des curseurs interactifs dédiés à la tension et aux résistances en série ou en dérivation, tout en exportant les données finales (courbes I-V, profils de recombinaison, flux de courant) sous divers formats, tels que le CSV ou le bitmap, afin de les exploiter plus en profondeur.

III.6 Les paramètres d'entrées

III.6.1 Paramètres ambiants et de contact (fenêtre « Ambient »)

Ces réglages définissent l'environnement externe de la cellule et les propriétés physiques aux interfaces.

Chapitre III : Logiciel de Simulation

Conditions de fonctionnement :

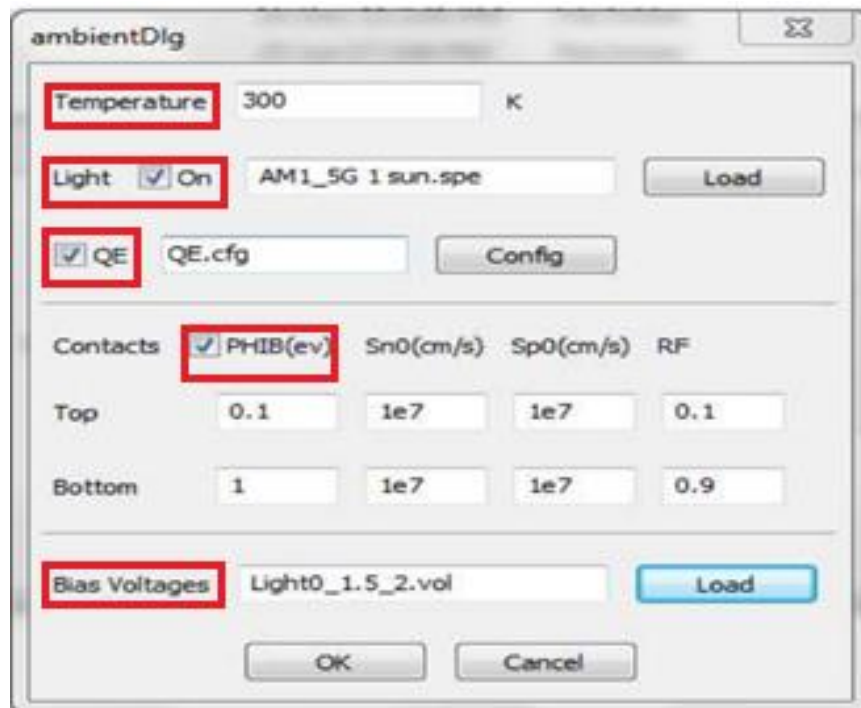


Figure III.3 : Modélisation des conditions ambiantes dans WxAMPS-1D.

- Température (T) : généralement fixée à 300 K pour les conditions standards (STC).
- Éclairement (Light) : activation ou désactivation du spectre (LIGHT=ON/OFF).
- Efficacité quantique (QE) : configuration des fichiers de biais pour le calcul de la réponse spectrale.
- Tension de polarisation (Bias) : définition de la plage de tension pour la caractéristique I-V
- Barrières de potentiel aux contacts :
 - PHIBO (Φ_{b0}) : travail de sortie au contact avant ($x = 0$).
 - PHIBL (Φ_{bL}) : travail de sortie au contact arrière ($x = L$).

Recombinaison Etude et réflexion :

Vitesses de recombinaison (S_n , S_p) : définies pour les électrons et les trous aux deux interfaces ($x = 0$ et $x = L$).

Coefficients de réflexion (R_F , R_B) : proportion de lumière réfléchi aux faces avant et arrière[63].

Chapitre III : Logiciel de Simulation

III.7 Propriétés des matériaux (Fenêtres électrique et défaut)

Chaque couche doit être caractérisée par ses constantes physiques pour simuler un comportement réaliste.

III.7.1 Paramètres électriques de base

- Épaisseur (d) : dimension physique de la couche en μm .
- Permittivité relative (ϵ_r) : constante diélectrique du matériau.
- Bande interdite (E_g) : énergie du gap du matériau.
- Affinité électronique (χ) : niveau d'Énergie entre le vide et la bande de conduction.
- Densités d'états (N_c , N_v) : densités effectives dans les bandes de conduction et de valence.
- Mobilités (μ_n , μ_p) : capacité de déplacement des électrons et des trous.
- Dopage (N_A , N_D) : concentration des accepteurs et des donneurs.

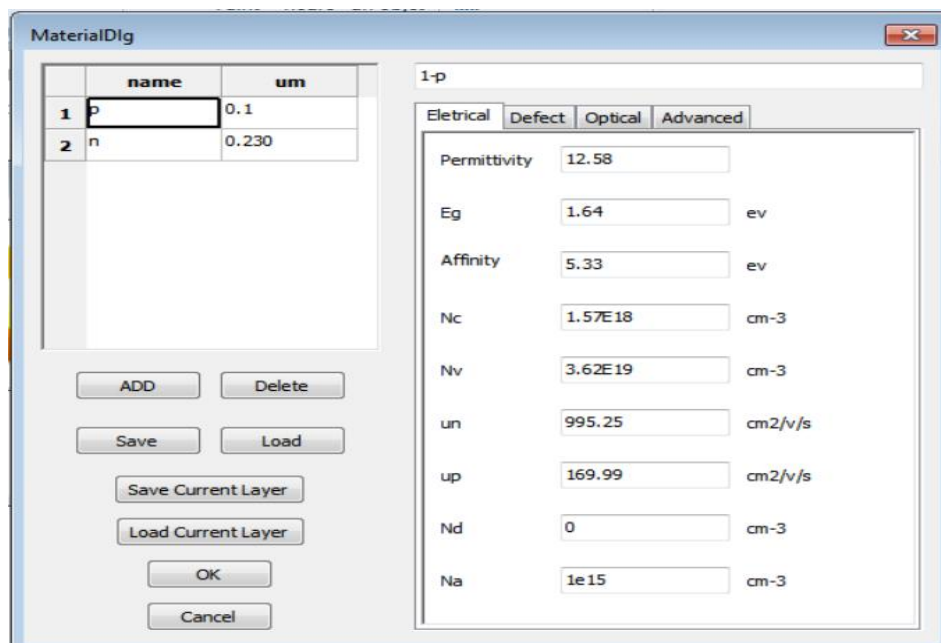


Figure III.4 : Insertion des paramètres électriques dans WxAMPS-1D.

III.7.2 Modélisation des défauts

- Types de défauts : discrets, de queue de bande (band tails) ou gaussiens.
- États de défauts : nombre de niveaux (DLVS pour les donneurs, ALVS pour les accepteurs).

Chapitre III : Logiciel de Simulation

- Paramètres d'ionisation : énergie d'ionisation (E(DONG), E(ACP)), largeur du niveau (W(DSD), W(DSA)) et sections efficaces de capture (σ_n , σ_p).

III.7.3 Paramètres optiques (fenêtre « Optical »)

La gestion de l'absorption lumineuse est cruciale pour la génération de porteurs de charge.

- Facteur d'absorption (α) : calculé à partir de la longueur d'onde (λ) et des coefficients spécifiques (A et B) propres à chaque matériau.
- Importation de données : Le logiciel permet d'importer des fichiers d'absorption externes au format. Rédigés via un éditeur de texte (Notepad).
- Gap optique (EGOP) : paramètre déterminant les longueurs d'onde utilisées pour le calcul de la génération de photons.

Electrical Defect Optical Advanced

$$\alpha(\lambda) = \left(A + \frac{B}{h\nu} \right) \sqrt{h\nu - E_g}$$

A cm⁻¹ B

Direct Bandgap From AB

	nm	m ⁻¹
1	3	3.2000e+002
2	3	3.4000e+002
3	3	3.6000e+002
4	3	3.8000e+002
5	3	4.0000e+002

To XML From File

Figure III.5 : La fenêtre d'insertion des paramètres optiques.

III.8 Paramètres de sortie

III.8.1 Caractéristique I(V)

L'utilisateur peut spécifier une plage de variation de la tension de polarisation du dispositif. Par exemple, il peut indiquer une plage allant de 0 V à 1,5 V. cette plage sera appliquée aussi bien à la caractéristique courant-tension I(V) dans l'obscurité qu'à celle dans l'éclairement. Le logiciel WxAMPS-1D permet en effet de simuler les performances du dispositif dans les deux situations, ce qui est essentiel pour une analyse complète de la cellule [64]. De plus, WxAMPS-1D permet d'examiner le diagramme de bande à différentes tensions, à condition que l'incrément de tension soit cohérent. À titre d'illustration, une variation de 0,2 V entre 0 et 2 V permettra de produire des points de simulation pertinents tout en restreignant la durée du calcul. Il est essentiel de préciser que plus le pas est réduit, plus la modélisation sera exacte, mais le temps de calcul sera aussi plus long.

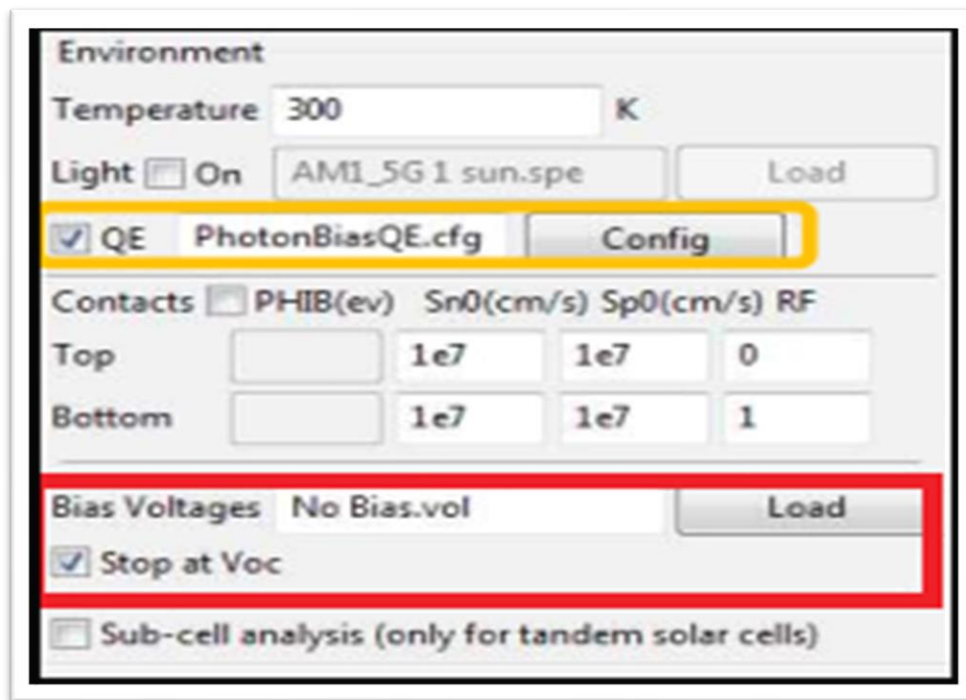


Figure III.6 : Présentation des paramètres d'illumination et de polarisation du WxAMPS-1D.

Pour obtenir la courbe I (V) sous illumination, l'utilisateur doit activer l'option « Light on » dans WxAMPS-1D. une fois la simulation lancée, le logiciel génère automatiquement les courbes de courant-tension ainsi que les principaux paramètres photovoltaïques, tels que la

Chapitre III : Logiciel de Simulation

tension en circuit ouvert (V_{co}), le courant de court-circuit (J_{sc}), le facteur de forme (FF) et le rendement (Eff)[41].

III.8.2 Réponse spectrale

Afin d'examiner la réaction du système en fonction de la longueur d'onde, l'opérateur a la possibilité de mettre en service l'option « Light I-V with SR » (Spectral response). Cette fonction permet de calculer la quantité de lumière produite par les cellules pour chaque longueur d'onde. Cela tient compte des conditions d'éclairage que l'utilisateur a définies avant (le spectre et la force de la lumière).

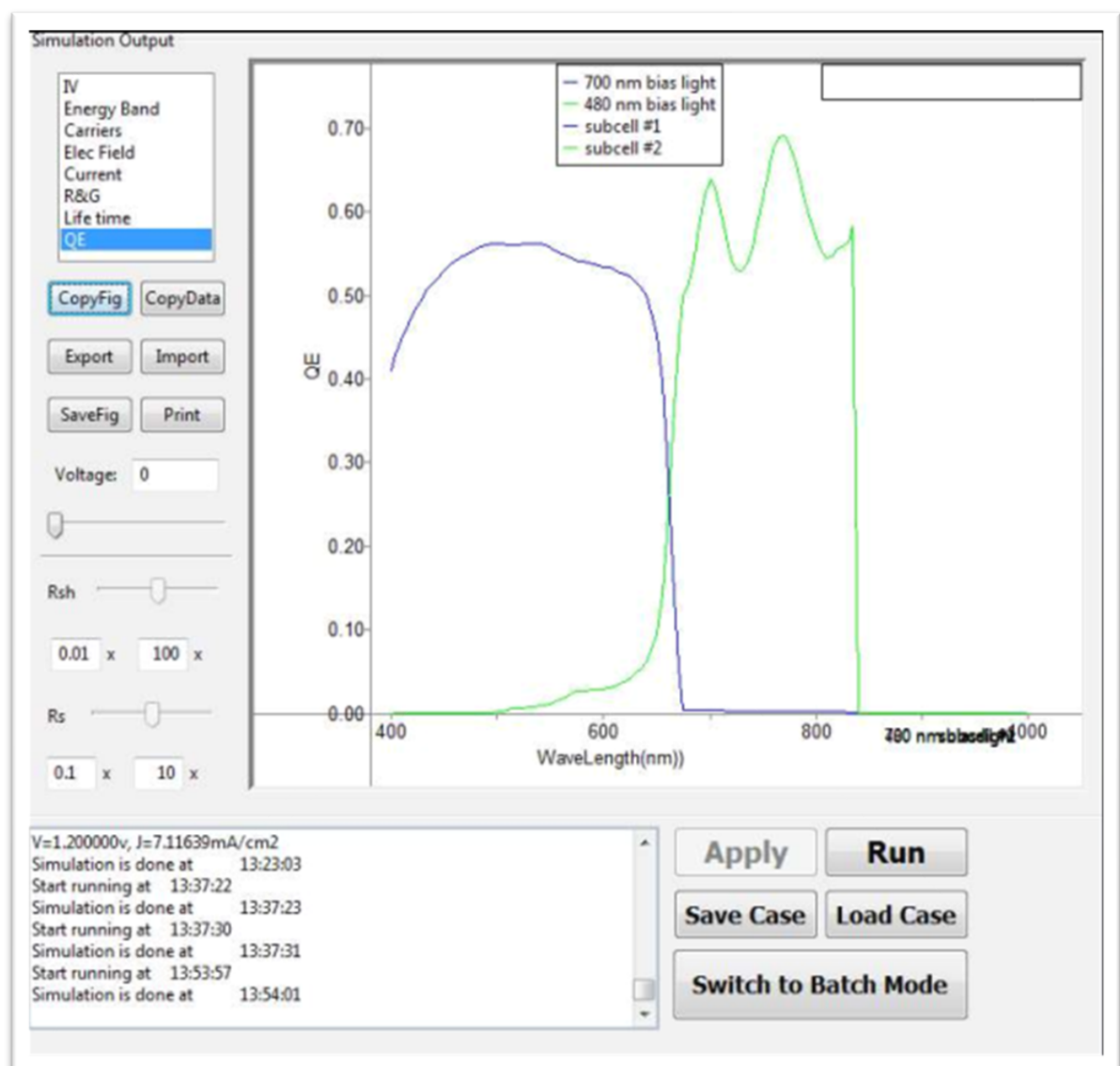


Figure III.7 : Fenêtre de l'AMPS-1D propre à la réponse spectrale.

Chapitre III : Logiciel de Simulation

Et par conséquent, la plage de longueurs d'onde sur laquelle on trace la réponse spectrale, elle dépend du spectre lumineux qu'on sélectionne. Il est également possible de modifier l'intensité du faisceau de la sonde afin de simuler différentes conditions d'éclairement.

En cochant cette option, le logiciel calcule l'efficacité quantique externe ou interne de la cellule, sous une polarisation de tension spécifiée, et affiche le résultat sous forme de "Quantum Efficiency (QE)". cette analyse permet de mesurer avec précision la capacité du dispositif à convertir les photons en électrons en fonction de leur longueur d'onde. Cela est essentiel pour évaluer les performances optiques d'une cellule solaire.

III.9 Conclusion

Dans ce troisième chapitre, on a parlé de la méthode qu'on a utilisée pour la conception numérique et aussi expliquer le fonctionnement de notre outil, le logiciel WxAMPS-1D. on a choisi WxAMPS-1D par ce que son interface est facile à utiliser, il est très souple pour gérer les différentes couches, et ses algorithmes (ceux de Newton et Gummel) sont vraiment stables, comme on l'a vu en comparant plusieurs autres simulateurs.

On a expliqué en détail comment configurer le logiciel, en insistant sur le fait qu'il est important de bien régler les données de départ. Cela concerne les conditions extérieures, les caractéristiques électriques des matériaux (comme l'écart de bande, l'affinité, la mobilité ou le dopage), mais aussi comment on représente les défauts et les coefficients d'absorption de la lumière, ce qui est assez compliqué. Avec cet outil numérique bien complet, le logiciel peut simuler très précisément les principaux indicateurs de performance (comme V_{oc} , J_{sc} , FF et le rendement η), et aussi comment la structure réagit quand elle est éclairée par une lumière AM1.5. maintenant qu'on a bien compris comment cet outil fonctionne et ses bases théoriques, on va pouvoir passer au chapitre d'après pour faire les simulations et trouver les meilleurs réglages physiques pour notre cellule solaire PIN[65].

Chapitre IV : Résultat et discussion

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous avons effectué tout d'abord une étude des caractéristiques électriques d'une cellule solaire photovoltaïque standard à base de Si constituée de ZnO/Si : N/Si : P puis une cellule solaire type NIP ayant l'architecture suivante ZnO/Si : N/Si : I/Si : P sous l'éclairement **AM1.5** en utilisant comme outil de simulation numérique le simulateur **WxAMPS-1D**. l'étude a permis d'extraire les caractéristiques rendement quantique ainsi que la densité de courant de court-circuit (J_{cc}), la tension de circuit ouvert (V_{co}), le facteur de remplissage (FF), et le rendement de conversion photovoltaïque (η). Nous avons étudié ces caractéristiques photovoltaïques sous l'effet de variation de l'épaisseur et du dopage. Il s'est avéré que les changements apportés aux propriétés de la couche (Si : N), (Si : I) et (Si : P) ont eu des effets significatifs sur les caractéristiques électriques de la cellule. L'objectif de ce chapitre est de mettre en évidence les impacts issus de ces variations et comprendre leur nature de point de vue physique.

IV.2 Structure de la cellule solaire photovoltaïque en silicium

La Figure IV.1 a) et b) : illustre toutes les couches d'une cellule solaire photovoltaïque homojonction contenant du ZnO/Si : N/Si : P mais aussi la structure NIP ZnO/Si : N/Si : I/Si : P. En général, ces dispositifs comprennent une couche d'environ 1 μm d'Al déposée sur un substrat de verre, utilisée comme contact arrière pour la cellule solaire photovoltaïque. L'absorbeur en Si : P est déposé sur l'électrode arrière d'Al. Cette couche d'absorbant possède une épaisseur de 0.5 à 2 μm . Cas particuliers pour la cellule NIP le dépôt d'une couche intrinsèque à caractère neutre point de vue dopage, puis l'homojonction est alors accomplie par le dépôt de bain chimique (chemical bath déposition : CBD) de Si : N (en général entre 20-100 nm profondément) et par le dépôt de pulvérisation d'une couche de ZnO (habituellement d'épaisseur 100-200 nanomètres) fortement dopée de ZnO. Car ZnO qui a une énergie de gap de 3.2 eV est transparent pour la partie principale du spectre solaire qui est donc noté comme couche de fenêtre de pile solaire.

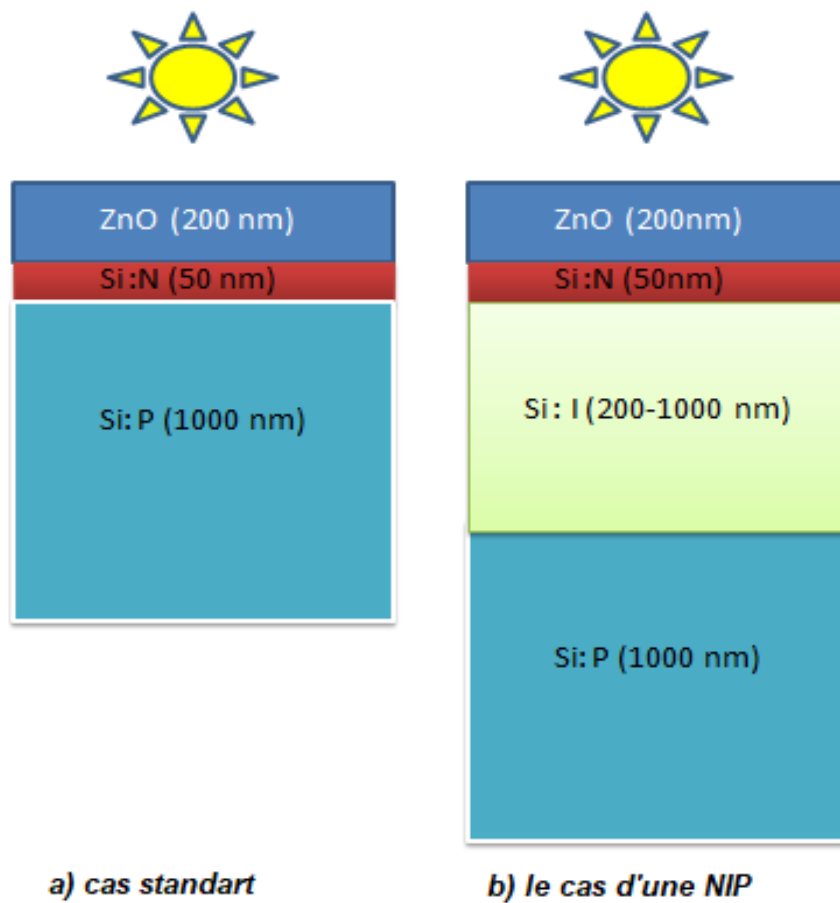


Figure IV.1 : Schéma simplifié d'une cellule solaire PV en couche mince, a) cas standard de ZnO/Si:N/Si:P, b) cas NIP ZnO/Si:N/Si:I /Si:P.

IV.2.1 Le substrat

Le verre généralement utilisé comme substrat, récemment un certain effort a été fait pour développer les piles solaires flexibles sur le polyamide, les feuilles métalliques et les substrats d'acier inoxydable,

IV.2.2 Le contact arrière

L'aluminium présente deux avantages clés : son travail de sortie (4.28 eV) est compatible avec le niveau de fermi du Si:P pour former un contact ohmique, et sa haute réflectivité (~90 % dans le visible et le proche infrarouge) permet de réfléchir les photons non absorbés lors d'un premier passage, leur donnant une seconde chance d'être absorbés. Ce piégeage optique en face arrière peut augmenter le rendement de plusieurs points.

IV.2.3 La couche absorbeur Si : P

Si:P est la couche la plus épaisse de la cellule elle en représente plus de 90 % du volume total. Elle est formée de silicium dopé de type p grâce à l'incorporation d'atomes de bore (groupe III), qui créent des lacunes électroniques (trous) dans la structure cristalline. Les trous sont ici les porteurs majoritaires ; les électrons constituent les porteurs minoritaires. Son épaisseur importante (**1 à 300 μm** pour du silicium cristallin) est justifiée par les propriétés d'absorption du silicium. Le silicium est un semi-conducteur à gap indirect ($E_g = 1.12 \text{ eV}$ à **300 K**), ce qui signifie qu'un photon ne peut être absorbé qu'en impliquant simultanément un phonon pour conserver la quantité de mouvement. Ce processus à deux corps est moins probable qu'une absorption directe, d'où un coefficient d'absorption plus faible et la nécessité d'une épaisseur de matériau plus grande pour absorber suffisamment de photons.

IV.2.4 Couche tampon en Si : N

La couche Si:N est le silicium dopé de type N, obtenu par incorporation d'atomes de phosphore (groupe V de la classification périodique) dans la maille cristalline du silicium (groupe IV). Chaque atome de phosphore apporte un électron supplémentaire non lié à la liaison covalente qui devient librement mobile dans la bande de conduction. On parle d'atomes donneurs. Le résultat est une région où la densité d'électrons libres (porteurs majoritaires) dépasse de plusieurs ordres de grandeur celle des trous (porteurs minoritaires).

Dans l'architecture de la cellule, cette couche constitue l'émetteur : c'est la région qui, en contact avec la base Si:P, crée la jonction p-n. bien que fine (typiquement **50 à 300 nm**), son rôle est déterminant. La qualité cristalline de cette couche influence directement le taux de recombinaison des porteurs photogénérés : une densité élevée de défauts ou d'impuretés dans l'émetteur entraîne des pertes importantes car les électrons et les trous se recombinent avant d'être séparés par le champ de jonction.

IV.2.5 Contact avant d'Oxyde de Zinc (ZnO)

L'oxyde de zinc est un oxyde conducteur transparent (TCO) : un semi-conducteur à large bande interdite ($E_g \approx 3.4 \text{ eV}$) qui présente la remarquable propriété d'être à la fois électriquement conducteur et optiquement transparent dans le domaine du visible. Ce comportement paradoxal habituellement les bons conducteurs sont opaques est rendu possible

par le dopage intentionnel du ZnO (aluminium ou gallium) qui génère une densité élevée d'électrons libres sans absorber les photons visibles.

Dans la cellule solaire, le ZnO joue plusieurs rôles simultanément. Premièrement, il agit comme une fenêtre optique : les photons d'énergie inférieure à **3.4 eV** (soit toute la lumière visible et une partie de l'infrarouge proche) la traversent sans être absorbés, pour atteindre la jonction active en silicium. Deuxièmement, il assure la collecte et le transport latéral des charges photogénérés vers les doigts métalliques de la grille avant. Troisièmement, grâce à la différence d'indices de réfraction entre l'air ($n = 1$) et le ZnO ($n \approx 2$), il joue un rôle de couche anti-reflet, réduisant les pertes par réflexion en surface.

IV.3 Résultats et discussions

Pour optimiser la conception d'une structure à homojonction NIP de type ZnO/Si : N/Si : I/Si : P, il est nécessaire d'analyser et d'interpréter les résultats pour comprendre comment les paramètres physiques, telle que le dopage et l'épaisseur, affectent les performances du dispositif.

Le but de cette étude est d'examiner l'impact des trois couches sur l'efficacité électrique, à savoir le Si : N, Si : I et le Si : P tout en maintenant constants les paramètres de ZnO. Dans le cadre de notre simulation, nous avons modifié un paramètre à la fois, tout en maintenant inchangés ceux des autres niveaux.

Notre travail aura comme feuille de route l'étude d'influence des différents cas suivant la chronologie suivante :

- **Simulation d'une cellule en silicium standard** : à savoir une simple homojonction de type ZnO/Si : N/Si : P.
- **Variation de l'épaisseur de la couche tampon en Si : N** : Son étude est effectuée sur une gamme de **20 à 100 nm**. Cela nous a donné l'opportunité d'observer leur impact sur la performance de la cellule.
- **Variation du dopage de la couche tampon en Si : N** : Afin d'observer l'effet du dopage de la couche tampon Si : N, nous avons modifié le rapport Nd : de $1e^{17}$ à $1e^{19}$.
- **Variation de l'épaisseur de la couche d'absorbeur en Si : P** : L'étude porte sur une gamme variant de **0.5 à 1.5 (μm)**. Nous avons pu observer son impact sur la performance de la cellule.
- **Variation de la proportion de dopage de l'absorbeur en Si : P** : Afin d'observer l'effet du dopage de l'absorbeur Si : P, nous avons modifié le rapport Na : de $1e^{16}$ à $1e^{18}$.

Chapitre IV : Résultat et discussion

- **Variation de l'épaisseur de la couche intrinsèque Si : I :** l'ajout de la couche intrinsèque modifie globalement l'architecture de la cellule l'étude de l'épaisseur sur une gamme de **100 à 500 nm** nous permettra d'observer l'effet de ce dernier.

Les paramètres physiques attribués à chaque couche de la cellule solaire, tels qu'intégrés dans l'environnement de simulation du logiciel **WxAMPS-1D**, sont détaillés dans le **Tableau IV.1** ci-dessous :

Paramètre	ZnO	Si : N	Si : I	Si :P
Epaisseur (μm)	0.2	0.02-0.10	0.5-1.5	0.1-0.5
Permittivité (ev)	9	11.9	11.9	11.9
Bande interdite (eV)	3.3	1.12	1.12	1.12
Affinités des électrons χ (ev)	4.4	4.05	4.05	4.05
Densité d'effective Nc (cm^{-3})	2.2e^{18}	2.8e^{19}	2.8e^{19}	2.8e^{19}
Densité d'effective Nv (cm^{-3})	1.8e^{19}	1.04e^{19}	1.04e^{19}	1.04e^{19}
Mobilité des électrons U_n ($\text{cm}^2 \cdot \text{v}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	100	1350	1350	1350
Mobilité des électrons U_p ($\text{cm}^2 \cdot \text{v}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	25	450	450	450
Densité de dopage Nd (cm^{-3})	1e^{18}	3e^{17}	1e^{10}	0

Chapitre IV : Résultat et discussion

Densité de dopage Na (cm ⁻³)	0	0	1e ¹⁰	1e ¹⁸
--	---	---	------------------	------------------

Tableau IV.1 : Paramètres de la cellule solaire utilisés dans le logiciel WxAMPS-1D.
IV.3.1 Simulation d'une cellule en silicium standard

Afin de définir un point de référence nous avons commencé notre travail de simulation sur une cellule standard constituée d'une couche fenêtre en ZnO suivie d'une couche tampon en silicium de type N et une dernière couche en silicium de type les résultats obtenus sous répertorier dans le tableau IV.2.

Paramétrés de sortie	V _{co} (V)	I _{cc} (mA/cm ²)	FF (%)	EFF (%)
Cellule standard (ZnO(200nm)/Si :N(20nm)/Si :P(500nm))	0.80	36.71	81.23	24.10

Tableau IV.2 : Les paramètres sortie obtenus pour une cellule standard ZnO/Si:N/Si:P.

Les résultats obtenus dans cette première étape vont être un point de référence pour les simulations avenir dans cette partie de notre travail. Afin de voir l'impact la couche intrinsèque ainsi que les dopages et les épaisseurs des couches tampon et absorbeur.

IV.4 Simulation d'une cellule en silicium NIP

Pour fabriquer une cellule solaire NIP à partir d'une cellule solaire standard il faut insérer une couche intrinsèque additionnelle entre la couche N et P, soit un empilement de trois couches : une couche N (dopée négativement), une couche I (intrinsèque, non dopée) et une couche P (dopée positivement). La lumière pénètre par la face N et se propage dans l'ensemble de la structure. Cette architecture est particulièrement utilisée dans les cellules en couches minces à

Chapitre IV : Résultat et discussion

base de silicium amorphe ou bien monocristallin comme le cas présent, car elle permet de réduire les recombinaisons et d'améliorer la collecte des porteurs.

IV.4.1 L'effet de l'épaisseur du Si : N

Dans cette partie nous procéder à l'étude de l'effet de l'épaisseur de la couche tampon sur les performances de la cellule photovoltaïque. Les paramètres obtenus en fonction de la variation de l'épaisseur de la couche tampon Si:N sont représentés dans le tableau IV.3.

Epaisseur du Si : N (nm)	20	40	60	80	100
V _{co} (V)	0.80	0.80	0.79	0.79	0.78
I _{cc} (mA/cm ²)	36.71	36.86	36.99	37.10	37.19
FF (%)	81.23	81.76	82.13	82.38	82.56
EFF (%)	24.10	24.12	24.14	24.16	24.17

Tableau IV.3 : Les paramètres obtenus en fonction de la variation de l'épaisseur la densité de dopage de la couche tampon Si:N.

L'influence de l'épaisseur de la couche tampon Si : N sur les caractéristiques de la cellule est représentée sur la figure IV.2.

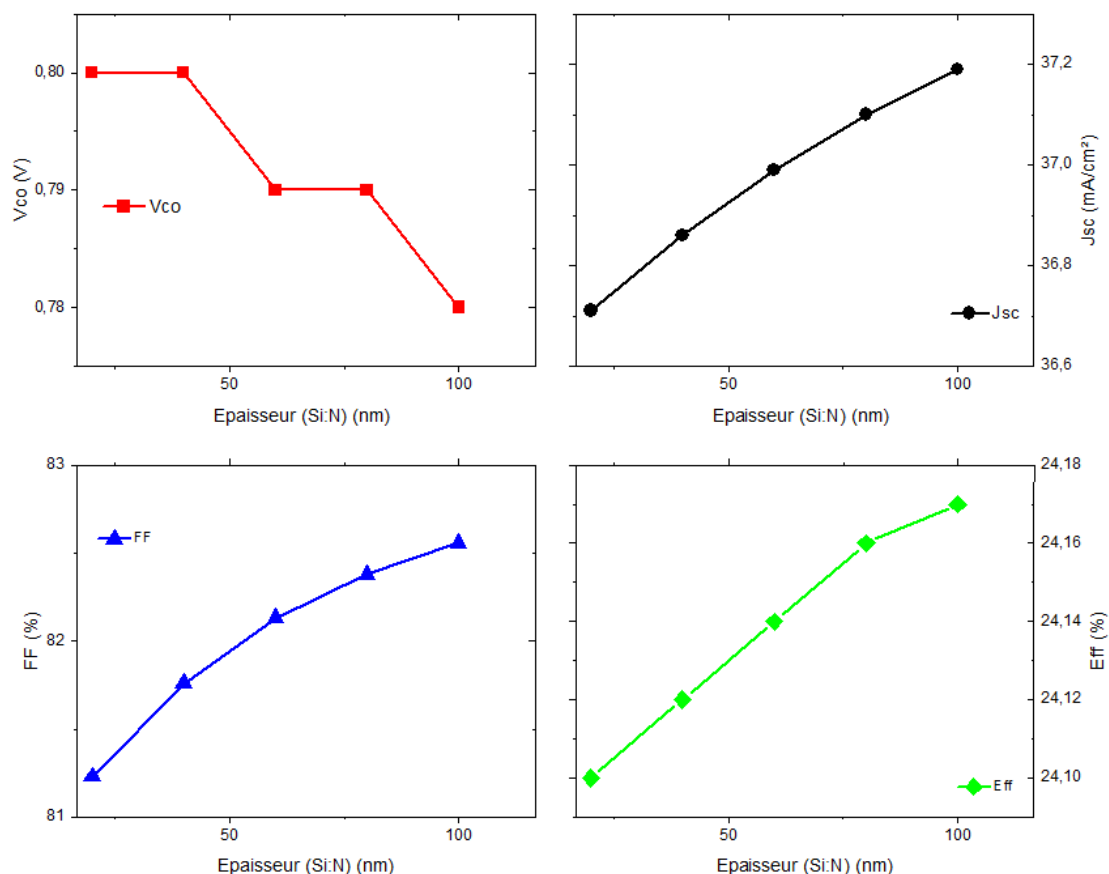


Figure IV.2 : Influence de l'épaisseur de la couche tampon Si : N sur les caractéristiques de la cellule.

Nous pouvons remarquer, à travers les résultats illustrés, que le V_{co} diminue. Il diminue de 0,80 V à 0,78 V. Cela se produit lorsque l'épaisseur de Si: N augmente. Cette augmentation de la couche émettrice de 20 à 100nm crée une absorption des photons à haute énergie. Elle ne les convertit pas efficacement. Cela augmente les recombinaisons de surface. Le J_{sc} augmente régulièrement de 36,7 à 37,2 mA/cm^2 , ce qui s'explique par un meilleur effet de passivation de la couche n sur la surface avant pour des épaisseurs modérément élevées. Le facteur de forme présente une amélioration de 81,3 % à 82,8 % avec l'augmentation de l'épaisseur, ce qui reflète une amélioration du transport des charges et une réduction des résistances de contact. L'efficacité de conversion lumineuse augmente légèrement, passant de **24,10 %** à **24,17 %**,

Chapitre IV : Résultat et discussion

malgré la baisse de V_{co} , mais grâce aux gains combinés de J_{sc} et FF, la variation totale d'efficacité est croissante mais reste cependant très faible de l'ordre de **(0,07 %)**.

IV.4.2 L'étude de l'effet du dopage du Si : N

Nous conservant une épaisseur de la couche tampon en Si : N a **100 nm** et nous étudions maintenant l'effet du dopage de cette couche sur les performances de la cellule.

Le rapport Nd (cm^{-3})	1e^{17}	5e^{17}	1e^{18}	5e^{18}	1e^{19}
V_{co} (V)	0.78	0.81	0.81	0.82	0.82
I_{cc} (mA/cm^2)	37.19	37.18	37.18	37.18	37.18
FF (%)	82.56	81.07	80.59	80.12	80.05
EFF (%)	24.17	24.50	24.56	24.62	24.63

Tableau IV.4 : Les paramètres obtenus en fonction de la variation de la densité de dopage de la couche tampon Si:N.

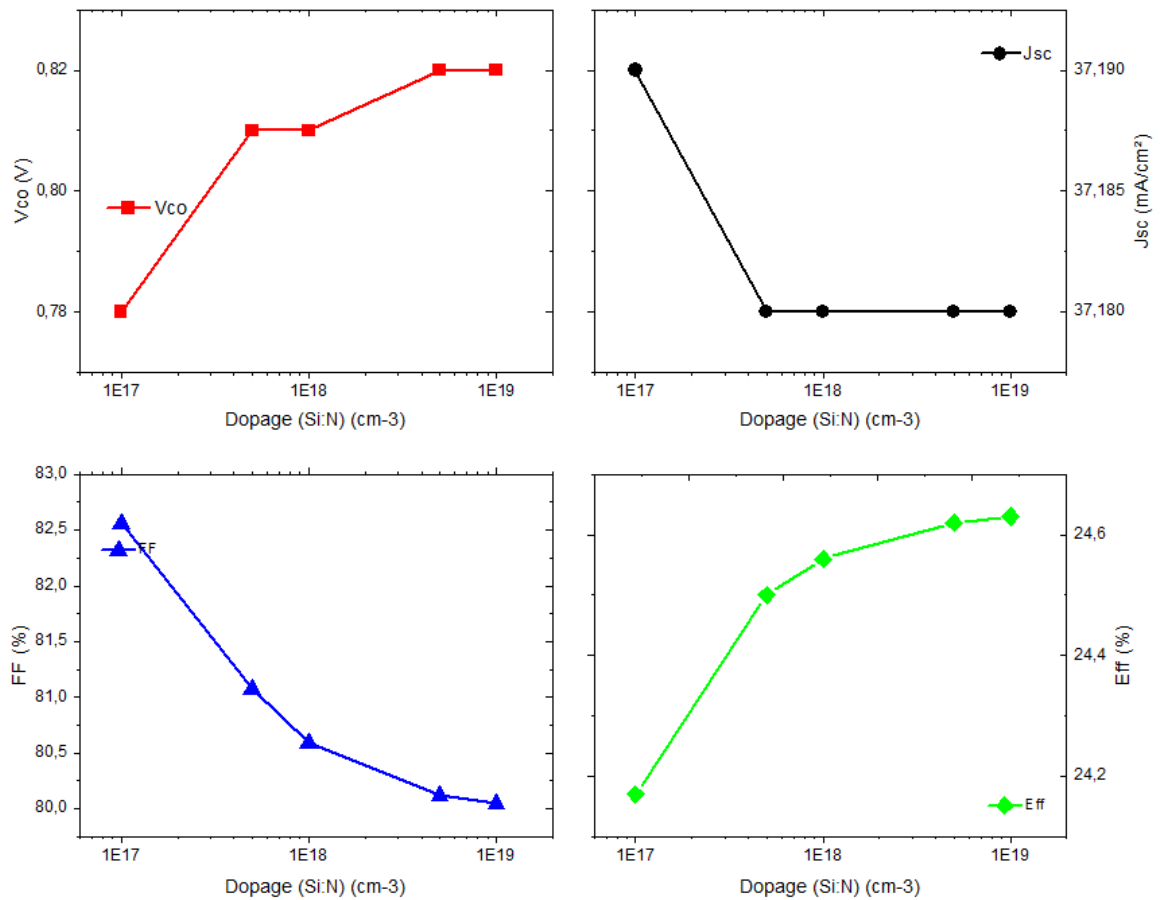


Figure IV.3 : Influence de la densité de dopage de la couche tampon Si:N sur les caractéristiques.

D'après les résultats illustrent dans le Tableau IV.4 et la figure IV.3, Le dopage de la couche Si: N entraîne une augmentation du champ électrique interne à la jonction, ce qui réduit la recombinaison des porteurs minoritaires et favorise une meilleure séparation des charges. Cela se traduit par une hausse progressive de la tension de circuit ouvert allant de 0,78 V à 0,82 V. une faible baisse de la valeur de la densité de courant de 37,19 à 37,18 mA/cm² est observée pour des dopages supérieurs à 10¹⁷ cm⁻³, suivie d'une stabilisation. Cette légère diminution est attribuable à l'augmentation de la recombinaison dans la couche fortement dopée, qui absorbe une moindre quantité de photons utiles. Le FF décroît de manière linéaire de **82,5 % à 80,1 %**, ce qui indique qu'un dopage excessif de l'émetteur introduit des résistances en série et des recombinaisons supplémentaires qui dégradent la qualité du transport des charges. Malgré cette baisse, EFF augmente de **24,2 % à 24,6 %**, ce qui démontre que le gain apporté par l'amélioration de V_{co} compense largement la perte sur le FF et le très léger déclin de J_{sc} . Un dopage optimal se situant entre 10¹⁸ et 10¹⁹ cm⁻³ est ainsi suggéré pour cette couche.

Chapitre IV : Résultat et discussion

IV.4.3 L'étude de l'effet du l'épaisseur du Si : P

Les simulations précédentes nous ont permis de fixe l'épaisseur et le dopage de la couche Si : N à 100 nm et $1e^{19} \text{ cm}^{-3}$ nous allons explorer dans cette partie l'effet de l'épaisseur de la couche Si : P.

Epaisseur du Si : P (nm)	500	750	1000	1250	1500
V _{co} (V)	0.82	0.81	0.80	0.79	0.78
I _{cc} (mA/cm ²)	37.18	38.04	38.38	38.54	38.61
FF (%)	80.05	79.59	79.56	79.72	79.89
EFF (%)	24.63	24.64	24.49	24.33	24.17

Tableau IV.5 : Influence de l'épaisseur de la couche absorbante Si:P sur les caractéristiques de la cellule.

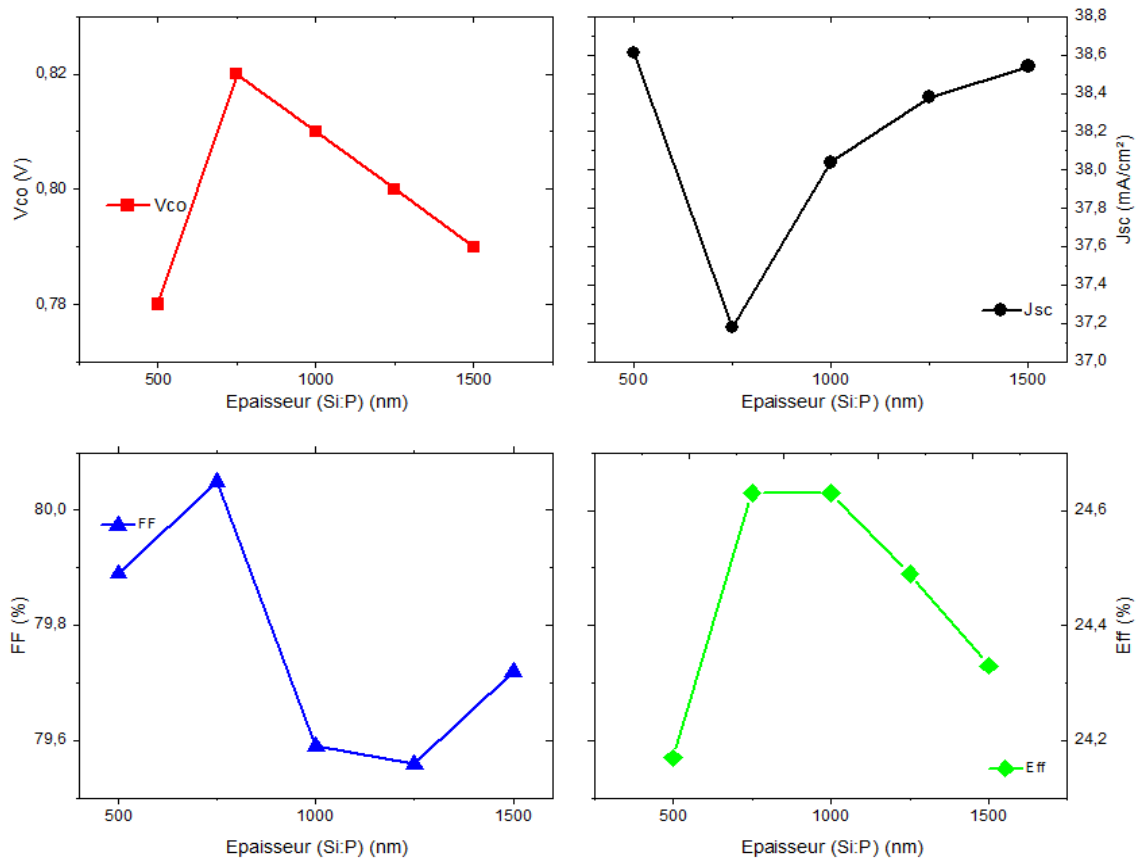


Figure IV.4 : Influence de l'épaisseur de la couche Si:P sur les caractéristiques de la cellule.

Le V_{co} présente un maximum de 0,82 V à 750 nm, puis décroît jusqu'à 0,79 V à 1 500 nm, ce qui indique qu'une couche p trop épaisse génère davantage de recombinaisons en volume qui annulent l'optimisation obtenu auparavant. Le courant de court-circuit (J_{sc}) suit un profil en « V » avec un minimum marqué à 750 nm (37,15 mA/cm^2), ce qui est caractéristique et résulte d'une augmentation locale des recombinaisons. Le FF présente un comportement non linéaire, avec un pic à **80,1 %** vers 750 nm et un minimum à **79,6 %** autour de 1 000 à 1 100 nm, ce qui reflète une lutte entre la résistance en série (qui augmente avec l'épaisseur) et la qualité du champ électrique interne. L'Eff montre un maximum autour de 750 à 1 000 nm (**24,6 %**), puis décroît à **24,3 %** pour 1 500 nm, confirmant ainsi l'existence d'une épaisseur optimale pour la couche Si: P aux alentours de 750 nm, au-delà de laquelle les pertes par recombinaison dominant et dégradent les performances.

Chapitre IV : Résultat et discussion

IV.4.4. L'étude de l'effet du dopage du Si : P

L'étude se focalise maintenant sur l'effet du dopage de la couche Si : P après avoir fixé les paramètres précédant à la valeur optimale.

Le rapport Na (cm ⁻³)	1e ¹⁶	5e ¹⁶	1e ¹⁷	5e ¹⁷	1e ¹⁸
V _{co} (V)	0.82	0.85	0.86	0.89	0.90
I _{cc} (mA/cm ²)	38.04	38.04	38.04	38.04	38.04
FF (%)	83.88	85.66	86.08	86.69	86.93
EFF (%)	26.37	27.82	28.43	29.65	30.02

Tableau IV.6 : Les paramètres obtenus en fonction de la variation de la densité de dopage de la couche absorbante Si :P.

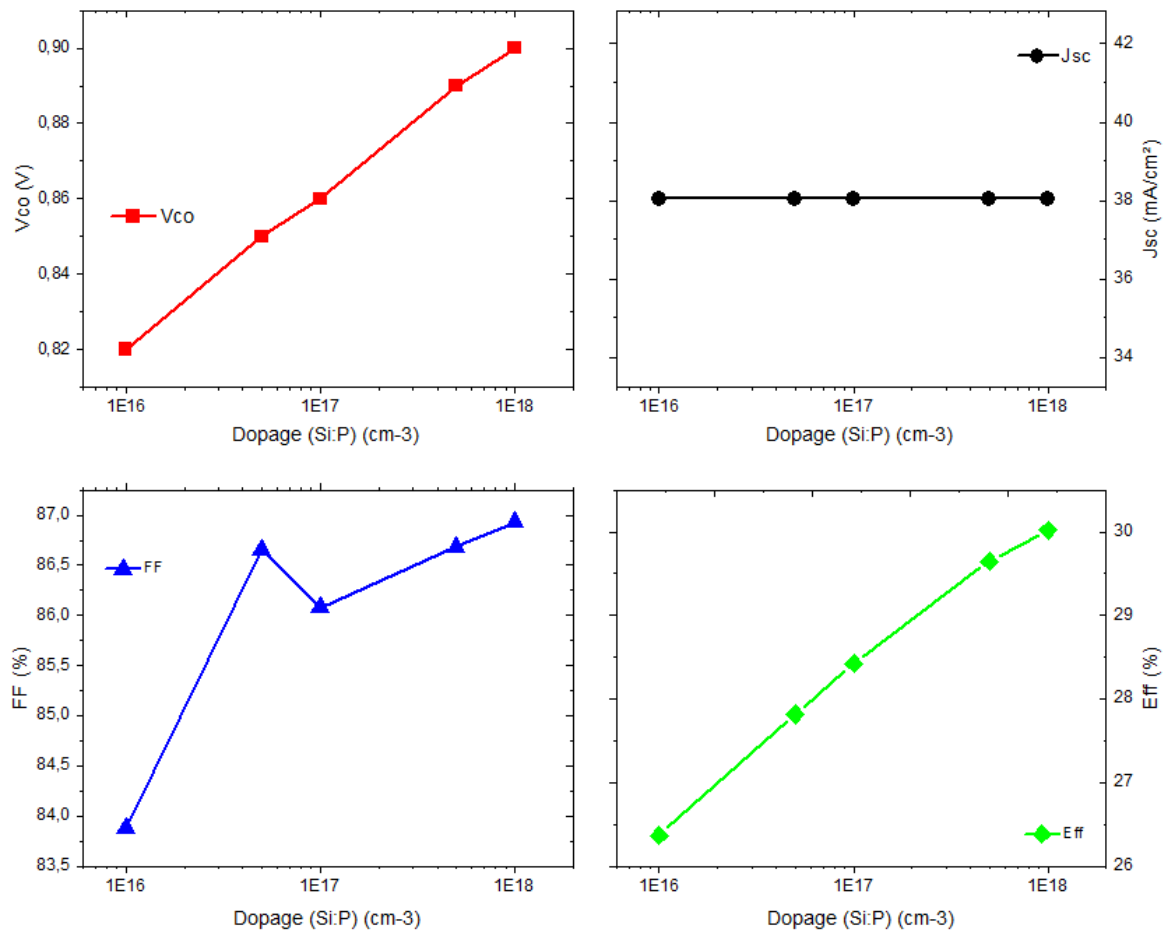


Figure IV.5 : Influence de la densité de dopage de la couche absorbante Si:P sur les caractéristiques de la cellule.

Selon les résultats présentés dans le tableau IV.6 et la figure IV.5, la tension de circuit ouvert présente une forte croissance, passant de 0,82 V à 0,90 V, ce qui traduit une augmentation progressive du champ interne de la jonction grâce à une densité de trous plus élevée dans la couche P. alors que le courant de court-circuit reste pratiquement constant à environ 38 mA/cm² sur toute la gamme étudiée (de 10¹⁶ à 10¹⁸ cm⁻³), indiquant que le dopage de cette couche n'affecte pas significativement la collecte des photo porteurs dans la plage considérée. FF présente un comportement complexe avec un pic à 86,7 % vers 10¹⁶cm⁻¹, puis une légère baisse avant de réaugmenter pour atteindre son maximum à 87 % ; ce comportement reflète la lutte entre la mobilité des porteurs et la recombinaison en fonction du dopage. L'efficacité présente une progression significative de ~26,3 % à ~30 %, principalement attribuable à l'optimisation de V_{co}, corroborant l'hypothèse selon laquelle l'accroissement du champ interne près de la couche absorbante s'avère bénéfique, un dopage de 10¹⁸ cm⁻³ est ainsi suggéré pour cette couche.

Chapitre IV : Résultat et discussion

IV.4.5 L'étude de l'effet du l'épaisseur de la couche Intrinsèque

Pour conclure notre travail notre attention est portée sur l'effet de la couche intrinsèque sur l'optimisation des paramètres de sorties. Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau IV.6 et illustrée dans la figure IV.6.

Epaisseur du Si : P (nm)	100	200	300	400	500
V _{co} (V)	0.87	0.88	0.88	0.89	0.90
I _{cc} (mA/cm ²)	35.66	36.70	37.46	37.92	38.04
FF (%)	86.71	86.76	86.84	86.86	86.93
EFF (%)	27.14	28.11	28.91	29.53	30.20

Tableau IV.6 : Influence de l'épaisseur de la couche intrinsèque Si:I sur les caractéristiques de la cellule.

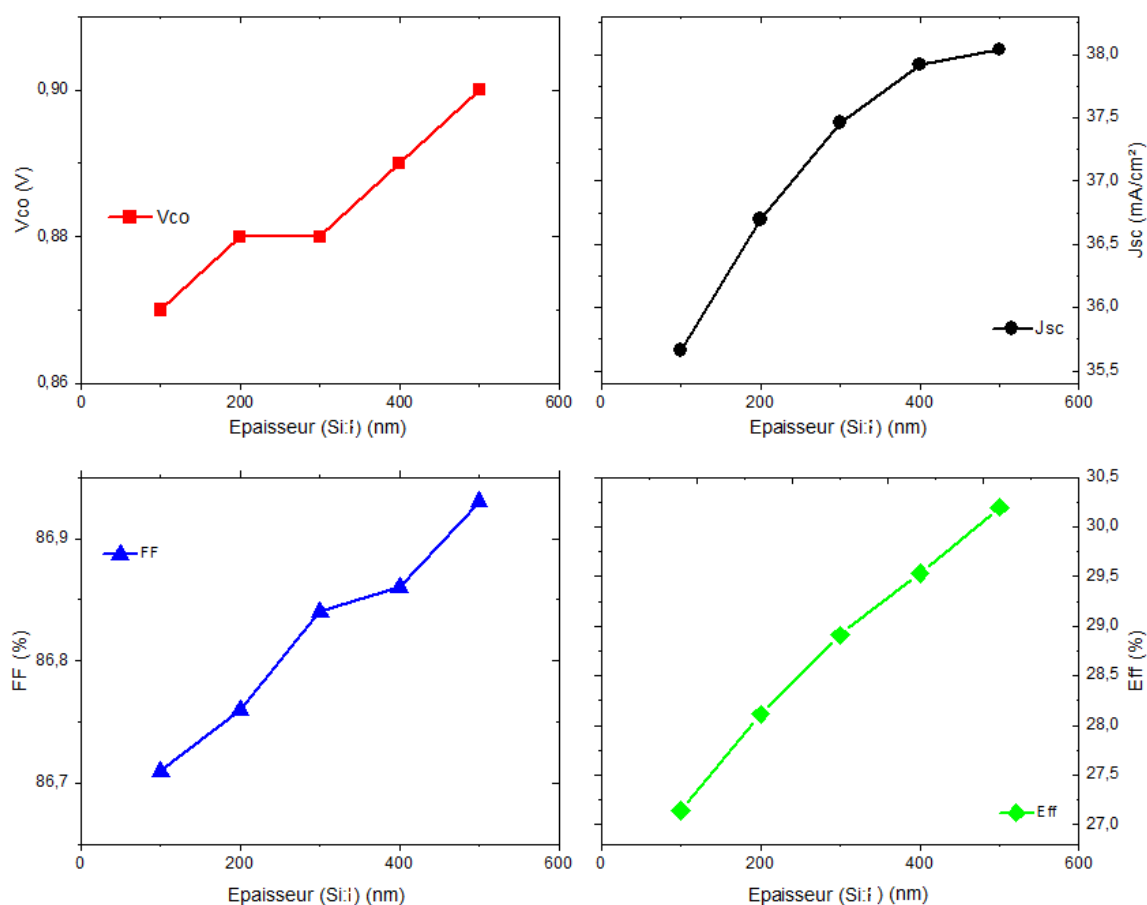


Figure IV.6 : Influence de l'épaisseur de la couche intrinsèque Si:I sur les caractéristiques de la cellule.

Nous pouvons constater que le V_{co} croît de 0,87 V à 0,90 V lorsque l'épaisseur augmente de 100 à 500 nm, cela car une couche intrinsèque plus épaisse agit comme une meilleure barrière aux recombinaisons aux interfaces, ce qui améliore la qualité des contacts. J_{sc} connaît la plus grande augmentation compare aux autres paramètres, passant de 35,8 à 38,0 mA/cm², car une couche intrinsèque plus épaisse absorbe davantage de photons et génère ainsi plus de paires électron-trou, créant également un champ magnétique interne plus fort aidant à la séparation des charges au niveau de cette couche. Le Facteur de Forme présente une légère amélioration, passant de **86,72 %** à **86,93 %**, ce qui suggère que l'épaississement de la couche intrinsèque réduit les pertes de transport sans introduire de résistance série significative dans cette plage. L'efficacité de conversion augmente fortement, passant de **27,1 %** à **30,3 %**, principalement grâce à l'augmentation considérable de J_{sc} ; ce résultat souligne l'importance déterminante de l'épaisseur de la couche absorbante sur les performances globales de la cellule NIP.

IV.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons utilisé le simulateur WxAMPS.1D pour simuler une cellule solaire à base de ZnO:Si : N/Si : I/Si : P dans le but d'optimiser son rendement électrique. Nous avons analysé l'effet de l'épaisseur et du dopage des deux couches : Si : N (tampon) et Si : P (absorbeur), ainsi que l'épaisseur de la couche Si : I en gardant les paramètres de la couche ZnO (fenêtre) fixe, et leur impact sur les caractéristiques I-V et l'efficacité de conversion.

D'après les résultats obtenus dans notre simulation par la cellule NIP, une optimisation par rapport à la cellule en silicium standard est évidente, affichant un rendement de **30.20 %** (**V_{co}= 0.90 V, J_{cc}=38.04 mA/cm², FF=86.93%**) par rapport à (**V_{co}= 0.80 V, J_{cc}=36.71 mA/cm², FF=81.23% et Eff = 24.10 %**) pour la cellule standard, soit une optimisation de 6% dans le rendement de conversion grâce à l'insertion de la couche intrinsèque qui a permis d'élargir le champ dans zone de déplétion générant ainsi un flux de déplacement de porteurs plus important, résultant sur un courant de sortie plus important (une augmentation de $\approx 2 \text{ mA/cm}^2$) mais aussi un nous avons constaté que les deux paramètres, dopage et épaisseur des couche tampon et absorbeur ont un impact très significatif sur l'amélioration du rendement de la conversion électrique une étude de simulation bien établie permettra au technologue d'utiliser les dopages et les épaisseur les plus optimaux dans la réalisation expérimentale de ce type de dispositif électronique.

Conclusion Générale :

Pour conclure, nos recherches ont montré à quel point la simulation numérique et le réglage précis des paramètres physiques sont essentiels pour surmonter les limites actuelles des panneaux solaires. Nous avons étudié et optimisé une cellule solaire en silicium cristallin avec une configuration NIP (ZnO/Si:N/Si:I/Si:P) à l'aide du logiciel WxAMPS-1D. nos simulations ont révélé que l'architecture NIP est plus efficace que la cellule solaire standard en silicium. En effet, l'ajout d'une couche intrinsèque (Si:I) a élargi le champ électrique interne dans la zone de déplétion, ce qui a augmenté le flux de porteurs et réduit les pertes par recombinaison. Cette optimisation de la géométrie et de l'électronique a nettement amélioré les performances. Le rendement de conversion photovoltaïque de la structure NIP optimisée est de 30,20 %, contre 24,10 % pour la structure standard. Notre analyse systématique a montré que les variations d'épaisseur et de taux de dopage des couches tampons (Si:N) et absorbeurs (Si:P) ont une grande influence sur le transport des charges. Un dopage optimal permet d'augmenter la tension en circuit ouvert (V_{co}), tandis qu'un ajustement précis des épaisseurs permet de maximiser la densité de courant de court-circuit (J_{cc}) sans introduire de résistance série préjudiciable.

Cette étude théorique et numérique offre des conseils précieux aux technologues et expérimentateurs. Elle leur indique les dimensions et les concentrations optimales à utiliser lors de la création concrète de dispositifs électroniques de ce type. il reste encore des défis technologiques à relever à l'échelle industrielle, mais les résultats obtenus sont encourageants. Les performances obtenues sont prometteuses et ouvrent la voie au développement de cellules solaires à haut rendement et à faible coût. Cela renforce l'importance du solaire comme solution durable pour l'autonomie énergétique de demain. Le solaire offre une solution durable pour l'avenir.

Références et bibliographies

Références et bibliographies

- [1] M. Andre, "Perspective multidimensionnelle de l'échec de leur déploiement," Rapport/Article, n.d.
- [2] M. Mounira, "Récupération des déperditions d'énergie dans les complexes industriels et leur conversion en énergie électrique exploitable," Thèse de doctorat/magister, Université Badji Mokhtar Annaba, 2014.
- [3] A. Rojey, *Énergie & climat: réussir la transition énergétique*. Paris: Editions Technip, 2008.
- [4] J. de Soutenance, "Energie photovoltaïque," Mémoire de fin d'études, n.d.
- [5] "Vey Electricite - Photovoltaïque," [En ligne]. Disponible sur: <https://www.vey-electricite.com/photovoltaïque/>. [Accédé le: 16-Jul-2026].
- [6] P. Guetat, "Nucléaire: entre réalités et émotions," Rapport/Article, n.d.
- [7] B. Ouiza, "Traitement d'image MSG application au rayonnement solaire," Mémoire, 2011.
- [8] "Spectra of Earth - SEOS Project," [En ligne]. Disponible sur: <https://seos-project.eu/earthspectra/earthspectra-c03-p01.fr.html>. [Accédé le: 16-Jul-2026].
- [9] L. El Hadramy, "Analyse et Modélisation d'un Capteur Cylindro-Parabolique," Thèse/Mémoire, 2017.
- [10] L. El Hadramy, "Analyse et Modélisation d'un Capteur Cylindro-Parabolique," Thèse/Mémoire, 2017.
- [11] S. Belharrat, "Production et gestion de l'énergie solaire photovoltaïque adaptée à une maison," Thèse/Mémoire, 2010.
- [12] C. Mersier, "Les centrales électrosolaires à tour. Optimisation du champ de réflecteurs et application à l'effet de taille du champ," *Revue de Physique Appliquée*, vol. 14, no. 1, pp. 1-20, 1979.
- [13] C. Mersier, "Les centrales électrosolaires à tour. Optimisation du champ de réflecteurs et application à l'effet de taille du champ," *Revue de Physique Appliquée*, vol. 14, no. 1, pp. 1-20, 1979.
- [14] A. Zahia, "Etude de l'influence de la température sur la puissance de la cellule photovoltaïque," Thèse/Mémoire, 2021.
- [15] B. Nour Elhouda, "Prédiction des propriétés des cellules photovoltaïques à base de nouveaux matériaux semi-conducteurs," Thèse/Mémoire, 2020.
- [16] T. Menad et M. Hamid, "Etude de fonctionnement d'une cellule solaire GRATZEL," Mémoire de fin d'études, 2017.
- [17] F. Roux, "Etude du pompage optique du silicium par photoluminescence polarisée et photo-émission à basse énergie résolue en spin," Thèse de doctorat, 2008.
- [18] "Physics Chapter-FR," Guide/Livre, n.d.
- [19] A. Slamani, "Cours de physique des semi-conducteurs," Support de cours, Université, 2019.
- [20] S. Ghouali, "Polycopié de cours," Support pédagogique, 2015.
- [21] A. Amel, "Nouveau matériau: le verre dans le bâtiment," Thèse/Mémoire, 2018.
- [22] R. Hassouni, "Évaluation financière de la rentabilité d'un projet d'investissement," Mémoire, 2019.
- [23] S. É. Houedanou, "La gestion transfrontalière des forêts en Afrique de l'Ouest," Thèse/Rapport, 2015.
- [24] C. Mohamed, "Impact des matériaux sur l'environnement," Rapport/Mémoire, n.d.

Références et bibliographies

- [25] S. Petibon, "Nouvelles architectures distribuées de gestion et conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques," Thèse de doctorat, 2009.
- [26] K. Ahmed-Ali, "Magister en Physique," Thèse de magister, n.d.
- [27] L. Bechane, "Etude de l'amélioration des propriétés de matériaux semi-conducteurs pour des applications comme cellules photovoltaïques," Thèse de doctorat, 2022.
- [28] M. Bounouar, "Etude de la purification du silicium destiné à la réalisation de cellules photovoltaïques," Thèse/Mémoire, 2015.
- [29] "Familles technologiques: le silicium cristallin, les couches minces et les cellules organiques," Guide/Rapport, n.d.
- [30] F. Jay, "Nouveaux substrats de silicium cristallin destinés aux cellules photovoltaïque à haut rendement: cas du silicium mono-like et du dopage aux donneurs thermiques liés à l'oxygène pour les cellules à hétérojonction de silicium," Thèse de doctorat, 2016.
- [31] M. N. Grau, "Réalisation de nouvelles structures de cellules solaires photovoltaïques à partir de couches minces de silicium cristallin sur substrat de silicium préparé par frittage de poudres," Thèse de doctorat, 2012.
- [32] A. Hocine, "Étude des propriétés d'un matériau quasi-mono (mono-like) à base de silicium pour application photovoltaïque," Thèse/Mémoire, 2025.
- [33] B. Hamatchi, "Simulation et Optimisation des cellules solaires photovoltaïque à base de CdTe," Thèse/Mémoire, 2025.
- [34] A. Chatenet, "Mémoire d'Initiation à la Recherche," Rapport académique, n.d.
- [35] R. Ludovic, "Impression par laser (LIFT) de transistors organiques en films minces," Thèse/Mémoire, n.d.
- [36] D. Rutot et P. Dubois, "Les (bio) polymères biodegradables: l'enjeu de demain?," *Chimie Nouvelle*, no. 86, pp. 66-74, 2004.
- [37] H. Rouab et S. Boudjelida, "Étude et exploitation de l'énergie solaire dans le domaine de la production d'électricité," Mémoire de fin d'études, 2017.
- [38] M.-S. Salmi, "Relation structure propriétés dans les composites et les nanocomposites à base d'un polymère thermoplastique/silice," Thèse/Mémoire, 2025.
- [39] M. Louazel, "Choix technologiques et performances économiques: le cas de l'industrie," *Technologie et performances économiques*, p. 337, 1994.
- [40] F. Jany-Catrice, *La performance totale: nouvel esprit du capitalisme?*. Villeneuve-d'Ascq: Presses Universitaires du Septentrion, 2012.
- [41] T. Announ, "Simulation et optimisation des cellules solaires Photovoltaïque à base de CIGS," Thèse/Mémoire, 2025.
- [42] M. Yousra, "Propriétés optoélectroniques et magnétiques des chalcopyrites à base des métaux de transition pour des applications photovoltaïques," Thèse/Mémoire, n.d.
- [43] S. Magdouli, M.-A. Sylvestre, S. Etteieb, H. Bouafif, J. P. Chenel, et A. Kuzbik, "Crédits," Rapport/Document, n.d.
- [44] P. Bairoch, "Les trois révolutions agricoles du monde développé: rendements et productivité de 1800 à 1985," dans *Annales. Histoire, Sciences Sociales*, Cambridge University Press, 1989, pp. 317-353.
- [45] C. Leblay, "Le temps de l'écriture: genèse, durée, représentations," Rapport/Livre, 2011.
- [46] C. Chellaiah, "An optimal parameter extraction and crack identification method for solar photovoltaic modules," *Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 11, Jan. 2016.

Références et bibliographies

- [47] L. Alessio et al., "Chapitre 63 - Les métaux: propriétés chimiques et toxicité," Encyclopédie/Livre, 2025.
- [48] A. Derbali, "Élaboration et caractérisations physico-chimiques des couches minces de sulfure de zinc (ZnS) en vue d'applications photovoltaïques," Thèse de doctorat, 2018.
- [49] S. Lhimr, "Nouvelle Approche d'Elaboration de Matériaux Photovoltaïque et de Transfert d'Energie," Thèse/Mémoire, 2022.
- [50] C. Tamin, "Development of Kesterite (Cu₂ZnSnS₄) absorber material for solar cell application," Thèse de doctorat, Université, 2021.
- [51] D. Saad, "Effet de la décharge couronne sur les surfaces isolantes et les surfaces métalliques," Thèse/Mémoire, 2011.
- [52] "Solar Cell Technology BSF PERC TOPCON HJT IBC - Knowledge," DS New Energy, [En ligne]. Disponible sur: <https://www.dsnewenergy.com>. [Accédé le: 16-Jul-2026].
- [53] B. Brudieu, "Matériaux pour la gestion de la lumière fabriqués par voie liquide," Thèse de doctorat, 2015.
- [54] I. Bouchama et M. Dilmi, "Performance Study of InGaP/GaAs/Ge Tandem Solar Cells by Simulation," Thèse de doctorat, 2016. doi: 10.13140/RG.2.2.16262.73289.
- [55] R. Madelon, "Mesure du coefficient d'absorption et de la transmission dérivée dans Ga_{1-x}Al_xAs epitaxial," *Revue de Physique Appliquée*, vol. 14, no. 10, pp. 863-867, 1979.
- [56] A. Farhaoui, "Les oxynitrures de silicium déposés par pulvérisation en gaz réactif pulsé pour des dispositifs antireflets à gradient d'indice de réfraction," Thèse de doctorat, 2016.
- [57] S. Petibon, "Nouvelles architectures distribuées de gestion et conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques," Thèse de doctorat, 2009. (Note: Ce doublon de la référence [25] est conservé pour respecter votre liste d'origine).
- [58] I. d'Etat, "Mémoire de fin d'études," Mémoire d'ingénieur/master, 2012.
- [59] P. Silar, "Génétique: Concepts de Base et Notions Approfondies," Manuel/Support de cours, 2020.
- [60] E. Saintaimé, "Étude et modélisation des substrats ultra-minces de silicium et de leur application au photovoltaïque," Thèse de doctorat, 2020.
- [61] B. Martinez, "Étude des propriétés optoélectroniques de nanocristaux colloïdaux à faible bande interdite: application à la détection infrarouge," Thèse de doctorat, 2019.
- [62] E. Campo, *Microsystèmes communicants pour un habitat intelligent*. Paris: ISTE/Editions, 2003.
- [63] M. Abdelkader, "Docteur en Physique," Thèse de doctorat, 2017.
- [64] J. Molimard, *Dispositifs médicaux et capteurs*, vol. 14. London: ISTE Group, 2025.
- [65] P.-L. Meunier, "Optimisation des propriétés physiques des matériaux pour les composants électroniques," Thèse/Mémoire, 2019.