

REPUBLICQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi de Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département d'Electronique

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLÔME DE MASTER

FILIERE : électronique

Spécialité : Industries électroniques

Par

- **Chihani Bahmed**
- **Bourourou Mohammed**

Intitulé

Pérovskites sans plomb pour les applications photovoltaïques

Soutenu le : 03/07/2023

Devant le Jury composé de :

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>Mme. N. Bioud</i>	<i>MCA</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>Mme. F. Khaled</i>	<i>MCB</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>Mme. F. Farès</i>	<i>MCA</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

Année Universitaire 2022/2023

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à celle qui m'a donné la vie, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, à ma mère ...

A mon père, qui a été mon ombre durant toutes les années d'étude, qui a veillé à me donner l'aide, à m'encourager et à me protéger, que dieu les garde et les protège.

A mon adorable sœur et mon frère

A mes très chers amis

A tous ceux qui m'aiment

A tous ceux que j'aime

Je Dédie ce travail

A toutes les personnes qui sont chères à mon cœur, ceux dont les noms ne figurent pas sur cette liste.

Remerciements

Avant tout nous tenons à remercier
Dieu de nous avoir donné la force et le courage
pour mener à bien ce travail.

Nos vifs remerciements vont à notre encadreur :
Dr. Fahima khaled qui a fourni des efforts
énormes, par ses connaissances, ses conseils
et ses encouragements ,
partie de ce jury,
tous les enseignants du département d'électronique
et tous ceux qui furent à un moment ou à tout
instant partie prenante de ce travail.

Nos plus chaleureux remerciements à tous ceux
qui de près ou de loin ont contribué à la
réalisation de ce mémoire.

Sommaire

Introduction générale.....	1
I.1 Introduction :.....	3
I.2 Le principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques :.....	3
I.3 Les différentes couches d'une cellule solaire à jonction PN :.....	4
I.3.1 Texturation de surface :.....	4
I.3.2 Couche antireflet (CAR):.....	4
I.3.3 La Couche BSF (Back Surface Field) :.....	5
I.3.4 Les Contacts face avant et arrière :.....	5
I.4 Paramètres d'une cellule PV :.....	6
I.4.1 Paramètres physiques :.....	6
I.4.2 Le coefficient d'absorption :.....	6
I.4.3 Paramètres électriques :.....	7
I.5 les différentes filières photovoltaïques :.....	9
I.5.1 La première génération : le silicium cristallin (c-Si) :.....	9
I.5.2 La deuxième génération : les couches minces :.....	11
I.5.3 La troisième génération : les technologies émergentes :.....	12
I.6 Conclusion :.....	13
Chapitre II:.....	14
II.1 Introduction:.....	14
II.2 Matériaux pérovskites dans les cellules solaires :.....	14
II.3 Structure d'une cellule photovoltaïque à pérovskite :.....	14
II.4 Performances des cellules solaires à pérovskites :.....	15
II.5 Pérovskites à base de plomb :.....	17
II.6 Le simulateur Atlas TCAD Silvaco :.....	17
II.6.1 Présentation d'Atlas :.....	17
II.6.2 Ordres de commandes d'Atlas :.....	18
II.6.3 Les commandes fondamentales :.....	19

II.7 Conclusion :	21
Chapitre III:	22
III.1 Introduction :	22
III.2 Cellules de référence à base de MAPbI3 :	22
III.2.1 Description et simulation de la cellule :	22
III.2.2 Influence des paramètres géométriques sur les performances de la cellule :	26
III.2.3 Influence des paramètres physiques sur les performances de la cellule :.....	32
III.3 Cellules de référence à base de MASnI3 :	38
III.3.1 Description et simulation de la cellule :	38
III.3.2 Influence des paramètres géométriques sur les performances de la cellule :	41
III.3.3 Influence des paramètres physiques sur les performances de la cellule :.....	46
III.4 Comparaison entre deux cellules :	50
III.4.1 Caractéristiques électriques de deux cellule :	50
III.5 Conclusion.....	55
Conclusion générale.....	56

Listes des figures

Figure(I-1) : a) Fonctionnement d'un panneau photovoltaïque, b) zone de charge d'espace (Z.C.E.) [2].	3
Figure (I-2): Caractéristiques I(V) à l'obscurité et sous éclairement d'une cellule photovoltaïque.[7]	8
Figure(II-1) : Structure d'une cellule photovoltaïque à pérovskites (A) structure et (B) Image MEB montrant l'architecture d'une cellule solaire à hétérojonction planaire à base de matériaux pérovskites [4]	15
Figure(II-2): Les différentes structures d'une cellule à pérovskites (A) mésoscopique, (B) planaire et (C) inversée.	15
Figure(II-3): -(A) Structure de l'électrode avec la couche protectrice de graphène dopé avec AuCl ₃ et (B) travail de sortie et mobilité du graphène pur et du graphène dopé avec AuCl ₃ pour diverse concentration ND . [16]	16
Figure(II-4): Entrées/sorties du simulateur Atlas.	18
Figure(II-5): Ordre des groupes des commandes d'Atlas (Les commandes fondamentales afférentes) [19].	19
Figure(III-1) : Coefficient d'absorption (α) des couches utilisé.	24
Figure(III-2): Structure bidimensionnelle d'une cellule solaire MAPbI ₃ simulée sous Atlas-Silvaco.	25
Figure(III-3): Caractéristique densité de courant-tension J(V).	25
Figure(III-4): Caractéristique de puissance P(V).	26
Figure(III-5): Influence de l'épaisseur de l'absorbeur (MAPbI ₃) sur la caractéristique J(V).	27
Figure(III-6): Influence de l'épaisseur de l'absorbeur (MAPbI ₃) sur la caractéristique P(V).	27
Figure(III-7): Performances photovoltaïques de la cellule pour différentes épaisseurs de l'absorbeur.	28
Figure(III-8): Influence de l'épaisseur de la couche HTL sur la caractéristique J(V).	30
Figure(III-9): Influence de l'épaisseur de la couche HTL sur la caractéristique P(V).	30
Figure(III-10): Effet du dopage de la couche ETL sur la caractéristique j(V).	32
Figure(III-11): Effet du dopage de la couche ETL sur la caractéristique p(V).	33
Figure(III-12): Performances photovoltaïques de la cellule pour différentes valeurs de dopage de la couche ETL.	34
Figure(III-13): Effet du dopage de la couche HTL sur la caractéristique j(V).	36
Figure(III-14): Effet du dopage de la couche HTL sur la caractéristique p(V).	36
Figure(III-15): Performances photovoltaïques de la cellule pour différentes valeurs de dopage de la couche HTL.	37
Figure(III-16): Coefficient d'absorption (α) des couches utilisé.	39
Figure(III-17): Structure bidimensionnelle d'une cellule solaire MASnI ₃ simulée sous Atlas-Silvaco	40
Figure(III-18): Caractéristique densité de courant-tension J(V).	40
Figure(III-19): Caractéristique de puissance P(V).	41
Figure(III-20): Influence de l'épaisseur de l'absorbeur (MASnI ₃) sur la caractéristique J(V).	42
Figure(III-21): Influence de l'épaisseur de l'absorbeur (MASnI ₃) sur la caractéristique P(V).	42
Figure(III-22): Performances photovoltaïques de la cellule pour différentes épaisseurs de l'absorbeur.	43
Figure(III-23): Influence de l'épaisseur de la couche HTL sur la caractéristique J(V).	44
Figure(III-24): Influence de l'épaisseur de la couche HTL sur la caractéristique P(V).	45

Figure(III-25): Effet du dopage de la couche ETL sur la caractéristique $j(V)$	47
Figure(III-26): Effet du dopage de la couche ETL sur la caractéristique $p(V)$	47
Figure(III-27): Performances photovoltaïques de la cellule pour différentes valeurs de dopage de la couche ETL.	48
Figure(III-28): Effet du dopage de la couche HTL sur la caractéristique $j(V)$	49
Figure(III-29): Effet du dopage de la couche HTL sur la caractéristique $p(V)$	49
Figure(III-30): caractéristique $j(V)$ de la cellule a base MAPbI3 et MASnI3.....	51
Figure(III-31): caractéristique $p(V)$ de la cellule a base MAPbI3 et MASnI3.....	52
Figure(III-32): Performances photovoltaïques des deux cellules	53

Liste des Tableaux

Tableau(III-1): Paramètres des couches de la cellule solaire à base du MAPbI3 [20].....	23
Tableau(III-2): Les performances photovoltaïques de la cellule solaire.	26
Tableau(III-3): Performances photovoltaïques de la cellule pour différentes épaisseurs de l'absorbeur.	29
Tableau(III-4) : Performances photovoltaïques de la cellule pour différentes épaisseurs de la couche HTL.	31
Tableau(III-5): Performances photovoltaïques de la cellule différentes épaisseurs de la couche ETL.....	31
Tableau(III-6) : Performances photovoltaïques de la cellule pour différentes valeurs de dopage de la couche ETL.	Erreur ! Signet non défini.
Tableau(III-7): Performances photovoltaïques de la cellule différentes valeurs de dopage de la couche HTL.	37
Tableau(III-8): Paramètres des couches de la cellule solaire à base du MASnI3 [21].....	38
Tableau(III-9): Les performances photovoltaïques de la cellule solaire.	41
Tableau(III-10): Performances photovoltaïques de la cellule pour différentes épaisseurs de l'absorbeur.	Erreur ! Signet non défini.
Tableau(III-11): Performances photovoltaïques de la cellule pour différentes épaisseurs de la couche HTL.	45
Tableau(III-12): Performances photovoltaïques de la cellule pour différentes épaisseurs de la couche ETL.....	46
Tableau(III-13): Performances photovoltaïques de la cellule pour différentes valeurs de dopage de la couche ETL.	48
Tableau(III-14): Performances photovoltaïques de la cellule pour différentes valeurs de dopage de la couche HTL.	50
Tableau)III-15): Les performances photovoltaïques des deux cellules.....	53

Listes des symboles et abréviations

Abréviations

SILVACO	Silicon Valley Corporation.
TCAD	Technology Computer Aided Design.
AM1.5	Air Mass 1.5.

Symboles

I	Le courant (A).
V	La tension (V).
EQE	Le rendement quantique externe (%).
E_g	Largeur de la bande interdite (eV).
α	Le coefficient d'absorption (cm ⁻¹).
λ	La longueur d'onde de la lumière (μm).
J_{cc}	La densité du courant de court-circuit (mA/cm).
V_{co}	La tension de circuit ouvert (V).
FF	Le facteur de forme (%).
η	Le rendement de conversion (%).
V_m	La tension maximale (V).
I_m	Le courant maximal (A).
P_m	La puissance maximale (W).
q	La charge élémentaire ($1.6 \times 10^{-19}\text{C}$).
N_c	La densité d'états d'énergie des électrons dans la bande de conduction (cm ⁻³).

Nv	La densité d'états des trous dans la bande de valence (cm-3).
Nd	La concentration des atomes donneurs (cm-3).
Na	La concentration des atomes accepteurs (cm-3).
ϵ_r	La permittivité relative. χ_e Affinité électronique (eV).
ETL	Transport de trous.
ETL	Transport d'électrons.
J	Densité de courant.
P	Puissance.

Introduction Générale

Le développement des énergies renouvelables est devenu crucial pour répondre à la demande croissante en énergie tout en réduisant les émissions de gaz à effet de serre. L'énergie solaire photovoltaïque est l'une des formes les plus importantes d'énergie renouvelable, et elle utilise des cellules photovoltaïques pour convertir le rayonnement solaire en électricité. Bien que le potentiel de l'énergie solaire soit énorme, il reste encore beaucoup à faire pour exploiter pleinement cette source d'énergie.

Dans ce mémoire de master, nous nous concentrons sur l'étude des cellules solaires à base de matériaux pérovskites. Ces dernières ont connu une évolution importante au fil des ans, notamment avec la préparation de films minces de pérovskite organique et inorganique en 1998, ouvrant la voie à de nombreuses applications dans les appareils électroniques organiques. Cependant, des problèmes de stabilité ont été rencontrés, rendant les cellules solaires pérovskites moins fiables pour la production d'électricité.

Des avancées significatives ont été réalisées, notamment avec le développement de cellules solaires pérovskites durables et stables. Des rendements élevés ont été atteints, notamment avec des cellules solaires en tandem où la cellule pérovskite est combinée avec une cellule en silicium, permettant d'atteindre des rendements de 23,6% en 2019.

Dans ce travail, notre objectif est d'optimiser les épaisseurs des couches actives d'une cellule solaire standard à base de pérovskite. Le manuscrit est divisé en trois chapitres. Le premier chapitre présente des généralités sur les cellules solaires photovoltaïques, en expliquant les différents types de cellules, leur principe de fonctionnement et leurs caractéristiques électriques.

Le deuxième chapitre se concentre spécifiquement sur les cellules solaires pérovskites, en détaillant les méthodes de fabrication, le principe de fonctionnement et les technologies émergentes dans ce domaine.

Enfin, le dernier chapitre utilisé dans l'étude, présente la structure de la cellule solaire pérovskite simulée à l'aide du logiciel de simulation Silvaco où l'on discute des résultats obtenus afin d'optimiser les performances de la cellule en ajustant les épaisseurs des couches qui la constituent. Notre travail se termine bien sûr par une conclusion.

Chapitre I:

I.1 Introduction

L'effet photovoltaïque est un phénomène physique qui consiste en la conversion directe de la lumière en électricité à l'aide de matériaux semi-conducteurs.

Le principe de fonctionnement repose sur l'utilisation de cellules solaires composées de deux couches de matériaux semi-conducteurs, généralement du silicium. Lorsque la lumière frappe la surface de la cellule, les électrons dans la couche supérieure sont excités et se déplacent vers la couche inférieure, créant ainsi un courant électrique.

En 1975, K. W. Ford avait souligné que la quantité d'énergie solaire atteignant la surface de la Terre était 104 fois supérieure à la demande énergétique mondiale [1].

I.2 Le principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques

Dans une cellule photovoltaïque, l'énergie lumineuse est convertie en énergie électrique. Lorsque le rayonnement solaire atteint la cellule, les photons porteurs d'énergie sont absorbés par le matériau semi-conducteur, excitent les électrons qui se libèrent de leurs liaisons atomiques pour se déplacer librement dans le matériau. La Figure(I-1) b) illustre ce phénomène [2].

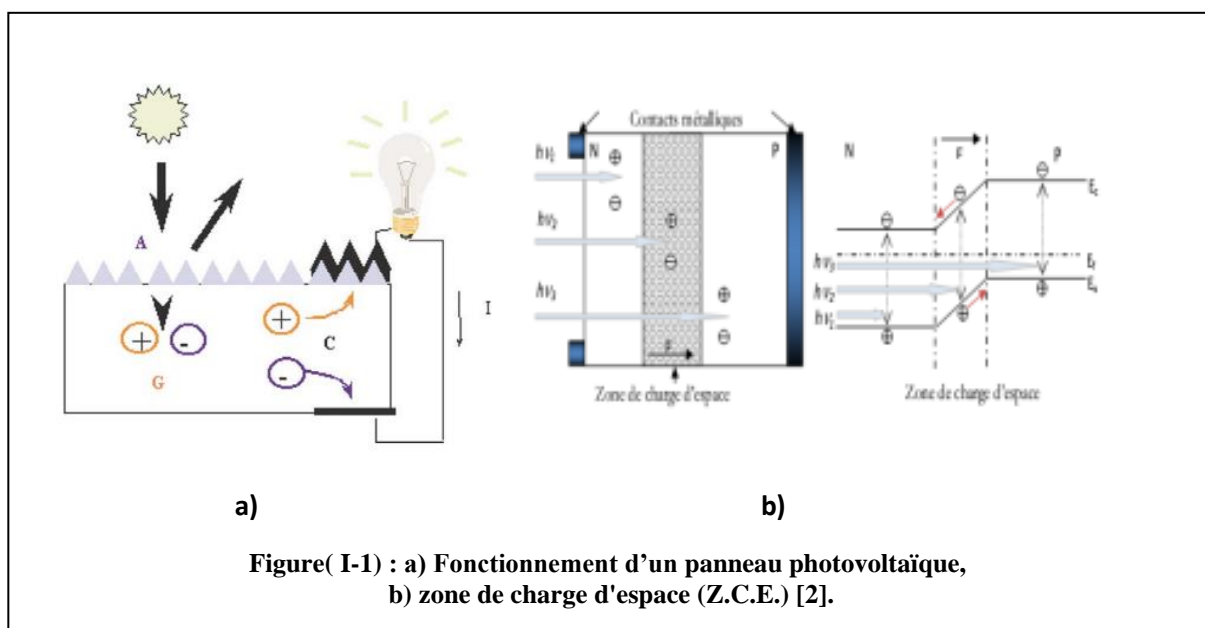


Figure (I-1) : a) Fonctionnement d'un panneau photovoltaïque, b) zone de charge d'espace (Z.C.E.) [2].

- Les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace (Z.C.E.) sont envoyés par le champ électrique dans la zone P (pour les trous) ou dans la zone N (pour les électrons) où ils seront majoritaires. On aura un photocourant de diffusion,
- Les paires électrons trou créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique : les électrons vont aller vers la région N, les trous vers la région P. On aura un photocourant de génération [1]

I.3 Les différentes couches d'une cellule solaire à jonction PN

I.3.1 Texturation de surface :

La texturation de la surface d'une cellule photovoltaïque consiste à créer des structures microscopiques ou nanostructurées sur sa surface afin d'améliorer l'efficacité de la collecte de la lumière incidente. Cette technique réduit les réflexions de la lumière à la surface de la cellule en augmentant sa rugosité. Les structures texturées permettent de piéger la lumière incidente et de la diriger vers la région active de la cellule, augmentant ainsi les chances d'absorption. La forme et les dimensions des structures dépendent du type de cellule photovoltaïque et des matériaux utilisés.

En général, la texturation de la surface d'une cellule photovoltaïque vise à maximiser l'absorption de la lumière et à augmenter son efficacité de conversion de l'énergie solaire en électricité, ce qui en fait une technique couramment utilisée dans l'industrie photovoltaïque pour améliorer les performances des cellules solaires.

I.3.2 Couche antireflet (CAR)

Pour réduire la réflexion de la lumière à la surface avant d'une cellule photovoltaïque, une couche anti-réfléchissante (CAR) est appliquée. Différents matériaux sont utilisés pour les couches anti-réfléchissantes en photovoltaïque, tels que le TiO_2 , SiO_2 , ZnS , MgF_2 et SiN_x , qui sont isolants, ainsi que le ZnO ou l'ITO, qui sont conducteurs. La réflectivité dépend de l'indice de réfraction du matériau, de l'épaisseur de la couche appliquée, de l'angle d'incidence et de l'état de polarisation du rayon incident. En choisissant une épaisseur spécifique de la couche diélectrique, il est possible de minimiser la réflexion de la lumière incidente.

I.3.3 La Couche BSF (Back Surface Field)

La couche BSF (Back Surface Field), ou barrière de champ arrière, est une couche située sur la face arrière d'une cellule photovoltaïque. Son objectif principal est d'améliorer l'efficacité de collecte du courant en réduisant les pertes de recombinaison à la surface arrière. La couche BSF est généralement composée d'un matériau dopé, tel que le phosphore ou le bore, qui crée une région de type p ou n à la surface arrière de la cellule. Cette région crée une barrière de potentiel qui empêche les porteurs de charge minoritaires de recombiner à la surface arrière, augmentant ainsi l'efficacité de collecte du courant et le rendement global de la cellule.

La couche BSF est généralement associée à un contact arrière métallique pour faciliter la collecte du courant généré et réduire les pertes de courant électrique causées par les phénomènes de recombinaison et de diffusion à la surface arrière. La conception et l'optimisation de la couche BSF sont des éléments essentiels dans le développement de cellules photovoltaïques à haut rendement, et différentes techniques et matériaux peuvent être utilisés en fonction du type de cellule et des technologies spécifiques utilisées.

I.3.4 Les Contacts face avant et arrière

Les contacts de la face avant et de la face arrière jouent un rôle crucial dans la capture et la collecte du courant électrique généré par une cellule photovoltaïque. La face avant, exposée au soleil, est conçue pour maximiser l'absorption de la lumière et minimiser la réflexion. Le contact avant, généralement réalisé avec un matériau transparent et conducteur comme l'oxyde d'indium-étain (ITO), permet à la lumière solaire de pénétrer jusqu'à la région active de la cellule tout en offrant un chemin conducteur pour le courant généré.

La face arrière de la cellule photovoltaïque, située à l'opposé de la face avant, a pour principale fonction de collecter le courant généré par l'absorption de la lumière dans la région active de la cellule. Le contact arrière est généralement composé d'un métal tel que l'aluminium ou l'argent, offrant une bonne conductivité électrique. Ce contact métallique forme une couche continue qui recouvre toute la surface arrière de la cellule, permettant un chemin de faible résistance pour le courant qui sort de la cellule. De plus, le contact arrière agit comme une

surface réfléchissante, aidant à piéger et à rediriger les photons qui traversent la région active sans être initialement absorbés.

La combinaison des contacts avant et arrière dans une cellule photovoltaïque permet une collecte et une extraction efficaces du courant électrique généré par l'absorption de la lumière. La conception et l'optimisation de ces contacts sont donc essentielles pour maximiser les performances globales de la cellule et son rendement de conversion.

I.4 Paramètres d'une cellule PV :

Pour élaborer ou caractériser une cellule solaire, un ensemble de paramètres physiques, technologiques et photovoltaïques sont à connaître ou à calculer.

I.4.1 Paramètres physiques :

I.4.2 Le coefficient d'absorption :

Dans la plupart des dispositifs organiques, seule une petite partie de la lumière incidente est absorbée parce que la bande interdite est trop élevée. Une bande interdite de 1,1 eV (1100 nm) est nécessaire pour absorber 77 % du rayonnement solaire sur terre, alors que la majorité des polymères semi-conducteurs ont des bandes interdites supérieures à 2,0 eV (600 nm), ce qui limite l'absorption possible à environ 30 %. La couche organique est trop fine. Les faibles mobilités des porteurs de charge et des excitons nécessitent une épaisseur de couche de l'ordre de 100 nm. Heureusement, le coefficient d'absorption des matériaux organiques est généralement beaucoup plus élevé que celui du silicium, de sorte que seuls 100 nm environ sont nécessaires pour absorber entre 60 et 90 % si un contact arrière réfléchissant est utilisé [3].

I.4.2.1 Le coefficient de réflexion :

Dans le cas de la photopile idéale on fera l'hypothèse que 100 % du rayonnement pénètre dans le matériau, sachant qu'en réalité il faudra tenir compte de la réflexion sur la face avant et de l'absorption du verre protecteur, de la réflexion due au changement d'indice, et de la perte de surface active due à l'ombre portée par les grilles métalliques de collecte. Les revêtements antireflets utilisés dans les dispositifs inorganiques pourraient alors s'avérer utiles une fois que

d'autres pertes telles que la recombinaison deviendront moins dominantes. La surface des dispositifs peut également être structurée comme dans la figure 1[3].

I.4.3 Paramètres électriques :

I.4.3.1 Courant de court-circuit (I_{cc}) :

Le courant de court-circuit est le courant qui circule dans une cellule lorsqu'elle est court-circuitée et exposée à la lumière. Il augmente proportionnellement à l'intensité lumineuse et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde de la lumière, de la mobilité des charges électriques [3]. Dans le cas idéal (avec une résistance interne R_s nulle et une résistance externe R_h infinie), ce courant se confond avec la photo courant I_{ph} dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation (I.2) [5] .

$$I_{cc} = I_{ph} / [1 + \frac{R_s}{R_{sh}}] \quad (I.2)$$

I.4.3.2 Tension de circuit-ouvert (V_{co}) :

La tension de circuit ouvert (V_{co}) est la tension maximale fournie par une cellule lorsqu'aucun courant ne circule à travers elle [4]. Elle est mesurée en millivolts. La valeur de V_{co} dépend de la différence de travaux de sortie des électrodes de la cellule et de la résistance shunt. Elle diminue avec l'augmentation de la température et varie en fonction de l'intensité lumineuse [6].

Elle est donnée par l'expression :

$$V_{co} = V_t * \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right) \quad (I.3)$$

Avec : $V_t = \frac{k.T}{e}$ qui représente la tension thermique.

I.4.3.3 Caractéristique courant-tension I (V) :

Le courant délivré par la cellule photovoltaïque éclairée est donné par l'équation (I.4) :

$$I = I_{ph} - I_s (\exp (V /KT)) - 1) - (V+R_s I) / R_{sh}. \quad (I.4)$$

I_{ph} : le photocourant, I_{obs} : le courant d'obscurité,

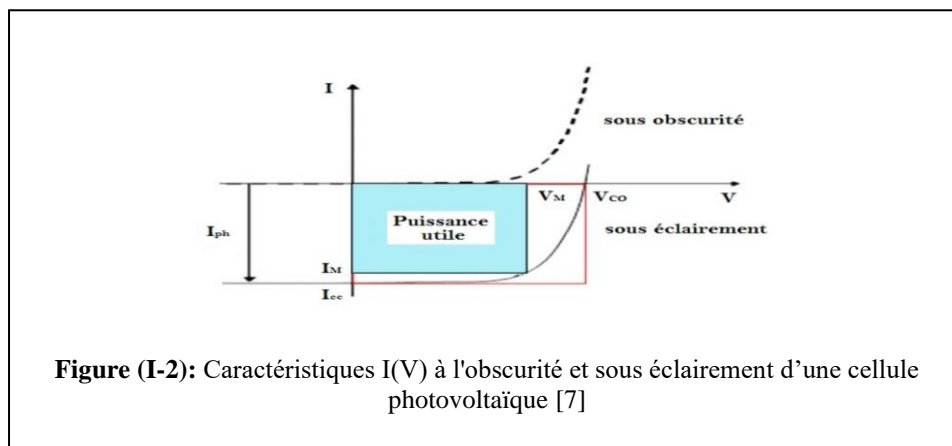
I_s : le courant de saturation de la diode,

q : la charge élémentaire,

K : la constante de Boltzmann,

T : la température.

La caractéristique $I(V)$ de la cellule solaire représentée sur la figure (I.2) est la superposition de celle de la diode sous obscurité et du courant photogénéré.



La caractéristique $I(V)$ d'une cellule solaire permet de comprendre son comportement en termes de courant (I) et de tension (V). À l'obscurité, lorsque le produit de la tension et du courant ($V.I$) est supérieur à zéro, la jonction de la cellule absorbe de l'énergie. Sous éclairage solaire, la caractéristique $I(V)$ est décalée vers le bas, et dans la région hachurée où le produit $V.I$ est inférieur à zéro, la cellule fournit de l'énergie. En analysant la caractéristique $I(V)$ de la cellule solaire, il est possible de déterminer différents paramètres photovoltaïques tels que le courant de court-circuit (I_{sc}), la tension de circuit ouvert (V_{oc}), la puissance maximale (P_{max}) et le rendement de conversion de la cellule solaire. Ces paramètres sont importants pour évaluer les performances de la cellule solaire et son utilisation potentielle.[7]

I.4.3.4 Facteur de forme (FF) :

Le facteur de forme (FF) est un paramètre essentiel pour évaluer la qualité d'une cellule solaire. Il est calculé en divisant la puissance maximale fournie par la cellule (P_{max}) par le produit du courant de court-circuit (I_{sc}) et de la tension de circuit-ouvert (V_{co}), qui représente la puissance maximale d'une cellule idéale. Le facteur de forme indique la qualité de la cellule plus il s'approche de l'unité plus la cellule est performante, il est de l'ordre de 0.7 pour les cellules performantes. Cependant, il diminue avec l'augmentation de la température. Ce paramètre traduit l'impact des pertes causées par les résistances parasites R_s et R_{sh} [5].

Il est exprimé comme suit :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{sc} \cdot V_{co}} \quad (I.5)$$

I.4.3.5 Rendement énergétique de conversion :

La performance d'une cellule photovoltaïque est évaluée en fonction de son rendement de conversion de la lumière solaire en électricité. Le rendement, représenté par le symbole η (efficacité), indique le rendement de conversion de la puissance des cellules photovoltaïques. Il est calculé en prenant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_{in} .

Il est donné par :

$$\eta = \frac{P_m}{P_{inc}} = \frac{FF \cdot V_{co} \cdot I_{sc}}{P_{inc}} \quad (I.6)$$

Avec : P_{inc} est égale au produit de l'éclairement et de la surface totale des photopiles. Ce paramètre reflète la qualité de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.[5]

I.5 Les différentes filières photovoltaïques :

I.5.1 La première génération : le silicium cristallin (c-Si) :

La première génération de cellules solaires comprend la technologie du silicium, domine le marché du PV en raison de leurs rendements élevés. Il existe deux types de cette technologie:

le silicium monocristallin et le silicium polycristallin.

I.5.1.1 Le silicium monocristallin :

Les cellules solaires sont fabriquées à partir d'un cristal unique et bien ordonné. Le matériau est transformé en bandes étirées à partir de la graine ou recristallisé à haute température. Historiquement, il s'agit du premier type de silicium utilisé dans l'industrie photovoltaïque.

I.5.1.2 Cellule au silicium monocristallin :

Après refroidissement, le silicium fondu se solidifie pour former un seul grand cristal. Les cristaux sont ensuite coupés en fines tranches et des cellules seront produites. Ces cellules sont généralement d'un bleu uniforme. La cellule a un rendement très haut et une longue durée de vie (30 ans) ce qui met en avant les caractéristiques positives des telles cellules mais souligne également leurs inconvénients, comme le coût élevé et leur faible efficacité en faible lumière.

I.5.1.3 Silicium polycristallin :

Les cellules solaires en silicium cristallin sont l'un des types de cellules solaires les plus couramment utilisés aujourd'hui, les cellules solaires en silicium cristallin sont composées de cristaux de silicium assemblés en grains d'environ 1 mm à 2 cm, le silicium utilisé dans ces cellules solaires est produit en faisant fondre et refroidir des blocs de silicium pur dans de grands creusets de coulée, les cellules solaires en silicium cristallin ont une teinte bleue et une réflexion scintillante qui dépend de l'orientation du cristal, le rendement typique de ces cellules solaires est de 12 à 15%, ce qui signifie qu'elles peuvent convertir environ 12 à 15% de l'énergie solaire incidente en électricité, le silicium est découpé en fines tranches à l'aide d'une scie à fil pour former la forme spécifique de la cellule photovoltaïque, les dopants, tels que le phosphore et le bore, sont ajoutés aux tranches de silicium par des techniques de diffusion ou d'implantation sous vide, une couche antireflet est appliquée sur la face avant du silicium pour réduire la perte de réflexion de la lumière incidente à moins de 5%. Cela donne à la cellule solaire une apparence bleu profond caractéristique, les contacts métalliques sont placés sur le haut et le bas de la cellule pour collecter l'électricité générée, l'électrode avant est déposée sous forme de

grille pour permettre le passage de la lumière, tandis que l'électrode arrière est recouverte d'une couche métallique continue.

I.5.1.4 Cellule au silicium polycristallin :

Lorsque le silicium refroidit lors du processus de fabrication, plusieurs cristaux se forment, ce qui donne à la cellule solaire en silicium polycristallin une apparence non uniforme où l'on observe des motifs produits par différents cristaux. La cellule solaire en silicium polycristallin est également de couleur bleue, une durée de vie relativement longue d'environ 30 ans, ce qui signifie qu'elles peuvent fonctionner efficacement pendant une période prolongée. Cependant, les cellules solaires en silicium polycristallin ont des performances inférieures en faible lumière.

I.5.2 La deuxième génération : les couches minces :

I.5.2.1 Le silicium amorphe :

Les cellules solaires à base de silicium amorphe en couche mince sont constituées de silicium déposé sur un support en verre ou en matière synthétique, formant une couche mince de quelques microns. La présence d'hydrogène (H) est importante pour assurer la qualité du matériau en limitant les défauts. Il sature les liaisons pendantes du silicium et réduit les imperfections dans la structure atomique. Ce type de cellule comprend une couche mince transparente et conductrice d'oxyde d'étain (SnO₂) utilisée comme électrode positive (+) du côté où le silicium est déposé. L'électrode arrière (-) est généralement produite par un dépôt métallique directement sur le silicium.

Le silicium amorphe est bon marché et peut être plus esthétique lorsqu'il est intégré, de sorte que de telles batteries minces peuvent être fabriquées de manière à pouvoir être intégrées sur un support flexible. Cependant, ces cellules solaires ont un rendement inférieur à celui des cellules solaires en silicium cristallin, atteignant généralement moins de la moitié de leur rendement. De nouveaux matériaux, tels que l'arséniure de gallium (AsGa), le tellure de cadmium (CdTe) ou le cuivre-indium sélénium (CIS), se rapprochent des rendements des cellules solaires cristallines [8].

I.5.2.2 Cellule au silicium amorphe à couche mince :

Le a-Si:H est considéré comme le choix judicieux pour les cellules solaires en couches minces grâce à son fort coefficient d'absorption, son aptitude à être déposé sur de grandes surfaces de l'ordre du mètre carré ainsi que la faible consommation énergétique durant sa production. Le faible rendement de conversion du a-Si:H par rapport à celui du silicium cristallin et la dégradation sous la lumière a poussé les scientifiques à intensifier leurs recherches pour aboutir à de nouvelles structures.

En effet, une cellule de silicium amorphe qui contient environ 10% d'hydrogène subit un effet de dégradation lors de son exposition à la lumière. Ceci est lié à la formation de défauts dans le matériau et qui sont responsables de l'augmentation du taux de recombinaison des paires électron trou. La superposition de deux structures p-i-n ou de trois couches actives très minces réduit la dégradation sous la lumière de 30% à 10%

I.5.3 La troisième génération : les technologies émergentes :

Parmi les cellules solaires de la troisième génération, on cite les cellules solaires à base de CZTS, les cellules multijonctions, les cellules organiques, etc.,

- Les cellules solaires à base de CZTS offrent l'avantage d'être minces, ce qui les rend applicables sur des supports flexibles tels que le plastique ce qui leur confère la capacité d'être utilisée sur tous types de supports (courbes, transparents ou même stratifiées avec d'autres matériaux), contrairement aux cellules en silicium qui nécessitent des surfaces planes et rigides [9] [10].
- La filière des dispositifs multi-jonctions représente la filière de troisième génération principalement réservée aux applications spatiales. Cette technologie repose sur l'empilement de cellules fabriquées à partir des composés III-V et leurs alliages ayant des bandes interdites différentes, chacune optimisée pour une partie différente du spectre solaire
- Quant à la filière organique, les cellules présentent une grande facilité de fabrication, une parfaite flexibilité d'utilisation et un abaissement potentiel du prix de fabrication.

En effet, les matériaux organiques, moléculaires ou à base de carbone, d'hydrogène et d'azote, sont particulièrement intéressants en termes d'abondance, de coût, de poids et de mise en œuvre. Le développement de telles cellules persiste encore actuellement et à l'avenir.

I.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, on a expliqué le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque tout en identifiant les principales filières photovoltaïques. Un rappel des différents paramètres électriques d'une cellule solaire à savoir le rendement de conversion, le facteur de forme, le courant de court-circuit, et la tension de circuit-ouvert a été présenté.

Chapitre II:

II.1 Introduction:

Étant donné le contexte énergétique et environnemental actuel, les recherches dans le domaine photovoltaïque ne cessent de croître. C'est pourquoi de nouvelles techniques de fabrication de cellules solaires sont adoptées par rapport aux autres techniques conventionnelles vu qu'elles sont considérées comme des techniques à basse température, à faible coût, réalisable sur des dispositifs souples et avec une matière première illimitée. L'objectif de ce mémoire est d'étudier une cellule solaire à pérovskite puis l'optimiser à travers une simulation numérique afin de faire une comparaison entre deux types à base d'absorbants différents.

II.2 Matériaux pérovskites dans les cellules solaires :

Au cours des dernières années, les cellules solaires à base de pérovskites hybrides ont connu des avancées significatives, atteignant récemment un rendement record de 25,2 %. Ces matériaux hybrides, combinant des composants organiques et inorganiques, présentent des propriétés optoélectroniques intéressantes telles qu'une forte absorption optique, une grande diffusion des charges et une facilité de fabrication à faible coût. Cependant, la stabilité à long terme reste un défi majeur pour l'industrialisation de cette technologie [11].

II.3 Structure d'une cellule photovoltaïque à pérovskite :

Généralement une cellule solaire à pérovskite est composée d'un substrat en verre/FTO sur lequel est déposé une couche d'oxyde d'étain dopé au fluor (FTO). Le FTO est recouvert par une couche de dioxyde de titane (TiO₂) qui améliore le transport des électrons. La couche active de la cellule est constituée d'un matériau pérovskite. Pour faciliter le transport des trous, une couche de spiro-OMeTAD est déposée entre l'électrode en or et la couche active. La structure de la cellule obtenue est représentée dans la Figure (II-1.A). La Figure(II-2.b) montre la topographie d'une cellule à pérovskite de type verre/FTO/TiO₂/Pérovskite/Spiro-OMeTAD/Au, capturée à l'aide d'un microscope électronique à balayage (MEB). Différentes

architectures et structures de cellules à pérovskites sont possibles, comme illustré dans la Figure(II-2). On peut trouver des structures mésoscopiques Figure(II-2.a), des structures planaires Figure(II-2.b) ou des structures inversées Figure(II-2.c) [12].

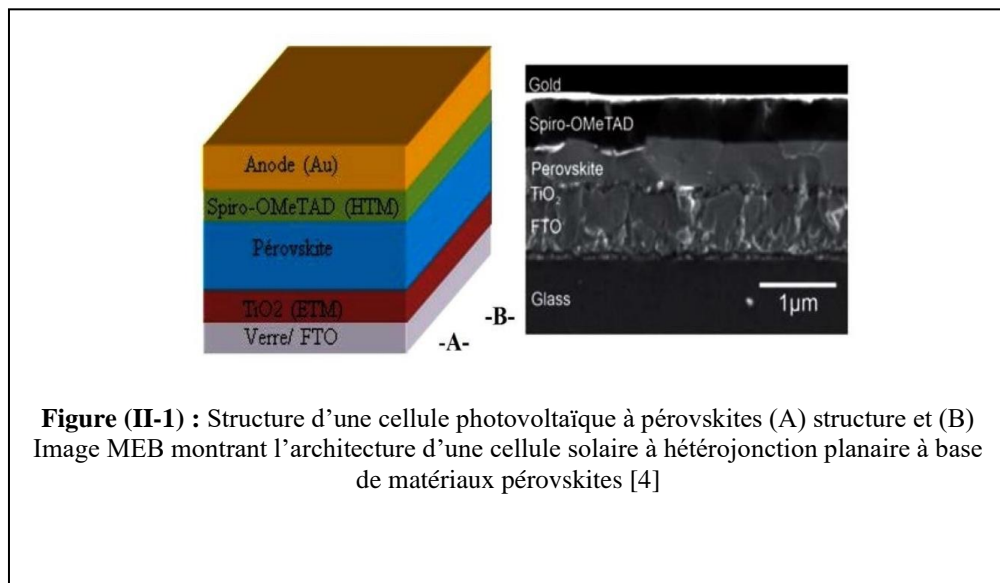
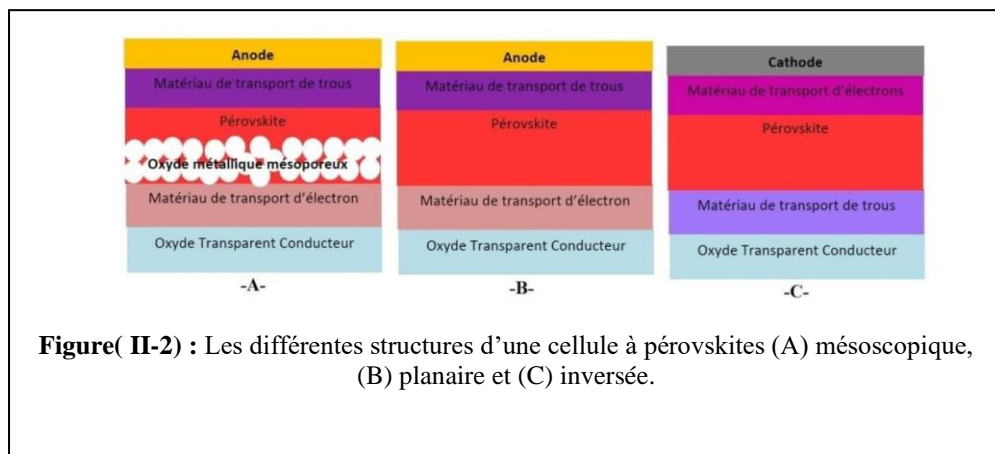


Figure (II-1) : Structure d’une cellule photovoltaïque à pérovskites (A) structure et (B) Image MEB montrant l’architecture d’une cellule solaire à hétérojonction planaire à base de matériaux pérovskites [4]



Figure(II-2) : Les différentes structures d’une cellule à pérovskites (A) mésoscopique, (B) planaire et (C) inversée.

II.4 Performances des cellules solaires à pérovskites :

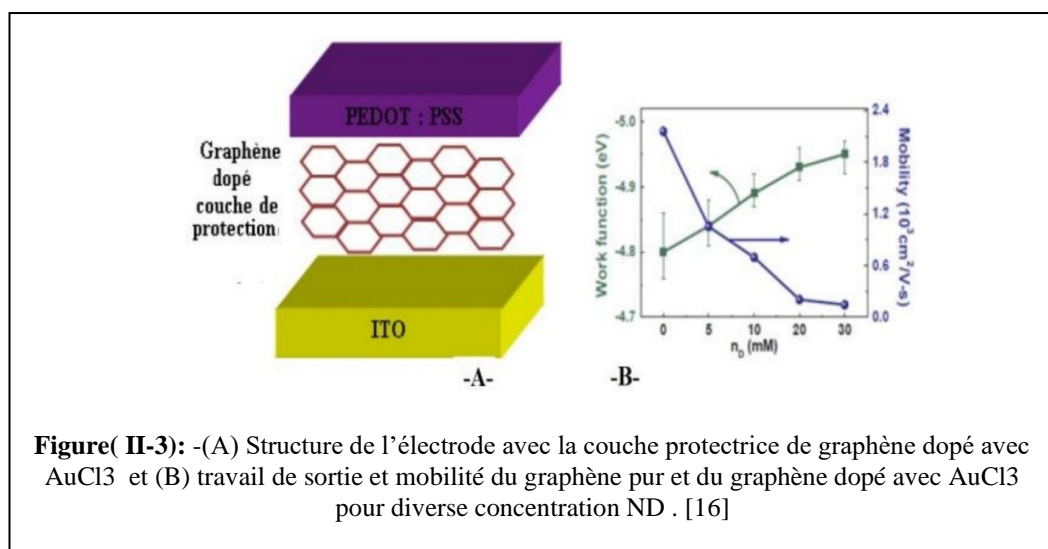
Les performances des cellules photovoltaïques à base de matériaux pérovskites dépendent de plusieurs paramètres, tels que l’architecture de la cellule, les matériaux utilisés pour la couche active, les couches interfaciales pour le transport d’électrons ETM et pour le transport de trous HTM et le type d’électrodes ainsi que les techniques et les conditions de fabrications.

Le choix du précurseur pour les couches de transport d'électrons TiO₂ a un impact sur le rendement des cellules. En effet pour des couches ETM à base de TiO₂ de haute qualité avec une meilleure qualité d'interface réduit la recombinaison des porteurs de charge et améliore les performances photovoltaïques, un rendement de conversion de 17,4%. peut être atteint [13].

L'élimination des pertes de porteurs de charge non radiatives dans les cellules hybrides à base de pérovskite, augmente l'efficacité de conversion de la lumière en électricité et assure la stabilité à long terme des dispositifs photovoltaïques.[14]

L'ajout de bromures de cuivre CuBr ou CuBr₂ aux matériaux pérovskites CH₃NH₃PbI_{3-x}Cl_x améliore également le rendement des cellules solaires. Des rendements de conversion plus élevés sont obtenus, atteignant 9,01% avec CuBr et 11,2% avec CuBr₂. [15]

Enfin, l'utilisation de différentes architectures d'électrodes, telles que l'insertion d'une couche protectrice de graphène dopé, peut améliorer le transport des trous et la stabilité des cellules solaires. Par exemple, l'utilisation d'une couche protectrice à base d'AuCl₃-Gr entre l'ITO et le PEDOT: PSS permet d'obtenir un rendement de conversion de 15,77% [16]



D'autres architectures d'électrode multicouche de type oxyde transparent conducteur/Métal/oxyde transparent conducteur (O/M/O) peuvent être réalisées pour améliorer

le rendement des cellules à pérovskite. Du fait que l'utilisation des électrodes multicouches a montré des rendements améliorés dans le cas des cellules organiques.

II.5 Pérovskites à base de plomb :

Les cellules solaires de type pérovskite (PSCs) représentent une nouvelle technologie émergente. Elles combinent les avantages des technologies au silicium (rendement élevé) et des cellules solaires organiques (fabrication peu coûteuse à partir de solutions à température ambiante). Le matériau de référence, le MAPI, présente des inconvénients tels que l'instabilité à l'air, en particulier à l'humidité, et la présence de plomb toxique. Pour remédier à ces problèmes, les chercheurs ont développé les pérovskites hybrides à réseau inorganique bidimensionnel (2D), mais avec un rendement moins élevé. Les équipes de différents laboratoires ont découvert une nouvelle famille de pérovskites hybrides appelée d-MAPI, qui présente une stabilité accrue à l'humidité tout en contenant moins de plomb que le MAPI. Ces nouvelles pérovskites offrent des perspectives prometteuses pour la conception de nouveaux matériaux utilisés dans les cellules solaires, les photodétecteurs et les diodes électroluminescentes grâce à leur composition flexible.

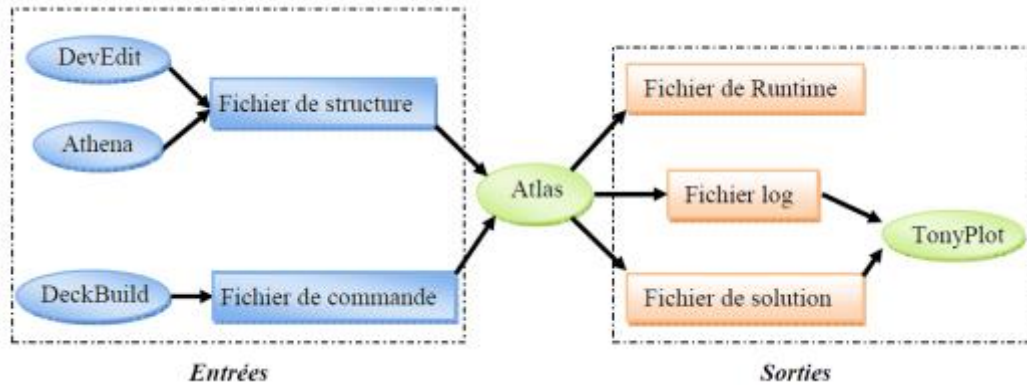
II.6 Le simulateur Atlas TCAD Silvaco :

II.6.1 Présentation d'Atlas :

Il est essentiel pour l'industrie et les milieux de recherche de pouvoir simuler de manière précise les dispositifs semi-conducteurs. ATLAS, un outil de simulation spécialement conçu, permet la modélisation en 2D et 3D de composants basés sur la physique des semi-conducteurs, en prenant en compte leurs propriétés électriques, optiques et thermiques. Il offre une bibliothèque de matériaux prédéfinis et permet également aux utilisateurs de définir leurs propres matériaux.

ATLAS-SILVACO intègre de nouveaux modèles physiques qui utilisent des méthodes et des algorithmes numériques efficaces, ainsi que des techniques de maillage et d'optimisation des solutions linéaires innovantes. Grâce à ces améliorations, il permet d'obtenir des résultats de simulation très proches de ceux observés dans la réalité. L'avantage principal de ce type de

simulateurs réside dans leur capacité à visualiser des phénomènes physiques qui sont généralement difficiles d'accès et donc difficiles à observer directement [17] [18].



Figure(II-4): Entrées/sorties du simulateur Atlas.

II.6.2 Ordres de commandes d'Atlas :

ATLAS-SILVACO utilise DeckBuild pour recevoir les fichiers d'entrée. Le code est écrit dans le fichier d'entrée appelé "Atlas" et fonctionne à l'aide de la commande suivante : "Go Atlas". Après cette commande, le fichier d'entrée doit suivre un modèle spécifique [17]. Les groupes de commandes nécessaires sont indiqués dans la Figure 3.2 [19].

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

Figure(II-5) : Ordre des groupes des commandes d'Atlas [19].

II.6.3 Les commandes fondamentales :

II.6.3.1 Spécification du maillage (mesh) :

Le maillage se compose d'une série de lignes horizontales et verticales. Dans notre étude, nous utilisons un maillage bidimensionnel, ce qui signifie que seuls les paramètres x et y sont définis.[16]

Le format général pour définir le maillage est :

x.mesh location=<value> spacing=<value>

y.mesh location=<value> spacing=<value>

II.6.3.2 Spécification des régions:

Après avoir défini le maillage, il est nécessaire de définir les régions. Le format de définition des régions est le suivant:

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

II.6.3.3 Spécification des électrodes :

Dans le logiciel ATLAS, il existe une limite de 50 électrodes qui peuvent être définies. Le format de définition des électrodes est le suivant :

"Electrode nombre = <integer> name = <nom de l'électrode> <position des paramètres>".

II.6.3.4 Spécification du dopage

Le dopage dans le contexte mentionné semble se référer à la modification contrôlée des propriétés électriques ou optiques d'un matériau semi-conducteur, en introduisant des impuretés appelées dopants. Ces derniers peuvent ajouter ou retirer des électrons, ce qui permet de moduler la conductivité du matériau.

La spécification de la structure de dopage dans "Atlas" suit un format particulier :

dopage<type de distribution><type de dopant>/<position des paramètres>

Exemple: doping uniform region=2 n.type conc=7e17

II.6.3.5 Spécifications des matériaux et des modèles :

a) Spécifications des matériaux :

Le format de la déclaration du matériau est le suivant :

Matériau< localisation >< définition du matériau >

Exemple :material mat=Spiro user.group=semiconductor user.default=GeN TAUN0=1e -7
min=2e -3 mup= 2e-3 nc300=2 e18 nv300=2e19 eg300=3 affinity=2.45 permi=3

Dans cet exemple, material apparaît deux fois, le premier est considéré comme la déclaration du matériau et le second est considéré comme un paramètre de localisation.

b) Spécifications des modèles :

Les modèles physiques sont classés en cinq catégories : Mobilités des porteurs de charges, mécanismes de génération-recombinaison, les statistiques de transport, l'ionisation par impact et l'effet tunnel.

La syntaxe de la déclaration du modèle est la suivante :

Model < paramètres générales > / < paramètres du modèle >

Le choix du modèle dépend des matériaux choisis pour la simulation.

II.6.3.6 Spécification Méthodes numériques de calcul :

ATLAS-SILVACO utilise trois méthodes numériques pour résoudre les systèmes d'équations : la méthode de Gummel, la méthode de Newton et la méthode des blocs. ATLAS-SILVACO offre différentes options de méthodes numériques pour résoudre les systèmes d'équations, avec la possibilité d'utiliser plusieurs méthodes en même temps.

II.6.3.7 Spécification de Solution :

La spécification des solutions est faite par les instructions suivantes :

a) Log :

L'instruction LOG est utilisée pour enregistrer les caractéristiques terminales dans un fichier de données spécifié ("myoutputfile.log"). Les données de sortie sont enregistrées dans le fichier désigné, ce qui facilite l'analyse ultérieure des résultats ou l'extraction d'informations spécifiques. L'utilisation de l'instruction LOG et l'enregistrement des données dans un fichier sont utiles pour le débogage, l'analyse des performances et la documentation des résultats.

b) Solve:

L'instruction SOLVE est utilisée pour chercher une solution pour un ou plusieurs points de polarisation.

Les lignes "SOLVE V2 = 0.8" et "SOLVE V2 = 0.9" indiquent que l'on cherche une solution pour le point de polarisation où la tension V2 est égale à 0.8 volts et 0.9 volts respectivement.

L'instruction SOLVE est utilisée pour résoudre un système d'équations ou trouver les valeurs des variables qui satisferont une condition spécifique. L'utilisation de l'instruction SOLVE permet de déterminer les valeurs de variables nécessaires au bon fonctionnement du système.

c) Load et Save pour charger et enregistre un fichier.

II.6.3.8 Analyse des résultats:

L'outil "TonyPlot" est utilisé pour afficher graphiquement les résultats de la simulation. L'utilisation de cet outil permet de visualiser les données de manière graphique, ce qui facilite l'analyse et la compréhension des résultats.

II.7 Conclusion :

Pour améliorer les performances des dispositifs photovoltaïques à base de pérovskites, il est nécessaire de développer de nouveaux matériaux, d'optimiser la structure des cellules ainsi que les technologies de fabrication. Des recherches approfondies dans ce domaine permettraient d'augmenter le rendement de conversion et de mieux comprendre le fonctionnement de ces dispositifs.

Chapitre III:

III.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons présenter les résultats de simulation numérique de la structure d'une cellule solaire à l'aide du logiciel Atlas. Au début, on commence par définir la structure de la cellule solaire en spécifiant tous les paramètres liés aux différentes couches qui la composent. Une attention particulière sera accordée à la couche absorbante, où nous présenterons les principales propriétés nécessaires à la simulation numérique de la structure.

Ensuite, nous présenterons les résultats de la simulation électrique de la cellule solaire. Cela nous permettra de déduire les performances photovoltaïques. Nous étudierons également l'effet de la variation des épaisseurs et du dopage des différentes couches sur les performances photovoltaïques.

III.2 Cellules de référence à base de MAPbI₃ :

III.2.1 Description et simulation de la cellule :

La structure de la cellule solaire à base de MAPbI₃ est constituée par : une fenêtre optique conductrice et transparente (ITO) et l'absorbeur à base du MAPbI₃. Le contact arrière est un métal (gold) qui occupe toute la surface, et la couche de transport d'électrons (ETL) est le c-TiO₂ et le matériau de transport de trous (HTL) est du spiro-OMeTAD. Les différents paramètres utilisés pour la simulation de cette cellule sont présentés dans le Tableau (III.2) [8].

III.2.1.1 Paramètres utilisés dans le logiciel:

a) Paramètres des différentes couches :

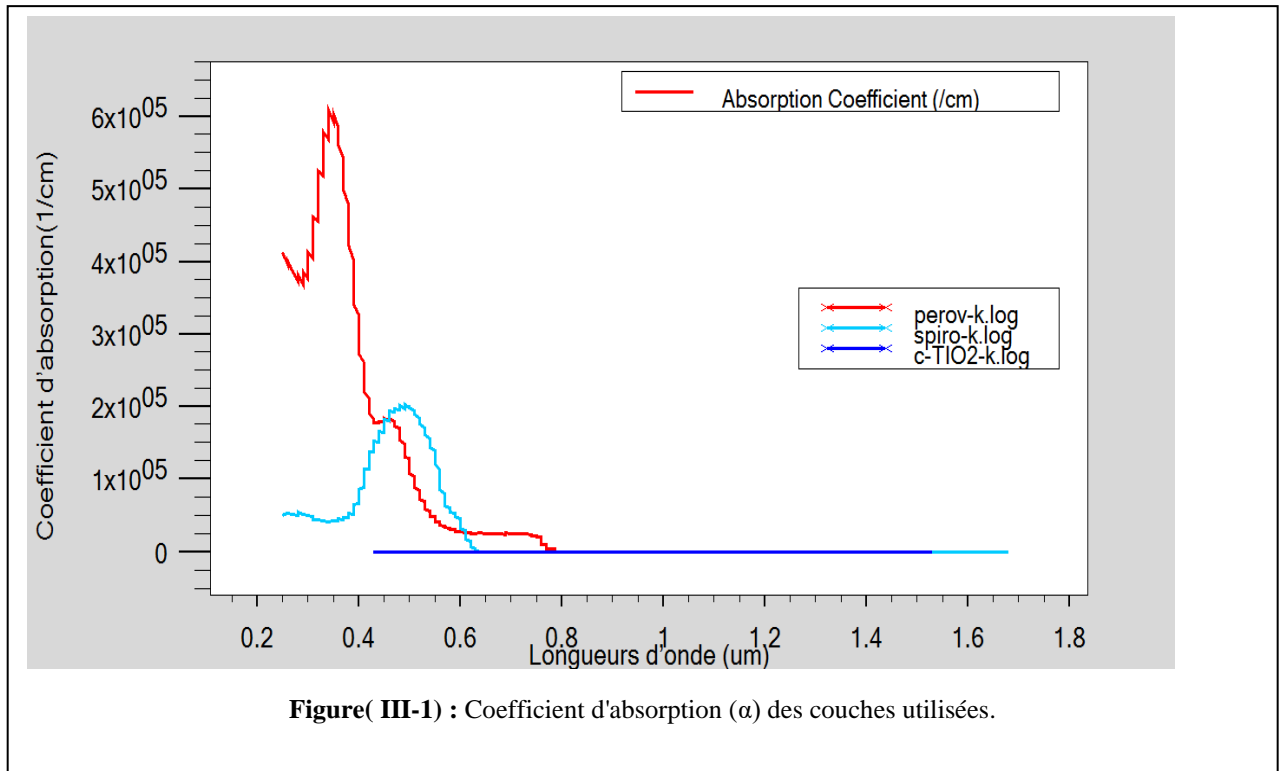
Le Tableau (III.1) résume les propriétés géométriques et électroniques des trois couches MAPbI₃, c-TiO₂ et Spiro-OMeTAD utilisés lors de la simulation de notre structure.

Tableau (III-1): Paramètres des couches de la cellule solaire à base du MAPbI3 [20].

	C-TiO2	MAPbI3	Spiro-OMeTAD
Épaisseur (nm)	100	600	100
Energie de gap (eV)	3.2	1.55	3
Permittivité (ϵg)	19	100	3
Affinité électronique (eV)	4	3.8	2.45
Mobilité des électrons (cm ² /Vs)	0.2	1	2×10^{-3}
Mobilité des trous (cm ² /Vs)	0.1	1	2×10^{-3}
τn (s)	10^{-7}	10^{-6}	10^{-7}
τp (s)	10^{-7}	10^{-6}	10^{-7}
NC (1/cm ³)	2×10^{18}	10^{19}	2×10^{18}
NV (1/cm ³)	2×10^{19}	10^{17}	2×10^{19}

b) Paramètres optiques des couches :

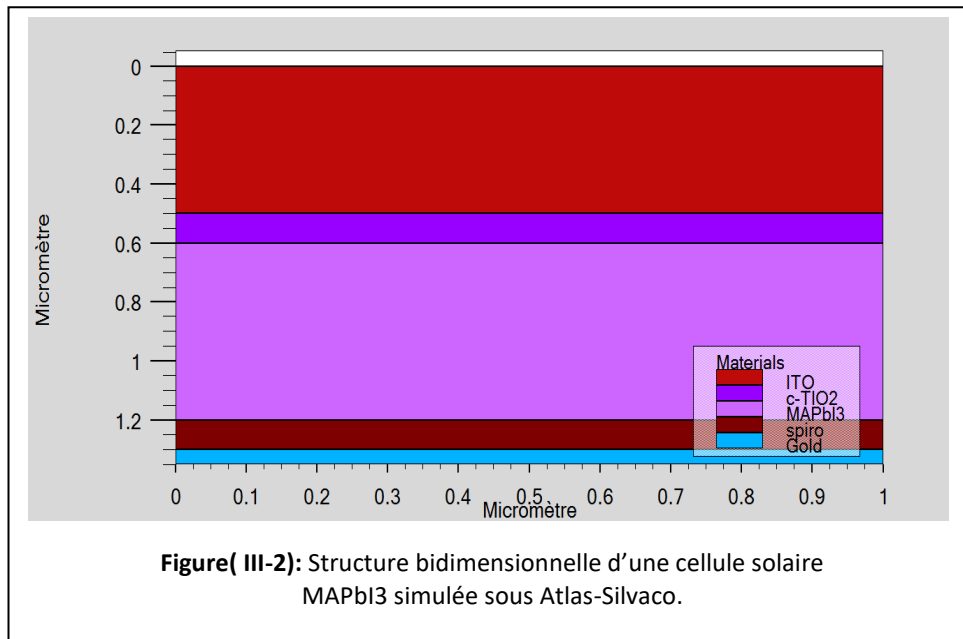
la première étape nécessaire dans le processus de conversion photovoltaïque est l'absorption des photons , Ainsi une des principales grandeurs physiques d'un matériau semi-conducteur photovoltaïque est son coefficient d'absorption α (cm⁻¹). La figure (III.1) présente la variation de ce coefficient pour les différentes longueurs d'onde du spectre visible sous Atlas Silvaco.



Figure(III-1) : Coefficient d'absorption (α) des couches utilisées.

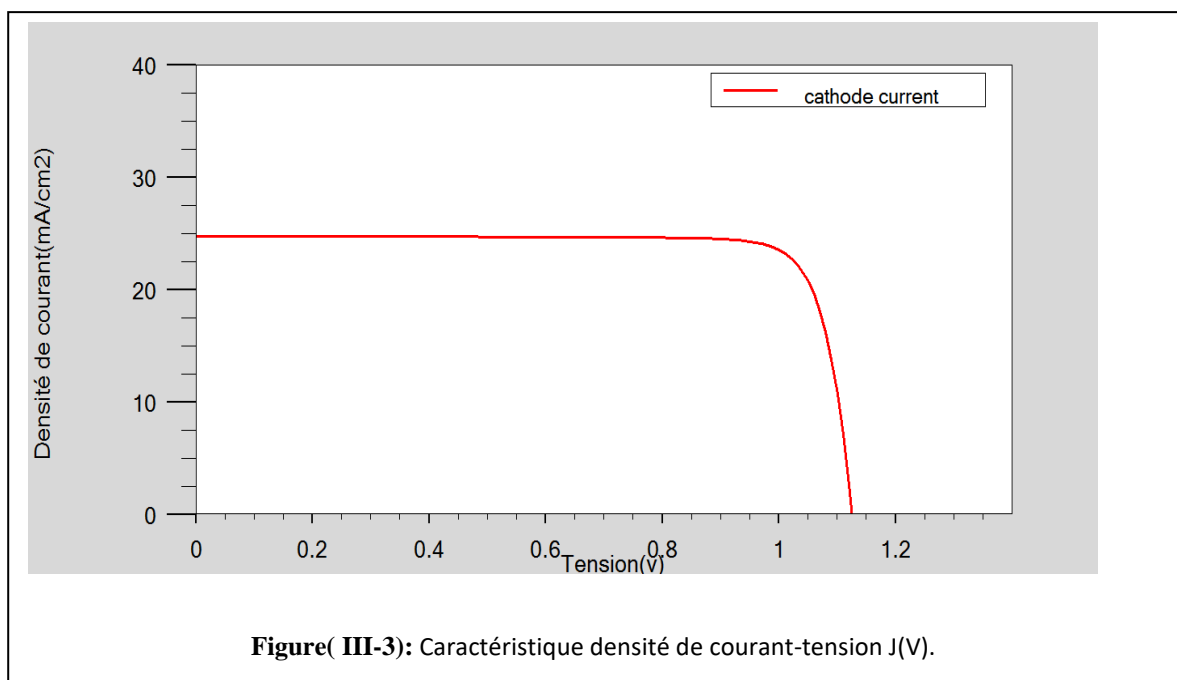
III.2.1.2 Structure de la cellule :

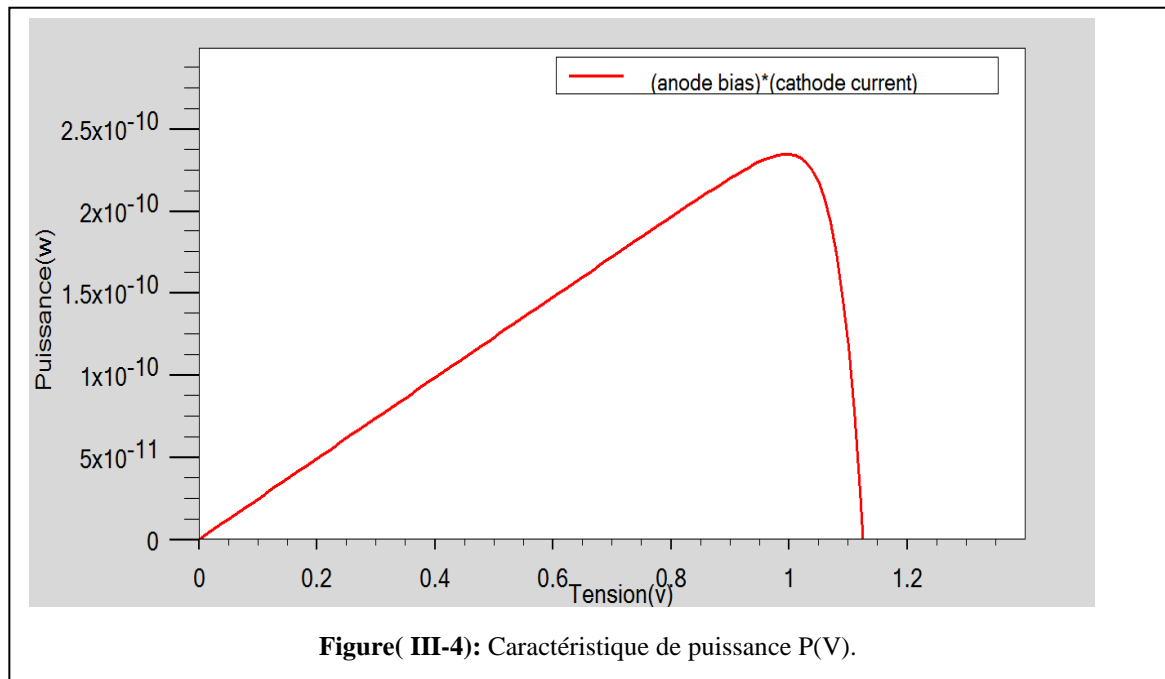
La figure (III.2) montre les différentes couches qui composent la cellule solaire pérovskite MAPbI₃ simulée à l'aide de l'outil d'Atlas SILVACO.



III.2.1.3 Caractéristiques électriques de la cellule :

La simulation de la cellule a été effectuée dans les conditions standards ASTM ($T = 300$ K, Spectre AM1.5, densité de puissance $100\text{mW}/\text{cm}^2$). Ceci nous a permis de faire une extraction des caractéristiques de la densité de courant $J(V)$ de la cellule représentée sur la figure (III.3) ainsi que la caractéristique $P(V)$ représentée sur la figure (III.4). Les résultats obtenus sont conformes à ceux déjà trouvés [22].





On remarque sur ces deux courbes que la valeur maximale du courant est de (25 mA/cm²) et la tension maximale est de (1.15v). Et la plus grande puissance (2.3×10^{-10} watt)

III.2.1.4 Performances photovoltaïques obtenues :

Les performances photovoltaïques obtenus lors de cette simulation sont résumées dans le tableau (III.2):

Tableau(III-2): Les performances photovoltaïques de la cellule solaire.

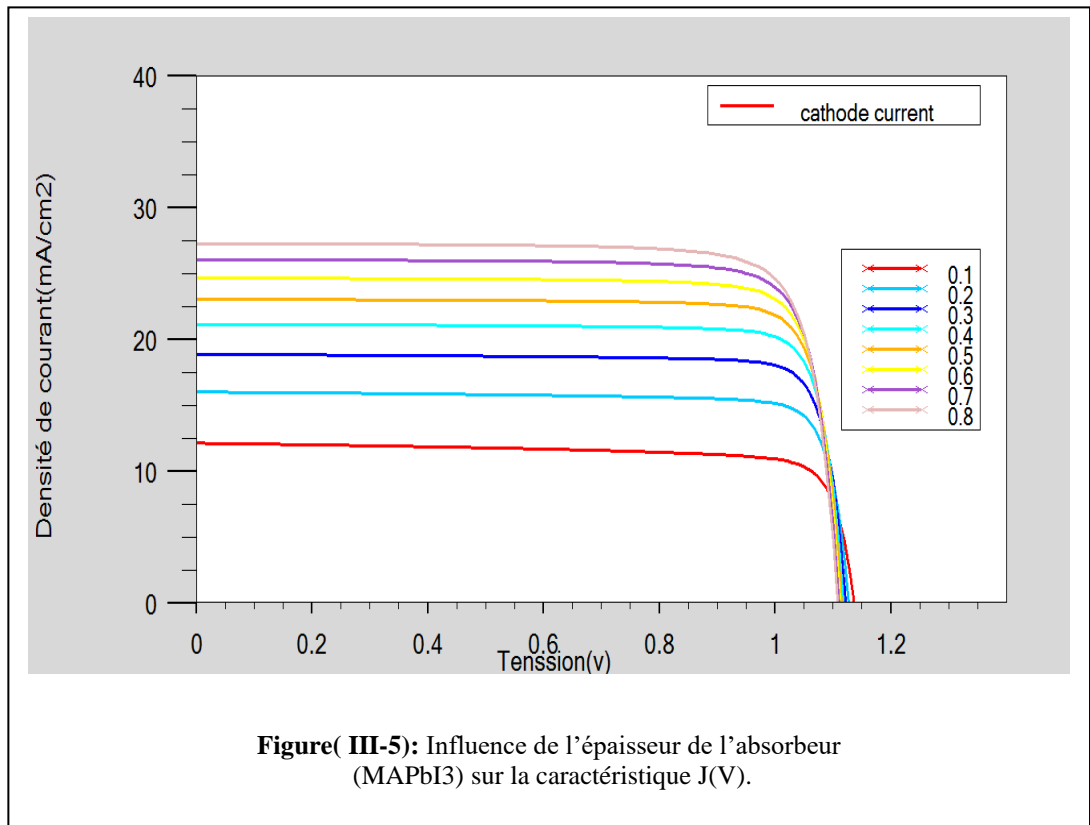
Jcc (mA.cm ⁻²)	Vco(V)	FF(%)	η (%)
24.72	1.12	84.48	23.49

III.2.2 Influence des paramètres géométriques sur les performances de la cellule :

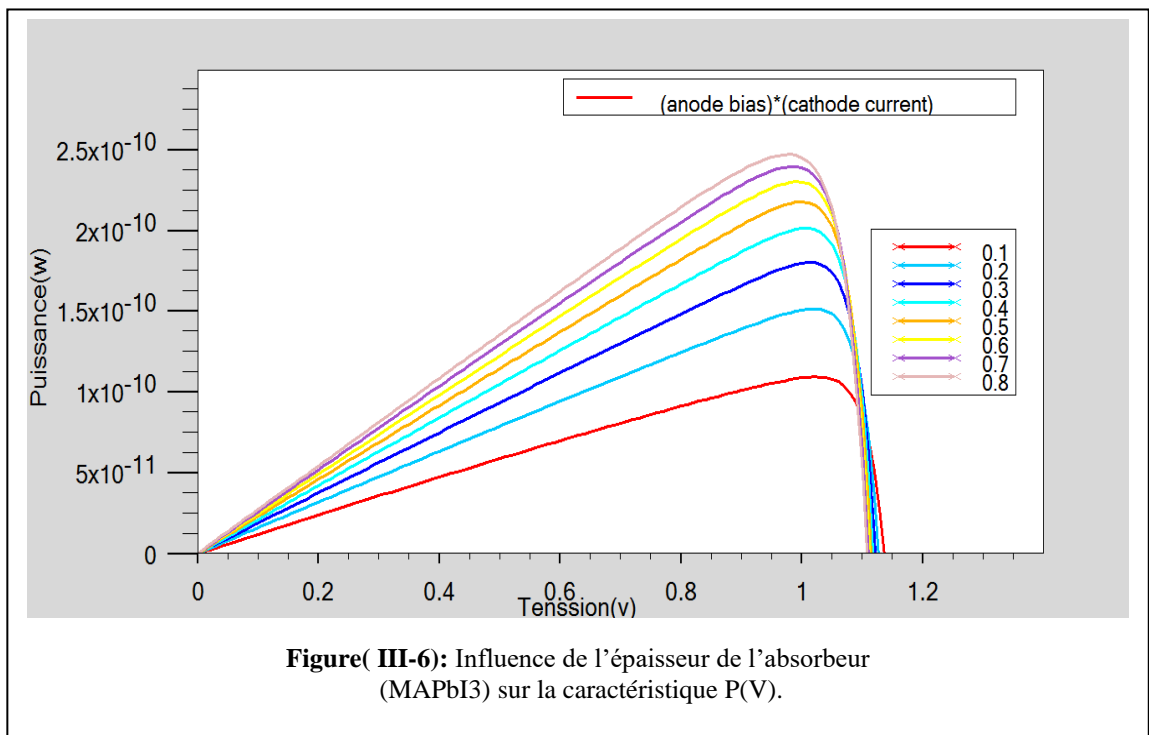
III.2.2.1 Effet de l'épaisseur de la couche absorbante :

a) Caractéristiques électriques :

L'effet de la variation de l'épaisseur de l'absorbant (MAPbI₃) sur la caractéristique J(V) et P(V) de la cellule solaire est illustré sur les figures (III.5) et (III.6) respectivement. La plage de variation s'étale de 0.1 à 0.8μm.



Figure(III-5): Influence de l'épaisseur de l'absorbeur (MAPbI3) sur la caractéristique J(V).

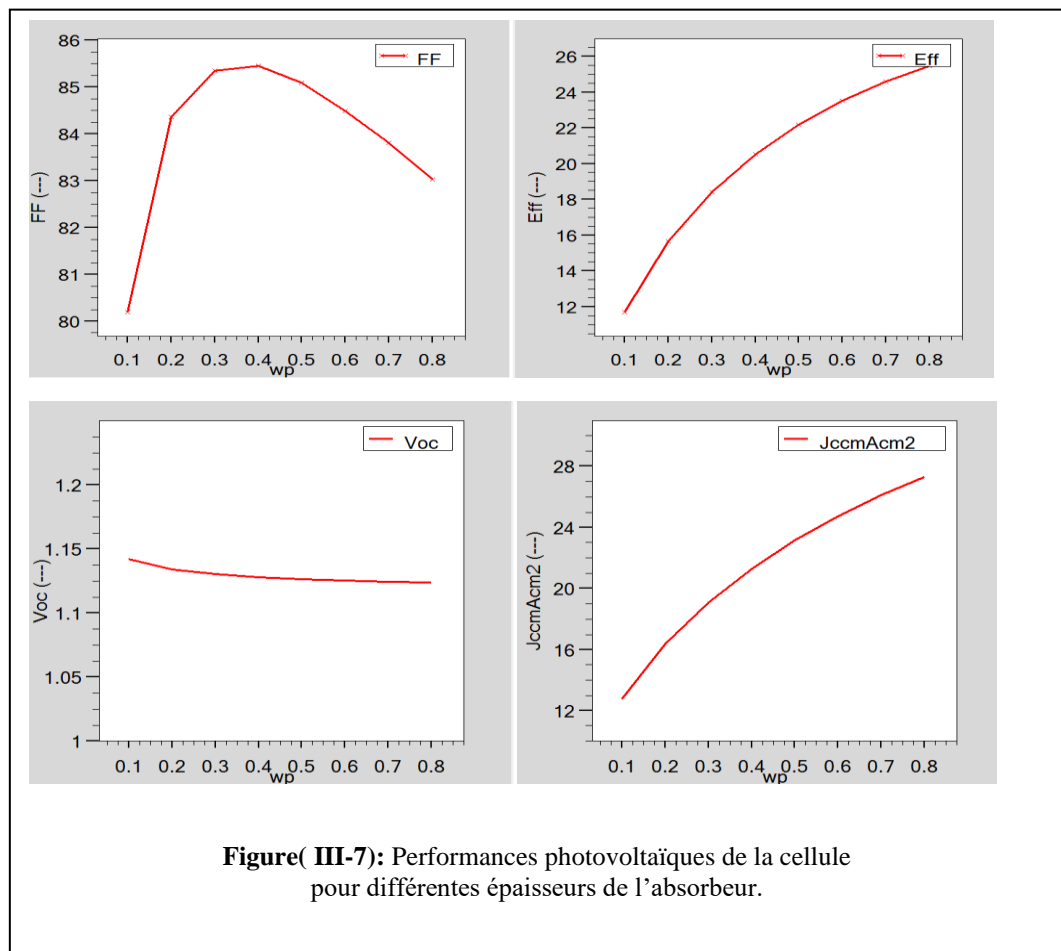


Figure(III-6): Influence de l'épaisseur de l'absorbeur (MAPbI3) sur la caractéristique P(V).

On remarque sur ces deux courbes que la meilleure épaisseur de la couche absorbante est 0.8 um

b) Performances photovoltaïques pour différentes épaisseurs MAPbI₃ :

La modification de l'épaisseur affecte les performances photovoltaïques de la cellule solaire conformément aux représentations illustrés sur les figures (III.7).



On remarque que les meilleures performances sont obtenues pour de grandes épaisseurs (Tableau III.3). En effet, un rendement maximal de 25.48% est obtenu pour une épaisseur de 0.8 μm et on constate que lorsque l'épaisseur varie de 0.4 à 0.8 μm , Le facteur de forme (FF) chute, Notre choix de l'épaisseur de l'absorbeur est 0.6 μm .

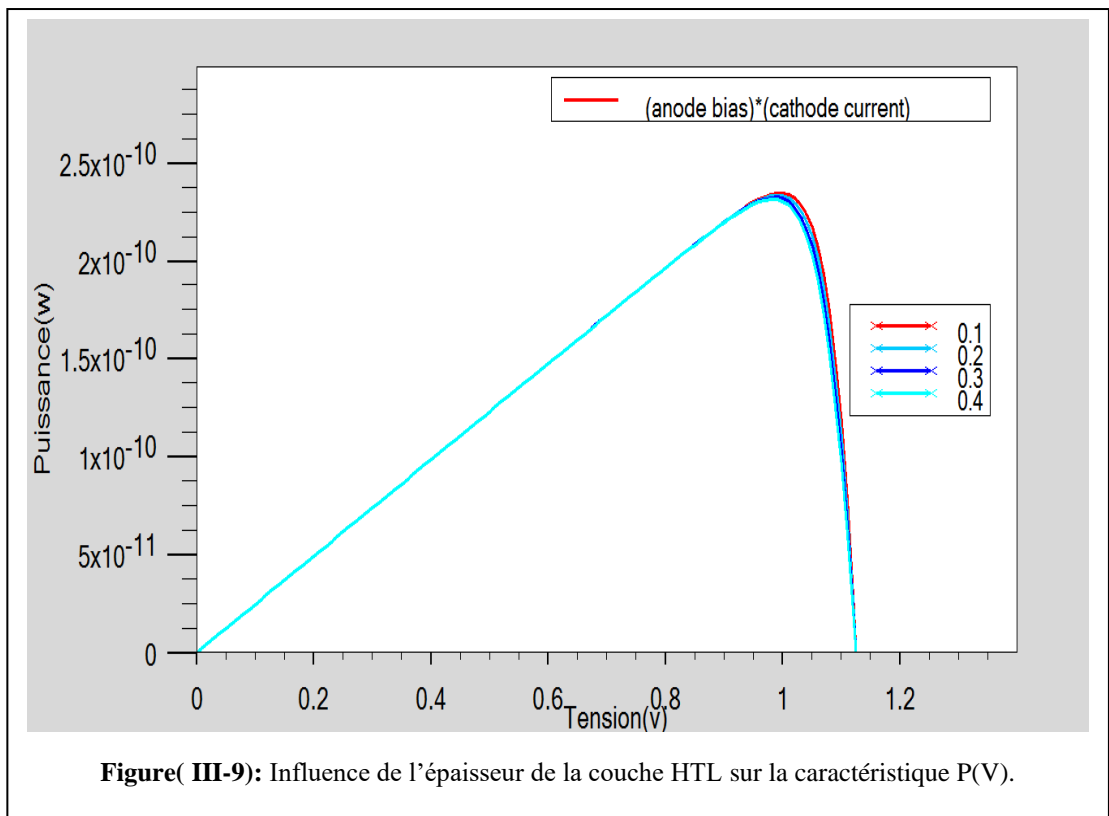
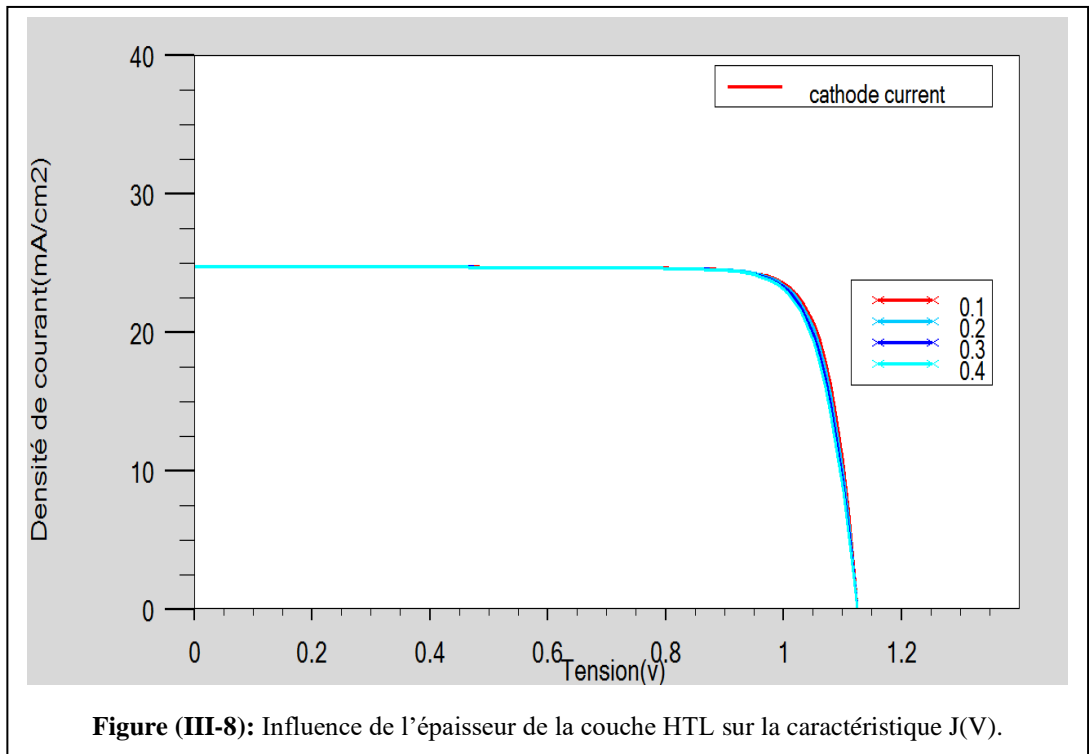
Tableau(III-3): Performances photovoltaïques de la cellule pour différentes épaisseurs de l'absorbeur.

épaisseur (MAPbI ₃) (μm)	J _{cc} (mA/cm ²)	V _{co} (V)	FF (%)	η (%)
0.1	12.837	1.143	80.225	11.717
0.2	16.435	1.135	84.351	15.712
0.3	19.145	1.131	85.351	18.431
0.4	21.304	1.127	85.453	20.579
0.5	23.210	1.127	85.094	22.157
0.6	24.776	1.126	84.479	23.566
0.7	26.173	1.125	83.813	24.573
0.8	27.359	1.124	83.057	25.480

III.2.2.2 Effet de l'épaisseur des couches HTL et ETL :

a) Caractéristiques J(V) et P(V) :

L'effet de la variation de l'épaisseur de la couche HTL sur la caractéristique J(V) et P(V) de la cellule solaire est illustré sur les figures (III.8) et (III.9) respectivement. La plage de variation s'étale de 0.1 à 0.4 μm.



On remarque sur ces deux courbes que la meilleure épaisseur de la couche HTL est 0.1μm

b) Effet de l'épaisseur de la couche HTL :

Le tableau (III.4) montre l'impact de la variation de l'épaisseur de la couche HTL sur les performances photovoltaïques de la cellule solaire. La plage de variation s'étend de 0,1 à 0,4 μm .

Tableau(III-4) : Performances photovoltaïques de la cellule pour différentes épaisseurs de la couche HTL.

Epaisseur (μm)	Jcc (mA/cm²)	Vco (V)	FF(%)	η (%)
0.1	24.729	1.125	84.484	23.506
0.2	24.729	1.125	84.119	23.407
0.3	24.728	1.125	83.723	23.295
0.4	24.728	1.125	83.339	23.190

c) Performances photovoltaïques de la cellule pour l'épaisseur de la couche ETL :

Le tableau (III.5) montre l'impact de la variation de l'épaisseur de la couche ETL sur les performances photovoltaïques de la cellule solaire. La plage de variation s'étend de 0.1 à 0,4 μm .

Tableau(III-5): Performances photovoltaïques de la cellule différentes épaisseurs de la couche ETL.

Epaisseur (μm)	Jcc (mA/cm²)	Vco (V)	FF(%)	η (%)
0.1	24.741	1.126	84.481	23.506
0.2	24.741	1.126	84.474	23.504
0.3	24.741	1.126	84.467	25.502
0.4	24.741	1.126	84.460	23.500

Il est nettement clair d'après les résultats obtenus pour ces différentes variations que l'épaisseur des couches Spiro-OMeTAD (HTL) et c-TiO₂ (ETL) n'a aucun effet sur les performances ce qui nous a conduit à choisir une épaisseur très fine pour ces deux couches et qui correspond à une valeur de 0.1 μm .

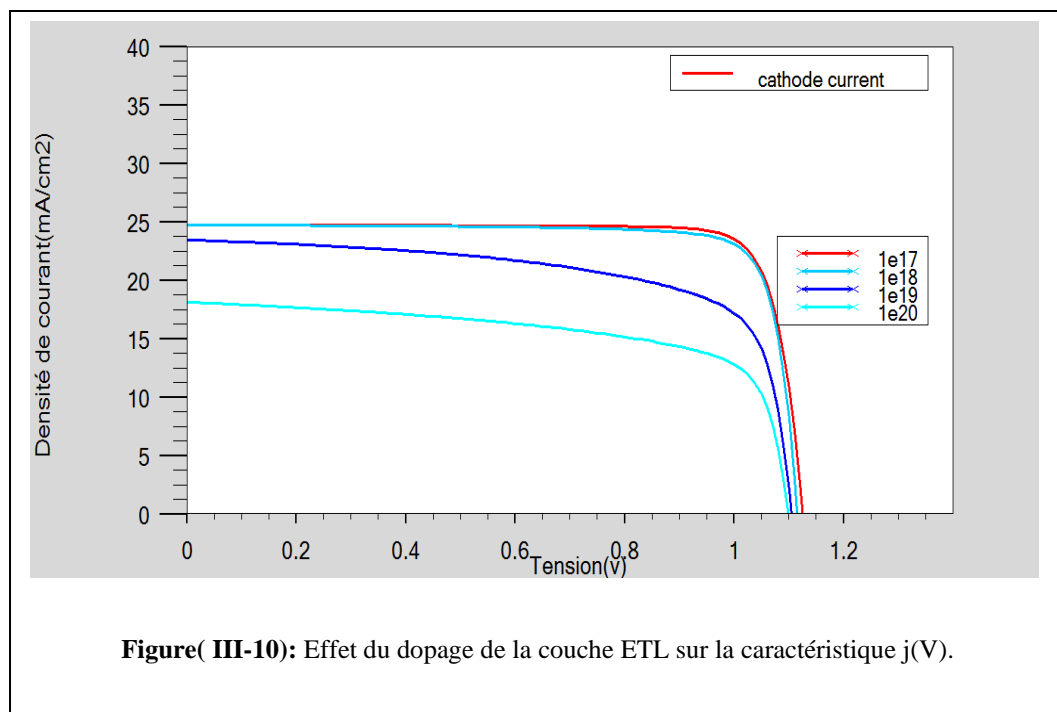
III.2.3 Influence des paramètres physiques sur les performances de la cellule :

Dans cette partie, on étudie l'impact du dopage sur les caractéristiques électriques et les performances photovoltaïques de la cellule, les couches qui sont sujettes à dopage sont évidemment les couches HTL et ETL.

III.2.3.1 Effet du dopage de la couche ETL :

a) Caractéristiques J(V) et P(V) :

L'effet de la variation du dopage pour la couche ETL sur les caractéristiques J(V) et P(V) de la cellule solaire est illustré sur les figures (III.10) et (III.11) respectivement. La plage de variation s'étale de 1×10^{17} à 1×10^{20} μm .



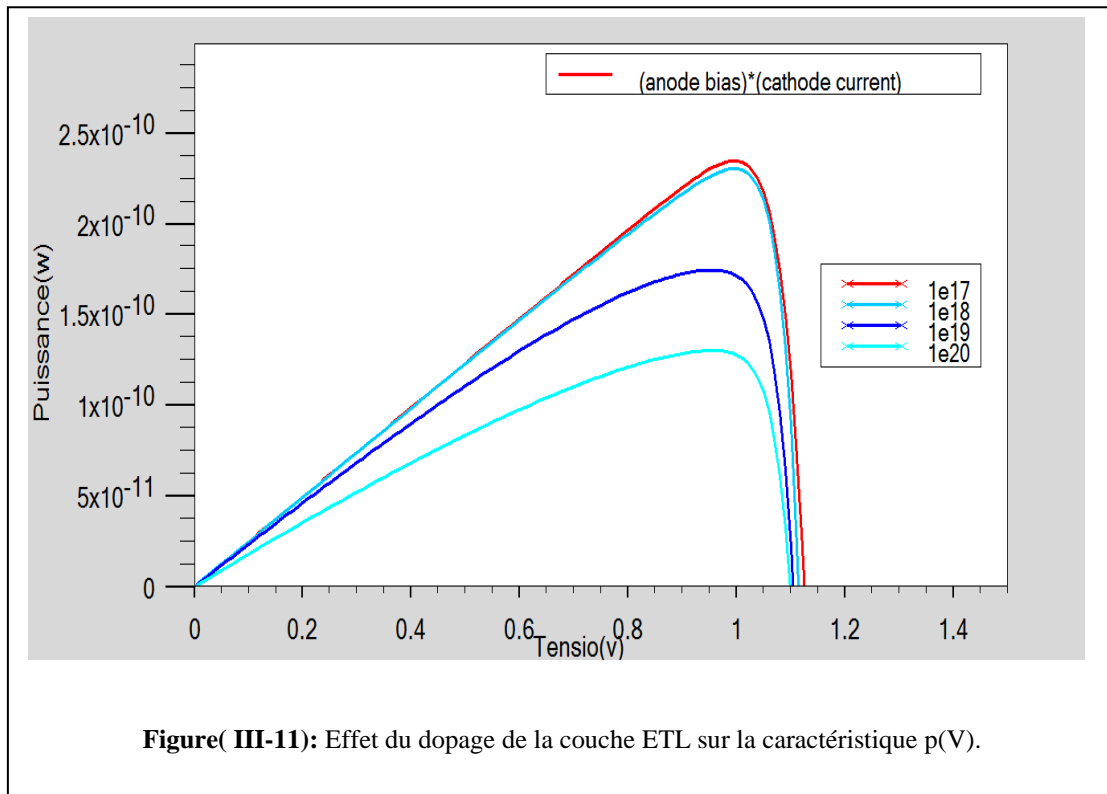
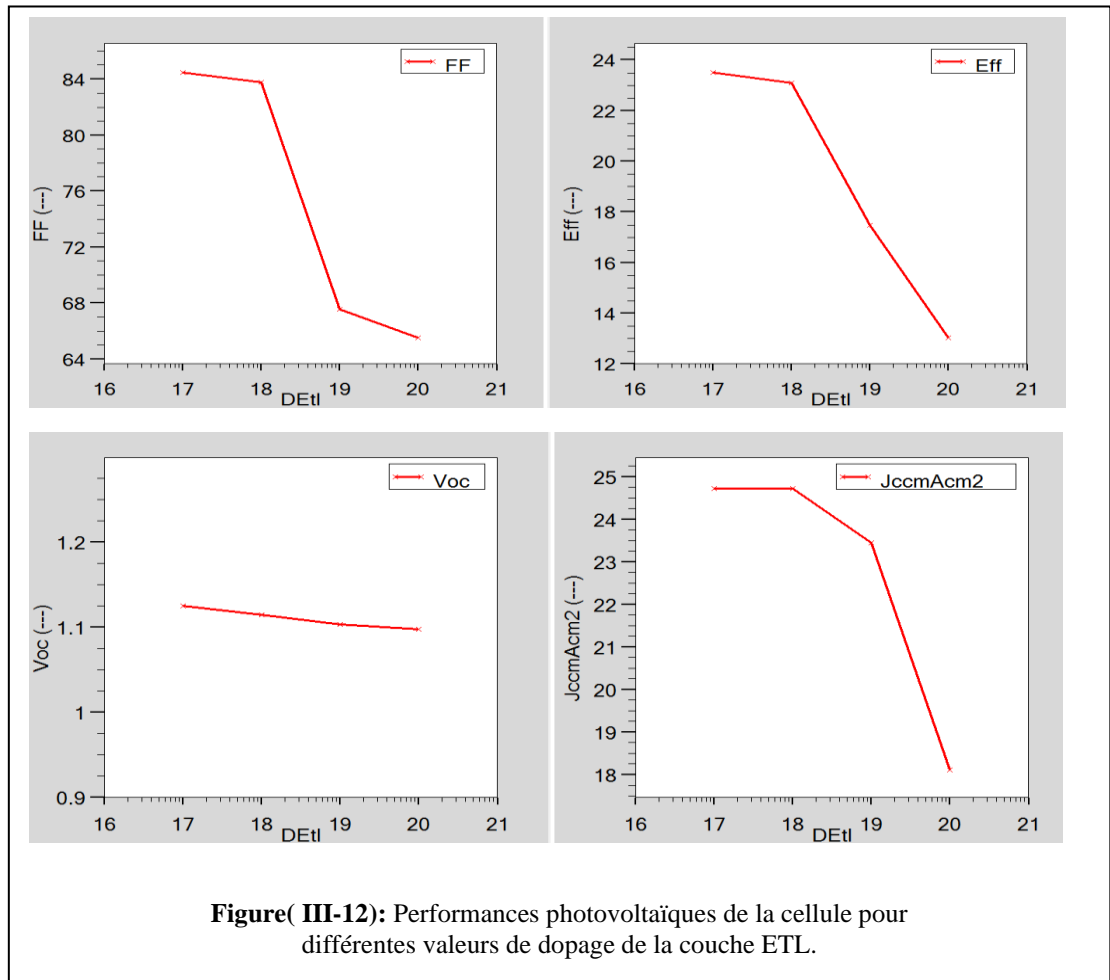


Figure (III-11): Effet du dopage de la couche ETL sur la caractéristique p(V).

On remarque sur ces deux courbes que la meilleure valeur de dopage de la couche ETL est 10^{17} .

a) Performances photovoltaïques de la cellule :

La figure (III.12) exprime l'impact de la variation du dopage de la couche ETL sur les performances photovoltaïques de la cellule solaire. La plage de variation s'étend de 1×10^{17} à $1 \times 10^{20} \mu\text{m}$.



D'après ces représentations, il s'avère que les meilleures performances sont obtenues pour un dopage de la couche ETL d'une valeur de $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. L'augmentation du dopage de cette couche dégrade significativement les performances comme il est exposé au tableau ci-dessous.

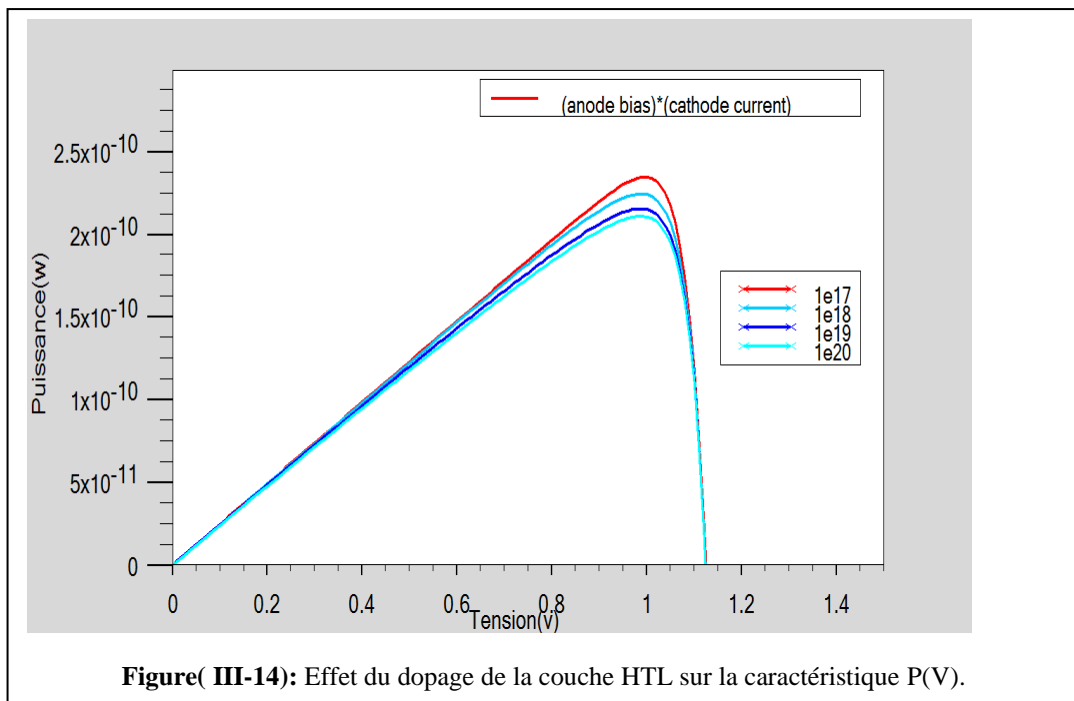
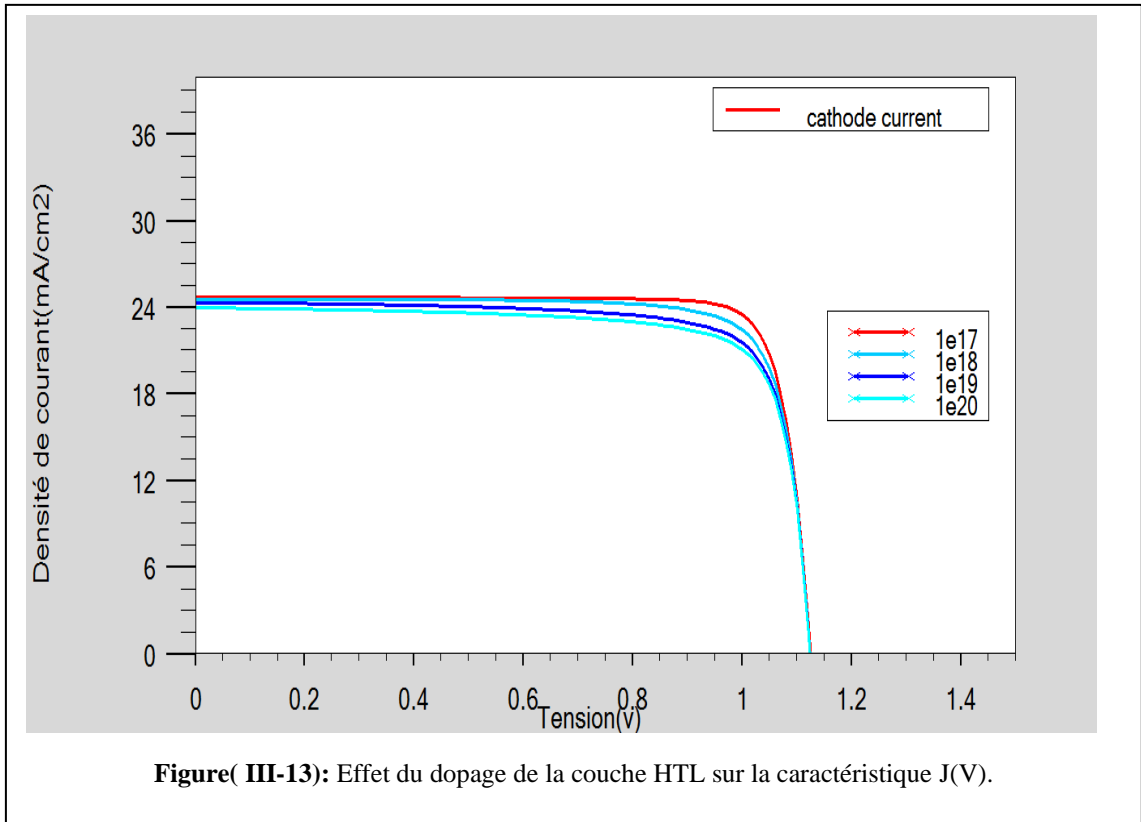
Tableau(III-6) : Performances photovoltaïques de la cellule pour différentes valeurs de dopage de la couche ETL

Dopage (cm-3)	Jcc (mA/cm2)	Vco (V)	FF (%)	η (%)
1×10^{17}	24.762	1.126	84.485	23.533
1×10^{18}	24.730	1.116	83.792	23.009
1×10^{19}	23.489	1.104	67.672	17.510
1×10^{20}	18.119	0.98	65.547	13.069

III.2.3.2 Effet du dopage de la couche HTL :

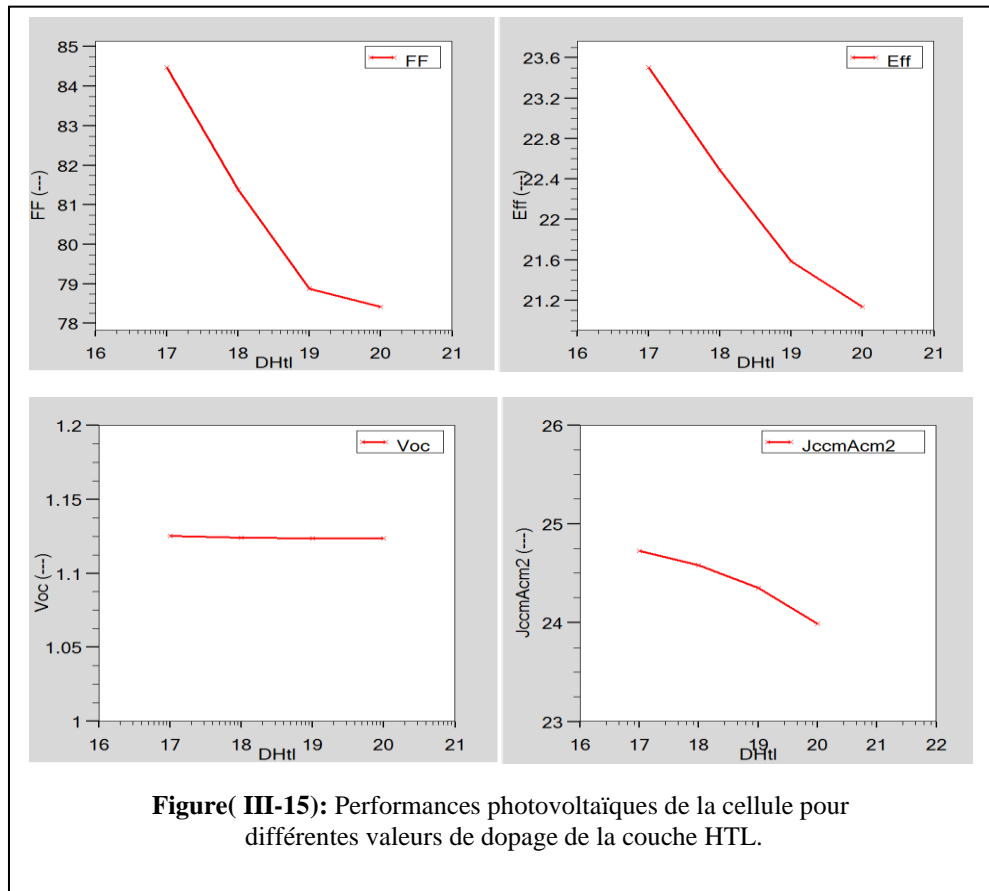
a) Caractéristiques J(V) et P(V) :

L'effet de la variation du dopage de la couche HTL sur les caractéristiques J(V) et P(V) de la cellule solaire est illustré sur les figures (III.13) et (III.14) respectivement. La plage de variation s'étale de 1×10^{17} à 1×10^{20} μm .



On remarque sur ces deux courbes que la meilleure valeur de dopage de la couche HTL est 10^{17} .

b. Performances photovoltaïques de la cellule :



Figure(III-15): Performances photovoltaïques de la cellule pour différentes valeurs de dopage de la couche HTL.

Tableau(III-7): Performances photovoltaïques de la cellule différentes valeurs de dopage de la couche HTL

Dopage (cm-3)	Jcc (mA/cm2)	Vco (V)	FF (%)	η (%)
1×10^{17}	24.724	1.126	84.482	23.512
1×10^{18}	24.591	1.126	81.395	22.496
1×10^{19}	24.355	1.124	78.833	21.583
1×10^{20}	23.998	1.124	78.440	21.139

On constate qu'à chaque fois qu'un changement de la valeur du dopage est effectuée, une réduction des performances photovoltaïques de la cellule est observée. La valeur du dopage à laquelle on a opté est de $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.

III.3 Cellule de référence à base de MASnI3 :

III.3.1 Description et simulation de la cellule :

La structure de la cellule solaire à base de MASnI3 est constituée par : une fenêtre optique conductrice et transparente (ITO) et l'absorbeur à base du MASnI3. Le contact arrière est un métal (gold) qui occupe toute la surface, et la couche c-TiO2 jouant le rôle de transporteur d'électrons (ETL) et enfin le matériau de transport de trous spiro-OMeTAD (HTL). Les différents paramètres utilisés pour la simulation de cette cellule sont présentés dans le Tableau (III.2) [8].

III.3.1.1 Paramètres utilisés dans le logiciel:

c) Paramètres des différentes couches :

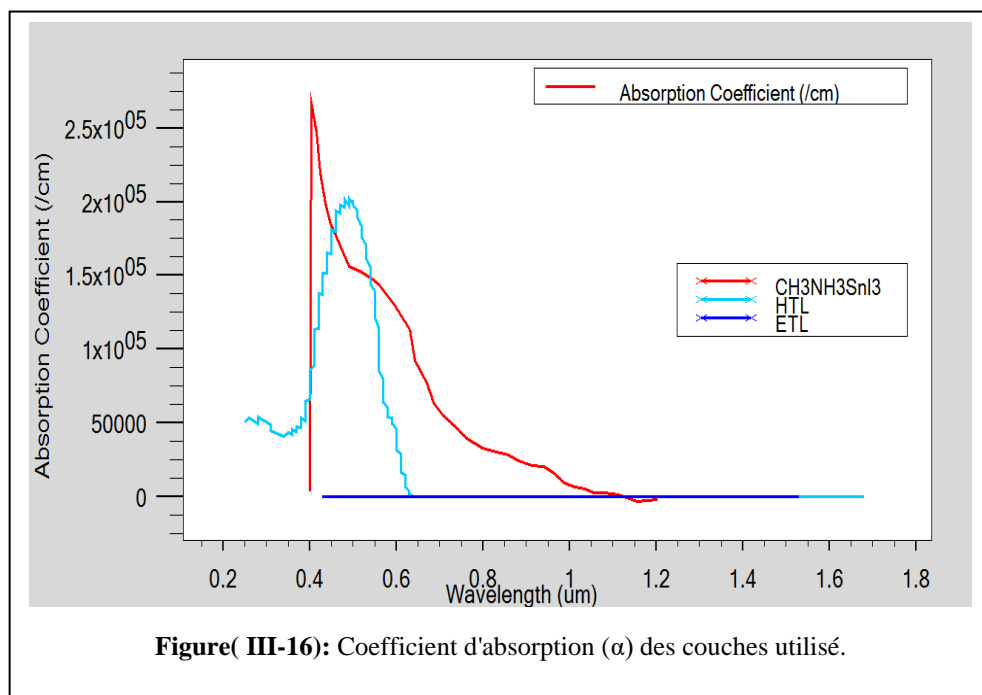
Le Tableau (III.1) résume les propriétés géométriques et électroniques des trois couches MASnI3, c-TiO2 et Spiro-OMeTAD utilisés lors de la simulation de notre structure.

Tableau(III-8): Paramètres des couches de la cellule solaire à base du MASnI3 [21].

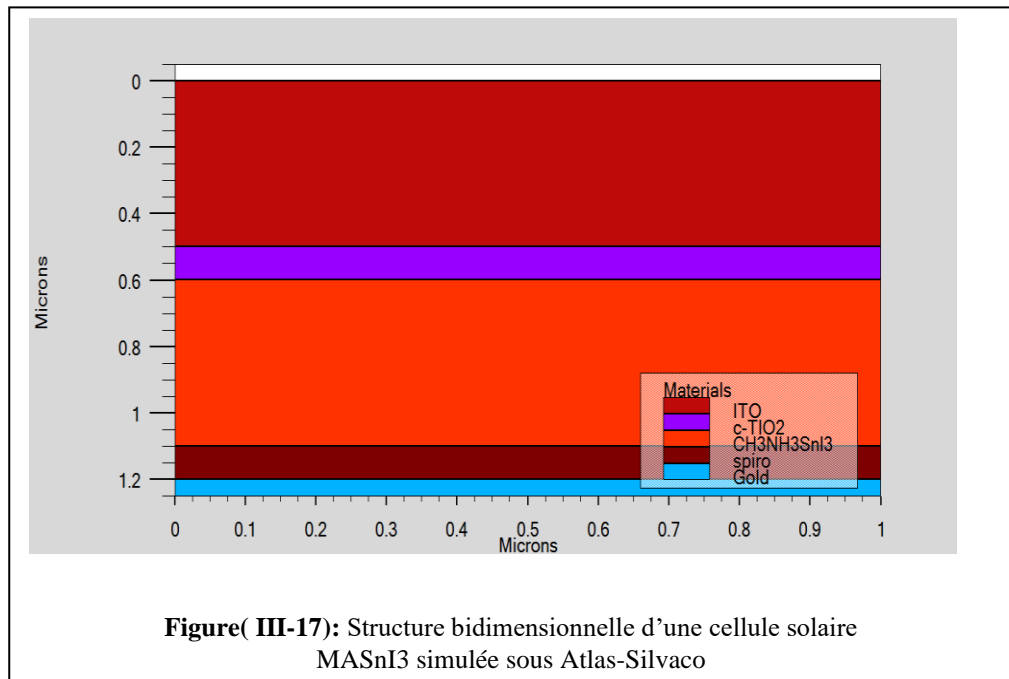
	C-TiO2	MASnI3	Spiro-OMeTAD
Épaisseur (nm)	100	500	100
Energie de gap (eV)	3.2	1.3	3
Permittivité (ϵ)	19	8.2	3
Affinité électronique (eV)	4	4.17	2.45
Mobilité des électrons (cm²/Vs)	0.2	1.6	2×10^{-3}
Mobilité des trous (cm²/Vs)	0.1	1.6	2×10^{-3}
τ_n (s)	10^{-7}	10^{-6}	10^{-7}
τ_p (s)	10^{-7}	10^{-6}	10^{-7}
NC (1/cm³)	2×10^{18}	10^{18}	2×10^{18}
NV (1/cm³)	2×10^{19}	10^{18}	2×10^{19}

d) Paramètres optiques des couches :

De la même manière que pour la cellule précédente, La figure (III.16) représente la variation du coefficient pour différentes longueurs d'onde du spectre visible sous Atlas Silvaco. Ce coefficient est comparé à celui des deux autres couches ; le c-TiO₂ et Spiro OMeTAD.

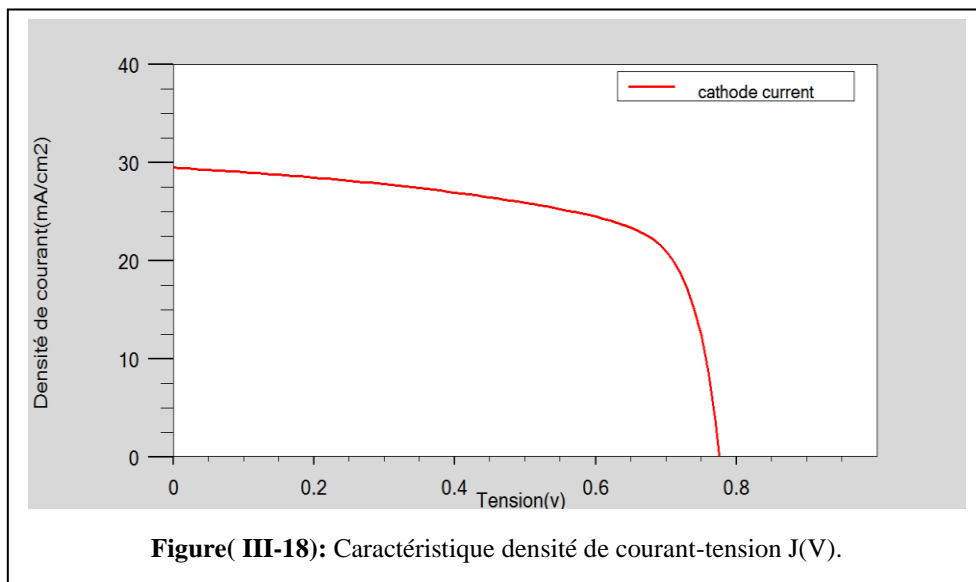
**III.3.1.2 Structure de la cellule :**

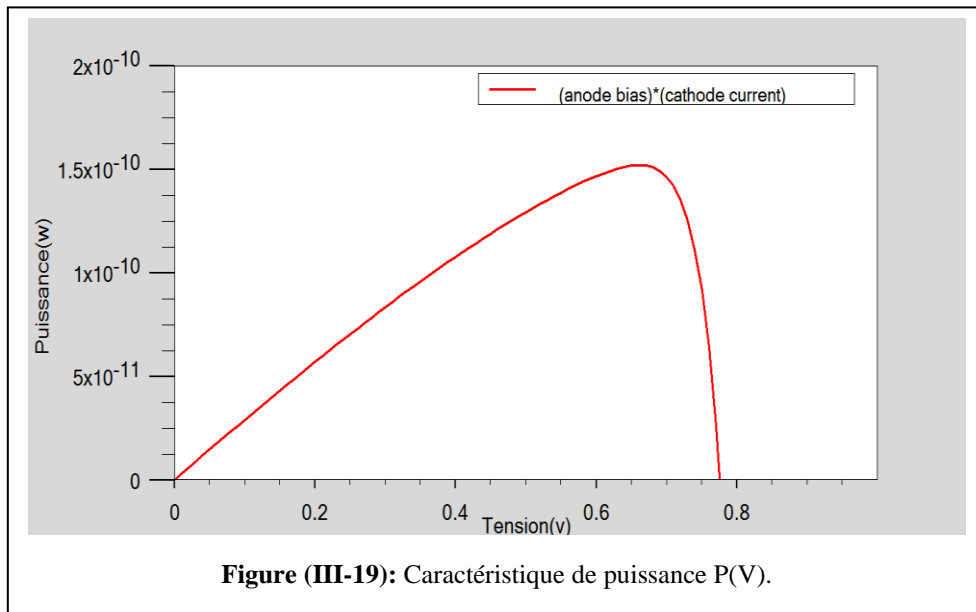
La structure de notre cellule simulée est représentée à la figure (III.17) qui exhibe les différentes couches qui la composent.



III.3.1.3 Caractéristiques électriques de la cellule :

La simulation a été effectuée dans les conditions standards ASTM que la cellule précédente. Les résultats obtenus sont montrés sur la figure (III.18) et (III.19) représentant respectivement les caractéristiques J(V) et P(V). Ces résultats sont également conformes à ceux déjà obtenus [22].





III.3.1.4 Performances photovoltaïques obtenues :

Les performances photovoltaïques obtenus lors de cette simulation sont résumés dans le tableau (III.9):

Tableau(III-9): Les performances photovoltaïques de la cellule solaire.

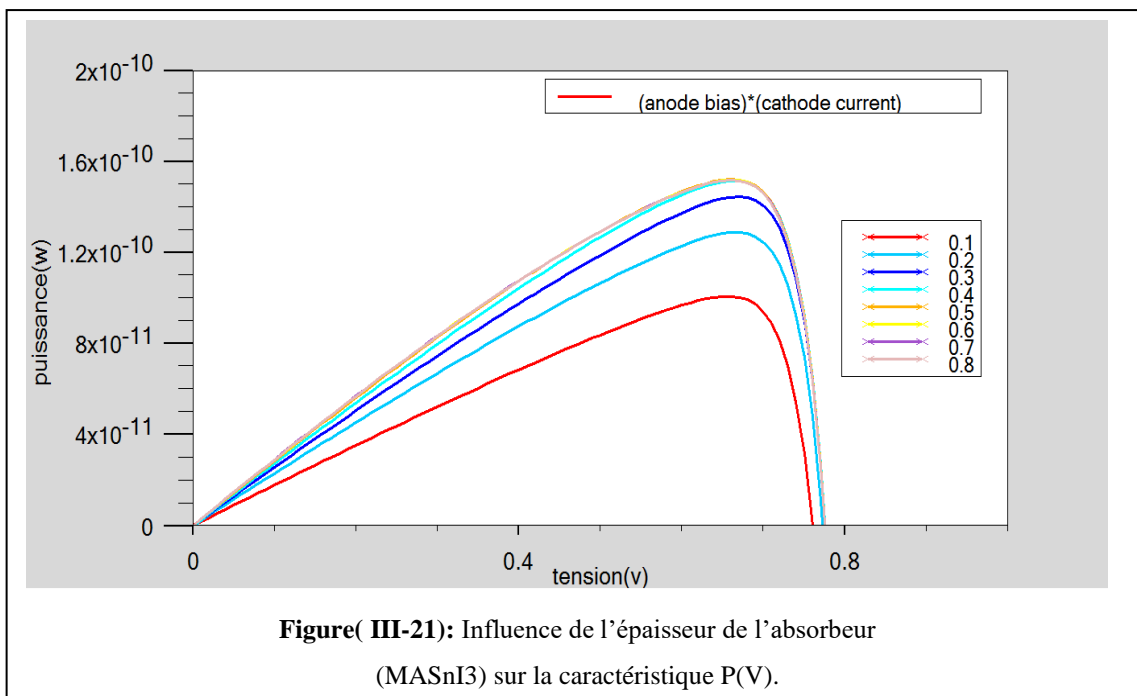
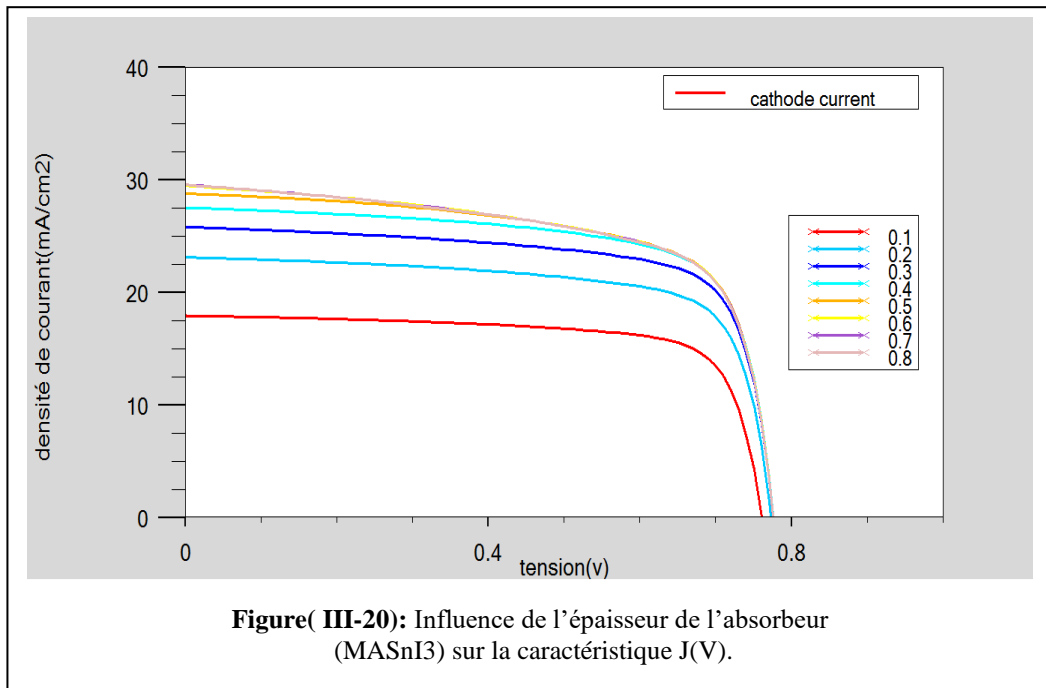
Jcc (mA.cm ⁻²)	Vco(V)	FF(%)	η (%)
28.77	0.77	68.00	15.17

III.3.2 Influence des paramètres géométriques sur les performances de la cellule :

III.3.2.1 Effet de l'épaisseur de la couche absorbante :

b) Caractéristiques électriques :

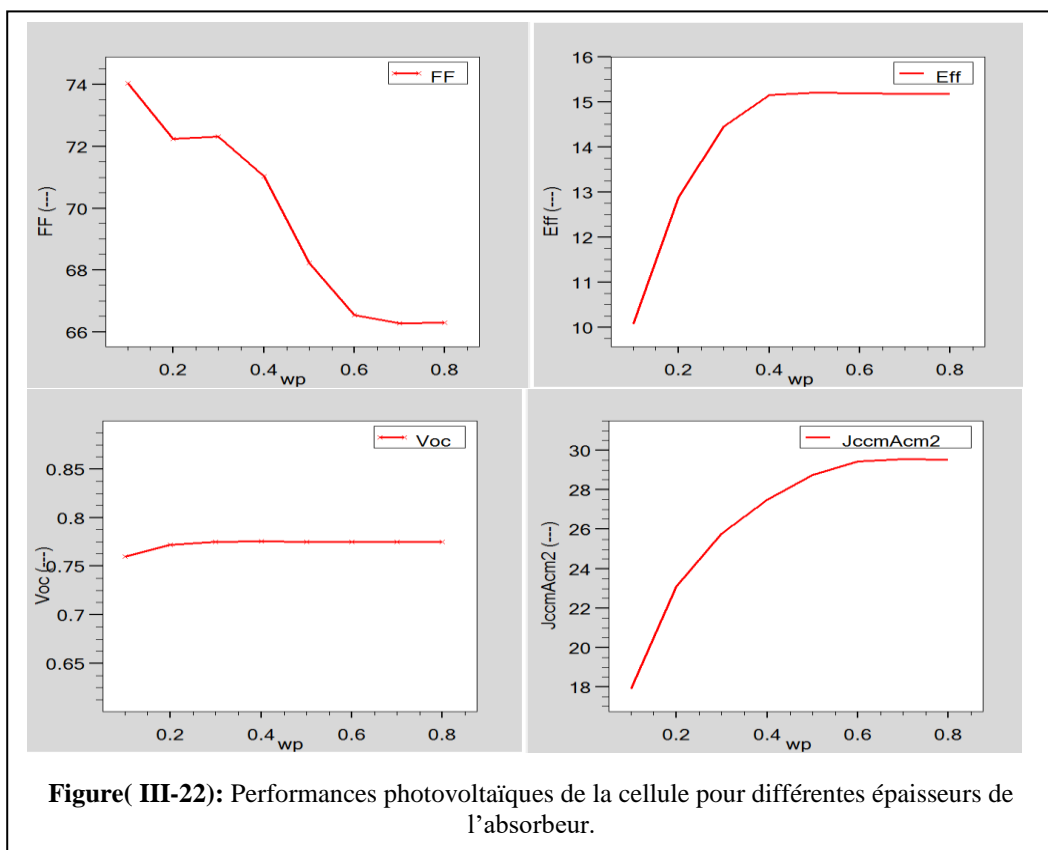
Les figures (III.20) et (III.21) représentent respectivement la caractéristique J(V) et P(V) de la cellule solaire MASnI3 pour différentes épaisseurs de l'absorbeur allant de 0.1 à 0.8μm.



On remarque sur ces deux courbes que la meilleure épaisseur de la couche absorbante est 0.8 μm

c) Performances photovoltaïques pour différentes épaisseurs du MASnI3 :

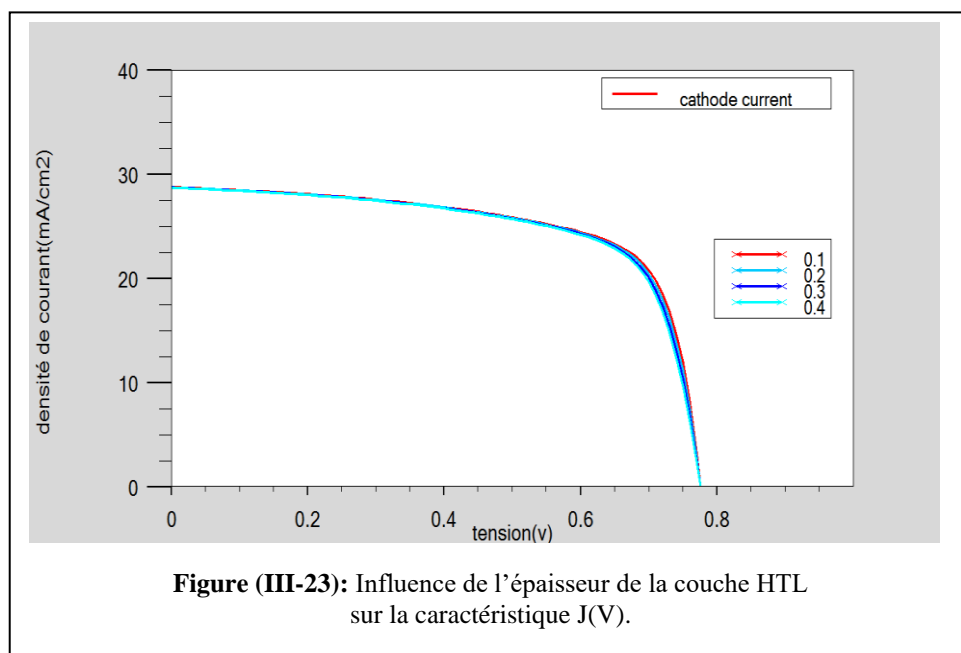
Dans le cas de cette cellule, les mêmes observations notées précédemment se répètent comme le montre les figures (III.22). Une épaisseur de $0.5\mu\text{m}$ (Tableau III.6) s'avère optimale pour cette structure. Le rendement de conversion augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de l'absorbeur (MASnI3), jusqu'à atteindre la valeur de $0.5\mu\text{m}$ où il devient presque constant avoisinant les 15.20%. Tous les résultats relatifs à cette cellule sont présentés au tableau ci-dessous.

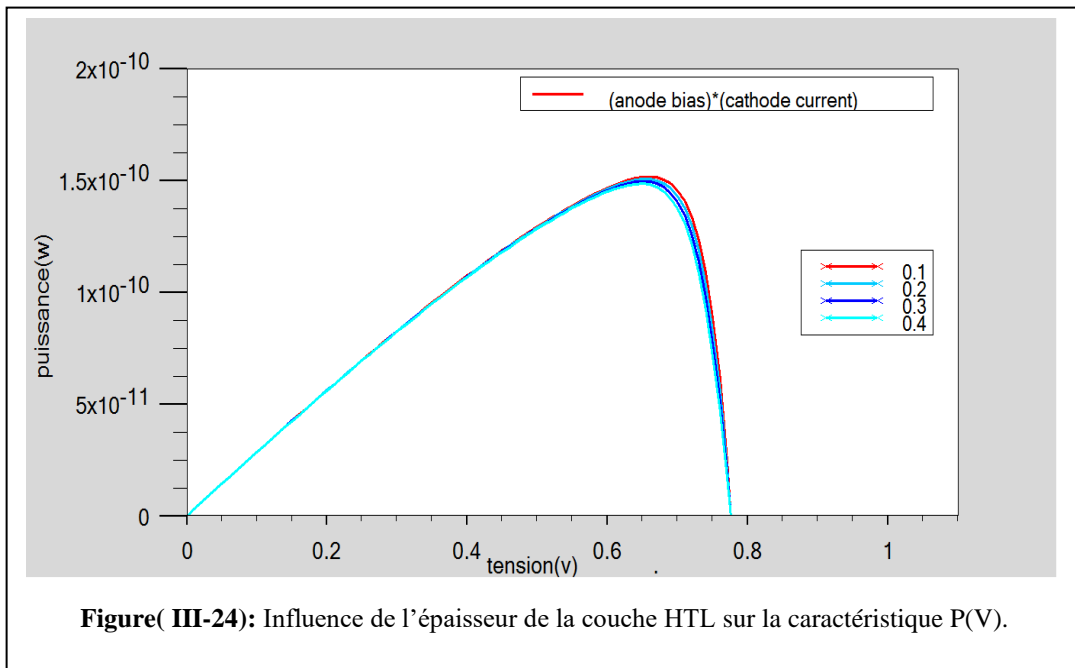


III.3.2.2 Effet de l'épaisseur des couches HTL et ETL :

Dans la cellule MASnI₃, le comportement vis-à-vis de la variation des épaisseurs des couches HTL et ETL est identique à son homologue à base de MAPbI₃. En effet, aucun changement dans les performances n'est perçu sur toute la plage de variation de l'épaisseur comme il sera montré sur tous les graphes et tableaux qui suivent.

b) Caractéristiques J(V) et P(V) :





On remarque sur ces deux courbes que la meilleure épaisseur de la couche HTL est 0.1µm

b) Performances photovoltaïques de la cellule pour l'épaisseur de la couche HTL :

Tableau(III-10): Performances photovoltaïques de la cellule pour différentes épaisseurs de la couche HTL.

Epaisseur (µm)	Jcc (mA/cm2)	Vco (V)	FF (%)	H (%)
0.1	28.743	0.775	68.006	15.177
0.2	28.729	0.775	67.551	15.065
0.3	28.715	0.775	67.138	14.968
0.4	28.701	0.775	66.714	14.855

c) Performances photovoltaïques de la cellule pour l'épaisseur de la couche ETL :

Tableau(III-11): Performances photovoltaïques de la cellule pour différentes épaisseurs de la couche ETL.

Epaisseur (µm)	Jcc (mA/cm2)	Vco (V)	FF (%)	η (%)
0.05	28.743	0.775	68.002	15.155
0.1	28.777	0.775	68.007	15.174
0.2	28.777	0.775	68.000	15.172
0.3	28.777	0.755	67.994	15.172
0.4	28.777	0.755	67.996	15.171

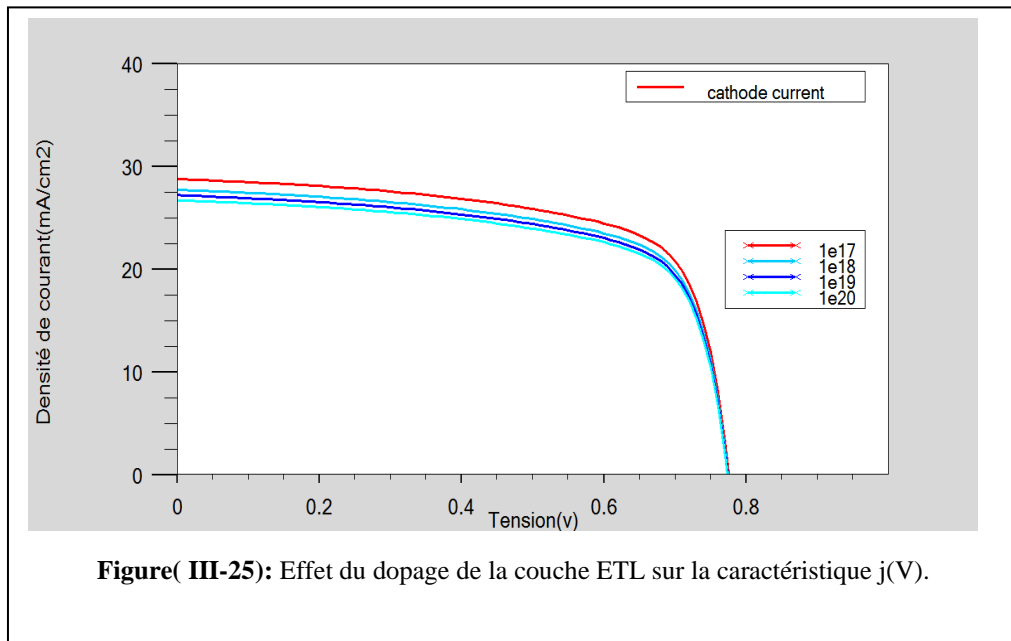
III.3.3 Influence des paramètres physiques sur les performances de la cellule :

Dans cette partie nous découvrons l'impact du dopage sur les caractéristiques électriques et Performances photovoltaïques de la cellule , les couches sujettes à ce dopage sont les couches HTL et ETL .

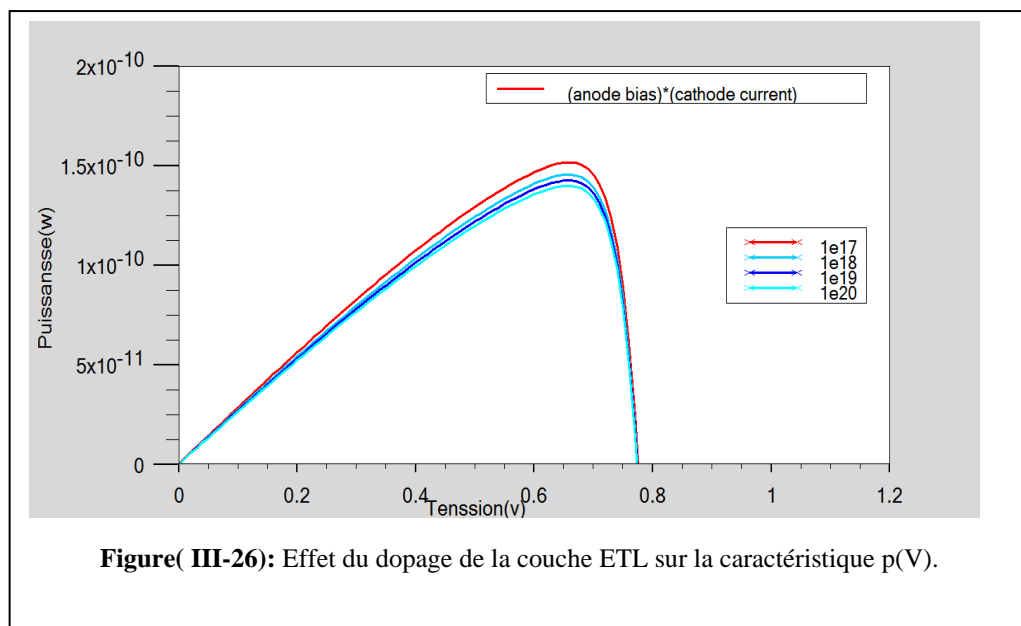
III.3.3.1 Effet du dopage de la couche ETL :

b) Caractéristiques J(V) et P(V) :

L'effet de la variation des valeurs de dopage pour la couche ETL sur les caractéristiques J(V) et P(V) de la cellule solaire est illustré sur les figures (III.25) et (III.26) respectivement. La plage de variation s'étale de 1×10^{17} à $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$.



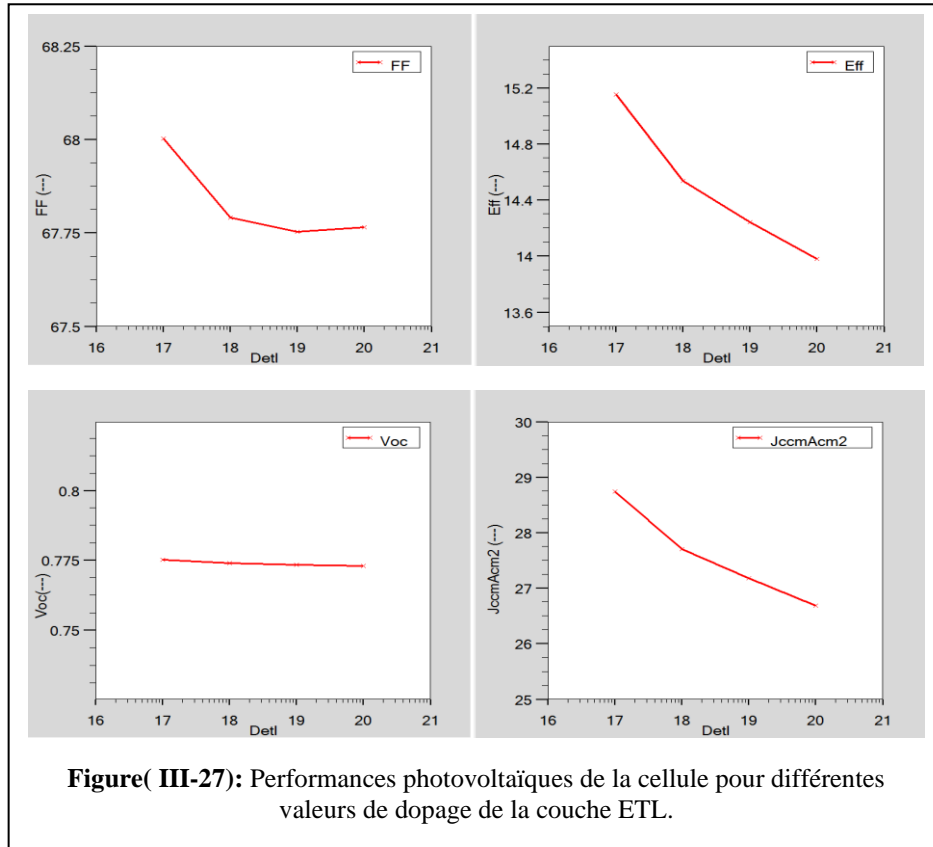
Figure(III-25): Effet du dopage de la couche ETL sur la caractéristique j(V).



Figure(III-26): Effet du dopage de la couche ETL sur la caractéristique p(V).

On remarque sur ces deux courbes que la meilleure valeur de dopage de la couche ETL est 10^{17} .

b) Performances photovoltaïques de la cellule :



Tableau(III-12): Performances photovoltaïques de la cellule pour différentes valeurs de dopage de la couche ETL.

Dopage (cm ⁻³)	Jcc (mA/cm2)	Vco (V)	FF (%)	η (%)
1 × 10¹⁷	28.740	0.776	68.002	15.152
1 × 10¹⁸	27.702	0.774	67.791	14.539
1 × 10¹⁹	27.188	0.774	67.753	14.244
1 × 10²⁰	26.683	0.773	67.767	13.981

L'augmentation de la valeur du dopage réduit les performances photovoltaïques de la cellule. Notre choix s'est fixé sur la valeur $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ pour de meilleures Performances.

III.3.3.2 Effet du dopage de la couche HTL :

a) Caractéristiques J(V) et P(V) :

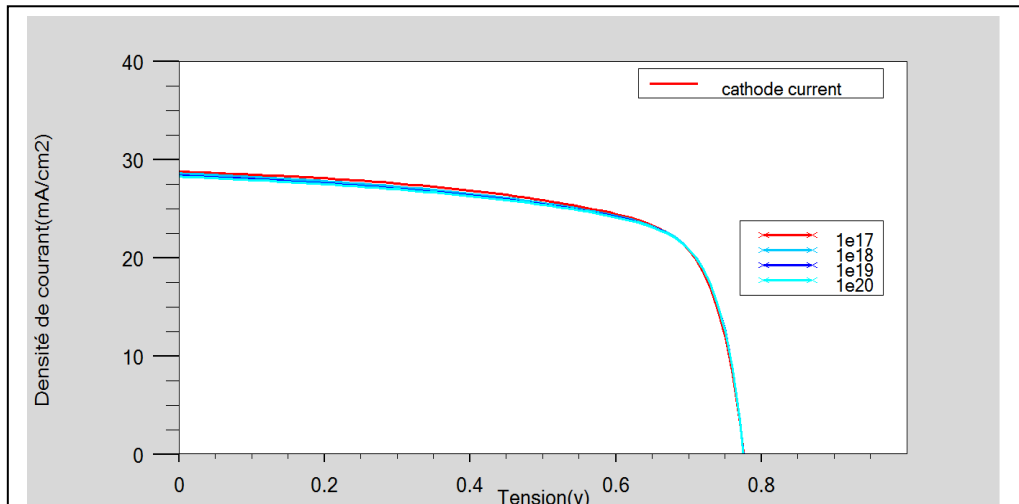
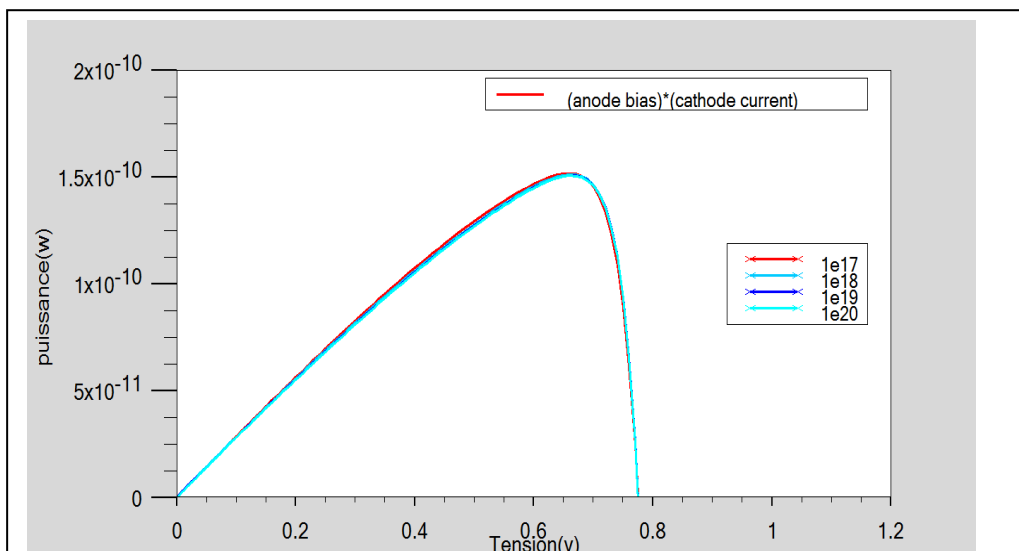


Figure (III-28): Effet du dopage de la couche HTL sur la caractéristique j(V).



Figure(III-29): Effet du dopage de la couche HTL sur la caractéristique p(V).

On remarque sur ces deux courbes que la meilleure valeur de dopage de la couche HTL est 10^{17} .

b) Performances photovoltaïques de la cellule :

Tableau (III-13) : Performances photovoltaïques de la cellule pour différentes valeurs de dopage de la couche HTL

Dopage (cm⁻³)	Jcc (mA/cm²)	Vco (V)	FF (%)	η (%)
1 × 10¹⁷	28.742	0.775	68.002	15.154
1 × 10¹⁸	28.573	0.775	68.238	15.109
1 × 10¹⁹	28.337	0.775	68.597	15.065
1 × 10²⁰	28.258	0.775	68.741	15.045

Contrairement au cas précédent, la variation du dopage de la couche HTL, les mêmes performances subsistent. Notre choix s'est orienté vers un dopage de $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.

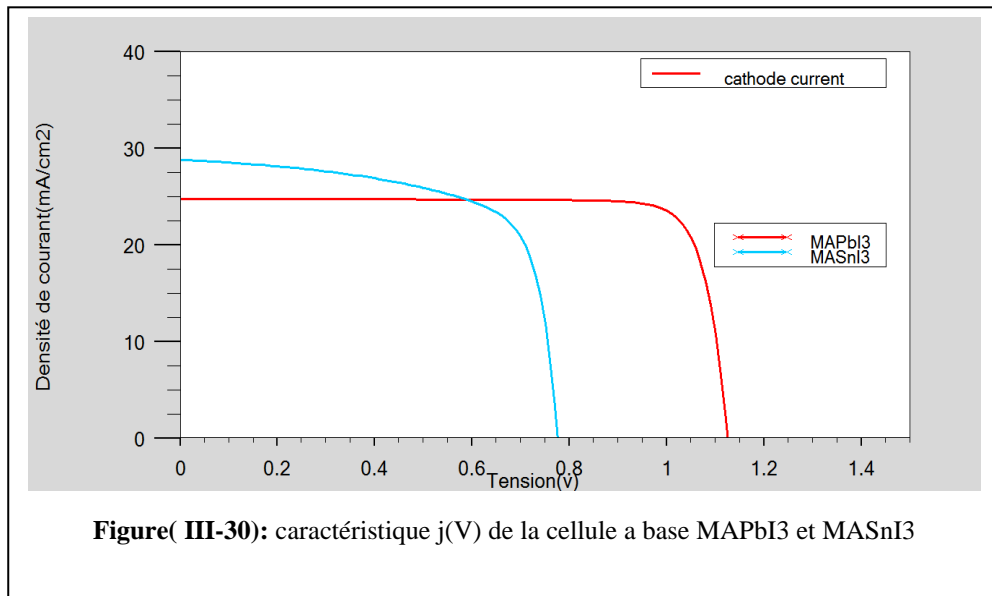
III.4 Comparaison entre les deux cellules :

Dans cette partie, on va faire une comparaison entre la cellule basée sur le MAPbI₃ et la cellule basée sur le MASnI₃, en nous appuyant sur les résultats précédemment obtenus.

III.4.1 Caractéristiques électriques des deux cellules :

a) Caractéristiques J(V) :

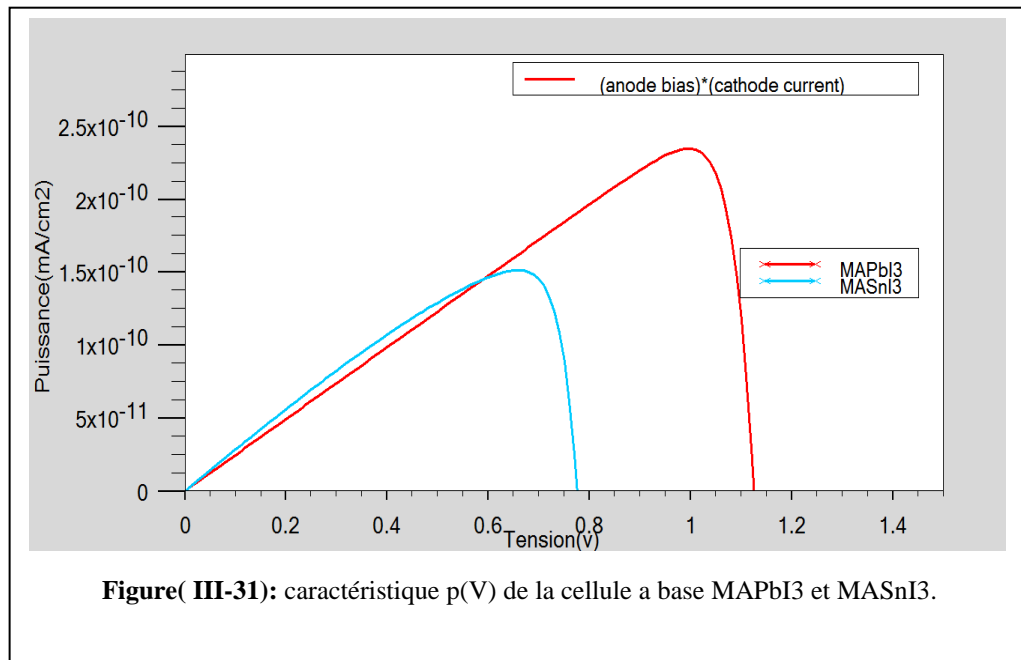
La figure (III.30) représente la superposition des deux densités de courant des cellules à base de MASnI₃ et MAPbI₃.



On remarque que la densité de courant de la cellule basée sur le MASnI3 égale à 28,77 mA/cm², est supérieure à celle basée sur le MAPbI3, qui est égale à 24,72 mA/cm². En ce qui concerne la tension de la cellule basée sur le MASnI3, elle est de 0,77 volt) nettement plus faible que celle basée sur le MAPbI3 de valeur 1,12 volt.

b) **Caractéristiques P(V) :**

De même, la figure (III.31) représente les courbes de puissance des cellules à base de MASnI3 MAPbI3. Les courbes de puissance sont également représentées sur la figure (III.31)



c) Performances photovoltaïques des deux cellules :

La figure (III.32) représente les performances photovoltaïques des deux cellules, la cellule basée sur MASnI3 et la cellule basée sur MAPbI3 .

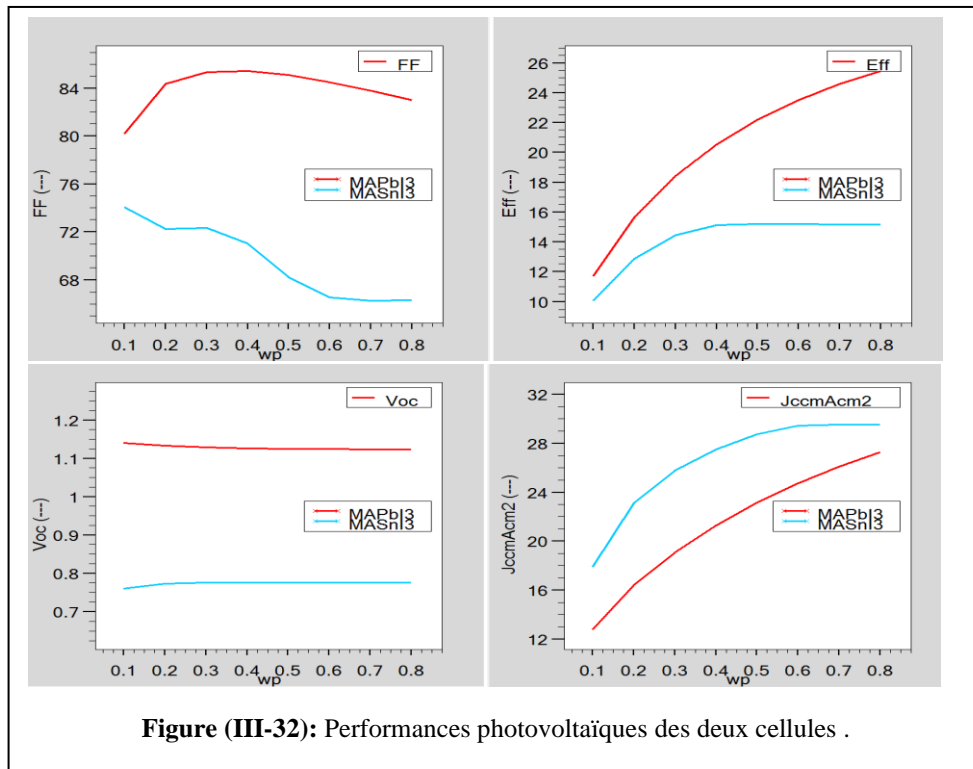


Figure (III-32): Performances photovoltaïques des deux cellules .

Le tableau suivant résume les performances PV pour les deux cellules

Tableau III-14): Les performances photovoltaïques des deux cellules.

la cellule basée sur :	Jcc (mA.cm ⁻²)	Vco (V)	FF (%)	η (%)
MAPbI3	24.72	1.12	84.48	23.49
MASnI3	28.77	0.77	0.77	15.17

On remarque que les Performances photovoltaïques de la cellule basée sur MAPbI3 sont meilleures que la cellule basée sur MASnI3 .

III.5 Conclusion :

Dans ce travail, nous avons présenté et discuté les résultats d'étude par simulation numérique des caractéristiques électriques d'une cellule solaire, ces résultats sont générés par le logiciel de simulation silvaco Atlas.

On a étudié l'effet de l'épaisseur des couches c-TiO₂ (ETL), Spiro-OMeTAD (HTL) et la couche de l'absorbeur. Ensuite nous avons étudié l'effet de dopage HTL et ETL sur les performances photovoltaïques de la cellule basée sur MAPbI₃. Cela se fait par extraction des caractéristiques électriques J(V) et P(V) et des paramètres électriques (V_{oc} , J_{sc} , FF, Eff).

En deuxième lieu, nous avons étudié l'effet de l'épaisseur et le dopage sur les performances photovoltaïques de la cellule basée sur MASnI₃, et ensuite nous avons comparé les deux cellules et extrait les meilleures performances photovoltaïques des deux cellules.

Conclusion générale

Dans notre travail, nous avons étudié les performances des cellules photovoltaïques à l'aide d'une simulations numériques par le programme Silvaco. Nous avons examiné les performances de deux cellules à base de l'absorbeur (MAPbI₃) et (MASnI₃). Nous avons modifié l'épaisseur des couches cellulaires liées à l'absorbeur (MAPbI₃) et obtenu les meilleures performances avec une épaisseur de couche de gravure HTL Spiro-OMeTAD de 100 nm, une couche ETL TiO₂ de 100 nm et une couche absorbante MAPbI₃ de 600 nm. Ensuite, nous avons dopé les deux couches avec une concentration de 1×10^{17} pour HTL et 1×10^{17} pour ETL.

Nous avons également modifié l'épaisseur des couches cellulaires liées à l'absorbeur (MASnI₃) et obtenu les meilleures performances avec une épaisseur de couche HTL de 100 nm, une couche ETL de 100 nm, une couche MASnI₃ de 500 nm et une concentration de 1×10^{17} pour ETL et HTL.

Les résultats d'efficacité de conversion nous ont montré 23,49% pour la première cellule et 15,17% pour la deuxième cellule. À partir de ces résultats, nous concluons que l'efficacité de conversion de la cellule qui contient du plomb est supérieure à celle de la cellule qui n'en contient pas. Cependant, la cellule sans plomb reste bénéfique pour l'environnement, malgré son faible rendement.

Références

- [1] K. W. Ford, *Studies on the more efficient use of energy*, Editor APS, NY (USA), pp290-327, (1975).
- [2] Lekhouimes Ahmed Khalil (Simulation une cellule photovoltaïque à base perovskite) Université Echahid Hamma Lakhdar El-Oued Algerie.
- [3] Nunzi, J.-M. (2002). *Organic photovoltaic materials and devices. Comptes Rendus Physique*, 3(4), 523–542. doi:10.1016/s1631-0705(02)01335-x
- [4] CH. HOUDA, « Etude d'une cellule solaire à base de structure PIN », mémoire magister Université HADJ LAKHDAR BATNA, 2015.
- [5] K. TAKI EDDINE, « Modélisation et commande d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique », mémoire de master. Université MOHAMED BOUDIAF M'SILA, 2016.
- [6] B. OUIZA, « Etude et Simulation des paramètres électriques d'une cellule solaire photovoltaïque à base de Silicium » Mémoire master. Université MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU ,2017.
- [7] S. Oussidhoum, Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri TIZIOUZOU (2015).
- [8] G. Eperon, V.M. Burlakov, P. Docampo, A. Goriely and H.J. Snaith, 'Morphological control for high performance, solution processed planar heterojunction perovskite solar cells', *Advanced Functional Materials*, Vol. 24, N°1, pp. 151 - 157, 2014.
- [9] E. Mete, R. Shaltaf, et S. Ellialtioglu, « *Phys. Rev. B* 68 », 035119,(2003).
- [10] EMPA Dübendorf, « St-Gall », Thoune,. 7septembre 2005 .
- [11] Pia Dally. Université Grenoble Alpes, 2019 .
- [12] G.E Eperon, V.M.al, 'Morphological control for high performance, solution processed planar heterojunction perovskite solar cells', *Advanced Functional Materials*, 2014.
- [13] X. Li, J. Zhang, al, 'Effects of Ti precursors on the performance of planar perovskite solar cells', *Applied Surface Science*, 2018.
- [14] S. Wang, al, 'Large guanidinium cation enhance photovoltage for perovskite solar cells via solution-processed secondary growth technique', *Solar Energy*, 2018.

- [15] D. Selvakumar, al, 'Heteroatom doped reduced graphene oxide paper for large area perovskite solar cells', Solar Energy, 2018
- [16] J.I. Kim, al, 'Use of AuCl₃-doped graphene as a protecting layer for enhancing the stabilities of inverted perovskite solar cells', 2018.
- [17] KAGHOUCHE Bessem "Etude par tcad-silvaco d'une structure mos pour la realisation de capteurs isfet : parametrestecnologiques et electriques" mémoire de magister Université Mentouri– Constantine 2010.
- [18] DIB Wassila Née KAZI-TANI "modelisation des structures photovoltaïques : aspects fondamentaux et appliques" mémoire de Doctorat UNIVERSITE Aboubekr Belkaid de tlemcen 2011.
- [19] ATLAS User's "Manual-device simulation software" volume 1.
- [20] Samy Almosni, al, 'Tunneling-Assisted Trapping as one of the Possible Mechanisms for the Origin of Hysteresis in Perovskite Solar Cells', Energy Technol, 2017.
- [21] Hui-Jing Du al , ' Device simulation of lead-free CH₃NH₃SnI₃perovskite solar cells with high efficiency 'Chinese Phys, 2016.
- [22] P. Chelvanathan et al, Current Applied Physics (2010).

Resumé:

Dans le processus d'amélioration de l'énergie photovoltaïque respectueuse de l'environnement, dans notre travail, nous avons exploité le matériau pirovskits pour convertir la lumière en énergie électrique, et nous avons également analysé et comparé les deux cellules photovoltaïques avec deux formules chimiques ($\text{ch}_3\text{nh}_3\text{pbI}_3$), qui contiennent du plomb métallique, et ($\text{ch}_3\text{nh}_3\text{sni}_3$), qui est sans plomb, en utilisant le programme de simulation (Silvaco). où le résultat de (pce) pour la formule ($\text{ch}_3\text{nh}_3\text{pbI}_3$) est apparu supérieur à la formule ($\text{ch}_3\text{nh}_3\text{sni}_3$), et nous en concluons que cette dernière est moins productif et a une énergie propre, et en général, les résultats obtenus font des pirovskits un excellent candidat pour améliorer les performances des cellules solaires.

Abstract:

In the process of improving environmentally friendly photovoltaic energy, in our work we exploited the pirovskits material to convert light into electrical energy, and we also analyzed and compared the two photovoltaic cells with two chemical formulas ($\text{ch}_3\text{nh}_3\text{pbI}_3$), which contain lead metal, and ($\text{ch}_3\text{nh}_3\text{sni}_3$), which is lead-free, using the simulation program (Silvaco). where the result of (pce) for the formula ($\text{ch}_3\text{nh}_3\text{pbI}_3$) appeared to be greater than the formula ($\text{ch}_3\text{nh}_3\text{sni}_3$), and from it we conclude that the latter is less productive and has clean energy, and in general, the results obtained make pirovskits an excellent candidate for improving the performance of solar cells.

ملخص:registrée

في عملية تحسين الطاقة الكهروضوئية الصديقة للبيئة ، في عملنا ، قمنا باستغلال مادة pirovskits لتحويل الضوء إلى طاقة كهربائية ، وقمنا أيضًا بتحليل ومقارنة خليتين ضوئيتين مع صيغتين كيميائيتين ($\text{ch}_3\text{nh}_3\text{pbI}_3$) ، والتي تحتوي على فلزات الرصاص و ($\text{ch}_3\text{nh}_3\text{sni}_3$) الخالي من الرصاص باستخدام برنامج المحاكاة (Silvaco). حيث ظهرت نتيجة (pce) للصيغة ($\text{ch}_3\text{nh}_3\text{pbI}_3$) متفوقة على الصيغة ($\text{ch}_3\text{nh}_3\text{sni}_3$) ، ونخلص إلى أن الأخيرة أقل إنتاجية ولديها طاقة خاصة ، وبشكل عام ، فإن النتائج التي تم الحصول عليها تجعل بيروفسكيتس مرشحًا ممتازًا لتحسين أداء الخلايا الشمسية .

