

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

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

جامعة سعد دحلب بليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Master

Filière Électronique

Spécialité Microélectronique

Présenté par

LOT CHAIMAA

&

YAHY MOHAMED

Etude et simulation d'une cellule solaire double jonction à base de Pérovskite/Silicium

Proposé par : Dr NACER SAID

Année Universitaire 2022-2023

Remerciements

L'achèvement de ce travail de thèse est une grande satisfaction et une immense fierté. Il est maintenant temps d'adresser des remerciements chaleureux à toutes les personnes qui m'ont soutenue au cours de ces années

D'abord, je dois remercier le bon Dieu de m'avoir donné santé, énergie pour accomplir ce travail et aussi la force de ce que je suis.

Un grand Merci à mon cher père, un gros merci à ma chère mère de m'avoir appris le défi et la persévérance.

Je remercie très sincèrement mon promoteur, Mr. NACER SAID, professeur au département d'électronique, l'Université de Saad Dahleb Blida1, qui m'a chaleureusement accueilli dans son laboratoire, et a accepté de diriger ce mémoire, et qui était toujours disponible et pour les encouragements et les conseils judicieux qui m'ont été de très grande utilité.

Mes Remerciements s'adressent également à Mme ZEROUK DJAMILA, enseignante au département d'électronique.

Merci pour ta gentillesse et ton encouragement.

Je tiens à remercier tous les membres de jury.

Enfin, Je tiens à remercier mon binôme YAHY MOHAMED et tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à réaliser ce travail.

Lot Chaimaa

Remerciements

Avant tout, Nous remercions Allah

Je tiens à remercier mon promoteur, Mr Nacer Said, professeur au département d'Electronique de L'université de Saad dahleb blida 1 pour nous avoir guidés dans ce travail

Nous remercions tous les membres de jury qui ont accepté d'examiner ce modeste travail.

Je tiens à remercier : Mm Zarouk Djamila enseignante au département d'électronique

Nos remerciements à mes enfants : Aya Allae et Adem.

Et bien sûr à mon binôme : Lot Chaimaa.

YAHY MOHAMED

Résumé

ملخص: تسيطر سوق الطاقة الشمسية على نطاق واسع على الخلايا الصلبة. تعتبر الخلايا الهوائية غير العضوية الضوئية الذكية ذات الصلة بالبيروفسكايت مرشحة رائعة للتطبيق مع الصلب الكلاسيكي بسبب كفاءتها العالية وتقنيات إنتاجها البسيطة والخالية من التكاليف. في هذا العمل، كنت مهتمًا في دراسة وتنبيت خلايا شمسية مزدوجة على أساس المواد بيروفسكايت $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3(1-x)}\text{Br}_{3x}/\text{Si}$. تم إجراء التنبيت باستخدام البرنامج COMSOL. وقد تم دراسة تأثير الجوانب البنية التحتية (تأثير البروميوم، وارتفاع الطلاء) على ميزات الخلية (الطاقة القصوى J_{cc} ، والتوتر المفتوح V_{co} ، والطاقة الكبيرة P_{max} ، والفعالية التحويلية η) مما يتيح لك تحديد الميزات التي تحسّن هيكلنا. تم تحقيق كفاءة إيجابية تصل إلى 32 في المائة في كلا التكوينين اثنين وأربعة أجهزة.

الكلمات المفتاحية: الطاقة الشمسية، ترادفي، بيروفسكايت، $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Br}_{3x}/\text{Si}$ ، COMSOL

Résumé : Le marché du photovoltaïque est largement dominé par les cellules en silicium cristallin. Les cellules photovoltaïques hybrides organiques-inorganiques à base de pérovskite sont d'excellents candidats pour une application en tandem avec le silicium cristallin, grâce à leur haut rendement et leurs techniques de fabrication simples et à bas coût. Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à l'étude et la simulation d'une cellule solaire double jonction à base de matériau pérovskite $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3(1-x)}\text{Br}_{3x}/\text{Si}$. Les simulations ont été réalisées à l'aide du logiciel COMSOL. L'influence des paramètres de la structure (concentration du Brome, et épaisseurs des couches) sur les caractéristiques de la cellule (courant de court-circuit J_{cc} , tension de circuit-ouvert V_{CO} , puissance maximale P_{max} et rendement de conversion η) a été étudiée ce qui a permis de déterminer les paramètres qui optimisent notre structure. Un rendement optimal de l'ordre de 32% a été obtenu pour les deux configurations à deux et à quatre électrodes.

Mots-clés : Photovoltaïque ; tandem ; Pérovskite ; $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3(1-x)}\text{Br}_{3x}/\text{Si}$; COMSOL

Abstract: The photovoltaic market is largely dominated by crystalline silicon cells. Perovskite-based organic-inorganic hybrid photovoltaic cells are excellent candidates for tandem application with crystalline silicon, thanks to their high efficiency and simple, low-cost manufacturing techniques. In this work, we were interested in the study and simulation of a double junction solar cell based on perovskite material $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3(1-x)}\text{Br}_{3x}/\text{Si}$. The simulations were carried out using the COMSOL software. The influence of structure parameters (bromine concentration, and layer thicknesses) on cell characteristics (short-circuit current J_{cc} , open circuit voltage V_{CO} , maximum power P_{max} and conversion efficiency) has been studied which has enabled us to determine the parameters that optimize our structure. An optimal efficiency of about 32% was achieved for both two- and four-electrode configurations.

Keywords: Photovoltaic ; tandem ; Perovskite ; $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3(1-x)}\text{Br}_{3x}/\text{Si}$; COMSOL

Sommaire

Remerciements.....	
Résumé	
Sommaire	
Liste des figures, tableaux et équations	
Introduction générale.....	01
Chapitre 01 : Généralités sur les cellules photovoltaïques.....	03
1.1 Introduction	04
1.2 Historique du photovoltaïque	04
1.3 Energie solaire.....	05
1.4 Rayonnement solaire	05
1.5. Le spectre solaire.....	07
1.6. La Cellule photovoltaïque	08
1.7 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque	08
1.8 Les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque	10
1.8.1. courant de court-circuit I_{cc}	10
1.8.2. Tension de circuit ouvert V_{co}	10
1.8.3. Facteur de forme FF	11
1.8.4. Puissance maximale P_{max}	11
1.8.5. Rendement.....	11
1. 9 Les semi-conducteurs	12
1.10 Les types de semi-conducteurs.....	12
1.10.1. Semi-conducteur type N.....	12
1.10.2. Semi-conducteur type P.....	13
1.11 L'absorption	14
1.12 Taux de génération	15
1.13 Recombinaison	15
1.14 Les équations des semi-conducteurs	17
1.14.1 Équation de Poisson	17
1.14.2 Les équations de continuité des électrons et des trous	17

Sommaire

1.15 La jonction PN.....	18
1.16 Conclusion.....	18
Chapitre 2 : Les cellules solaires à base de pérovskites / silicium	19
2.1. Introduction	20
2.2. Les cellules solaires à base de pérovskite	20
2.2.1. Les pérovskites... ..	20
2.2.2. Structure cristalline de la pérovskite	21
2.2.3 Propriétés optoélectroniques du matériau pérovskite hybride	22
2.2.3.1 Propriétés optiques	23
2.2.3.2 Propriétés électriques	24
2.2.4 Coefficient d'absorption.....	24
2.2.5 Structure d'une cellule à base de pérovskite	24
2.2.5.1 Matériaux de transport de trous (HTM):	26
2.2.5.2 Matériaux de transport d'électron (ETM)	26
2.2.6. Avantages et inconvénients de la pérovskite.....	27
2.3 Cellules solaires à base de pérovskite /Silicium.....	28
2.3.1 Architectures tandem Pérovskite/Silicium	28
2.4 Conclusion.....	30
Chapitre 03 : Simulations et résultats	31
3.1 Introduction	32
3.2 Présentation du logiciel COMSOL Multiphysics.....	32
3.3 Présentation de la cellule étudiée	33
3.4 Paramètres de la simulation.....	33
3.5 Etude de la cellule pérovskite à base de $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3(1-x)\text{Br}_3x$	35
3.5.1 Influence de la concentration du Brome.....	35
3.5.1.1 Caractéristiques courant-tension $J(V)$	35
3.5.1.2 Caractéristiques puissance tension $P(V)$	36
3.5.1.3 Densité de courant de court-circuit J_{cc}	36
3.5.2 Effet de l'épaisseur de la couche absorbante pérovskite W_2	37
3. 5.2.1 Caractéristiques courant tension $J(V)$	37

Sommaire

3. 5.2.2	Caractéristiques puissance tension P(V)	38
3.5.2.3	Densité de courant de court-circuit Jcc	39
3. 5.2.4	Tension de circuit ouvert Vco	40
3. 5.2.5	Puissance maximale Pmax	41
3. 5.2.6	Rendement.....	41
3.6	Etude de la cellule inférieure Si	42
3.6.1	Caractéristiques courant tension J(V).....	42
3.6.2	Caractéristiques puissance tension P(V)	43
3.6.3	Densité de courant de court-circuit Jcc	44
3.6.4	Tension de circuit ouvert Vco	45
3.6.5	Puissance maximale Pmax	45
3.6.6	Rendement η	46
3.7	Etude de la cellule Pérovskite /Si	47
3.7.1	Cellule PVK/Si cascade à 4 électrodes (4T)	47
3.7.2	Cellule PVK/Si série à 2 électrodes (2T)	49
3.8	Conclusion.....	51
	Conclusion générale	52
	Bibliographe :	

Liste des figures et tableaux

Liste des figures :

Chapitre 01

Figure 1. 1 : les Composants du rayonnement solaire.....	6
Figure 1. 2: le spectre solaire.....	7
Figure 1. 3: Principe de fonctionnement d'une cellule PV	9
Figure 1.4 : Caractéristique I(V) d'une cellule solaire sous obscurité et éclairage	10
Figure 1.5 : représentation conventionnelle des courbes $I=f(V)$ et $P=f(V)$ d'une cellules PV	11
Figure 1. 6: Semi-conducteurs de type n.....	13
Figure 1. 7: Semi-conducteurs de type P.....	14
Figure 1. 8: jonction PN	18

Chapitre 02

Figure 2.1 : Augmentation annuelle de l'efficacité des cellules solaires à pérovskite. [31].....	21
Figure.2.2 : La Structure cristalline ABX_3 des matériaux pérovskites et structure chimique des deux cations du site A les plus utilisés: méthylammonium et formamidinium.....	22
Figure 2.3 : Courbe d'absorption des matériaux	23
Figure 2.4: 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	25
Figure 2.5 : Matériaux HTM.....	26
Figure 2.6: Matériaux ETM.....	27
Figure 2.7 : Schémas de plusieurs architectures tandem pérovskite/silicium	29
Figure. 2.8 : Rendement théorique des cellules tandem Pérovskite/Si.[52]	30

Liste des figures et tableaux

Chapitre 03

Figure 3.1: Schéma de la structure de la cellule solaire $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3(1-x)\text{Br}_3\text{x}/\text{Si}$	33
Figure 3.2 : Caractéristiques courant tension pour différentes valeurs de x	35
Figure 3.3 : Caractéristiques puissance tension pour différentes valeurs de x ...	36
Figure 3.4: Représentation de la variation de la densité de courant J_{cc} en fonction de x de la cellule pérovskite	37
Figure 3.5: Caractéristiques J-V pour différentes épaisseurs de la couche pérovskite	38
Figure 3.6 : Caractéristiques puissance tension pour différentes épaisseurs de la couche pérovskite	39
Figure 3.7: Densité du courant de court-circuit J_{cc} en fonction de l'épaisseur de la couche pérovskite	40
Figure 3.8: Variation de la tension de circuit ouvert V_{co} en fonction de l'épaisseur de la couche pérovskite	40
Figure 3.9 : Variation de la puissance maximale en fonction de l'épaisseur de la couche PVK.....	41
Figure 3.10 : Le rendement pour différentes valeurs de x de la cellule pérovskite	42
Figure 3.11: Caractéristiques courant tension pour différentes épaisseurs de la couche Si de la cellule Inférieure	43
Figure 3.12: Caractéristiques puissance tension pour différentes épaisseurs de la couche Si	44
Figure 3.13 : Variation de la densité de courant J_{cc} en fonction de l'épaisseur de la couche Si	44
Figure 3.14: Variation de la tension de circuit ouvert V_{co} en fonction de l'épaisseur de la couche Si	45
Figure 3.15: Variation de la puissance maximale en fonction de l'épaisseur de la couche Si	46
Figure 3.16 : Variation du rendement de la cellule Si en fonction de W_4	46
Figure 3.17 : Variation du rendement de la cellule inférieure Si en fonction de l'épaisseur de la couche pérovskite W_2	47
Figure 3.18: Variation du rendement total de la structure cascade PVK/Si	48

Liste des figures et tableaux

Figure 3.19: Variation des courants de court-circuit des deux cellules en fonction de W_2	49
Figure 3.20: Caractéristiques courant-tension de la structure PVK/Si 2T optimisée	50
Figure 3.21: Caractéristiques puissance-tension de la structure PVK/Si 2T optimisée	50

Liste des Tableaux

Tableau 3.1: Paramètres utilisés pour la simulation de la cellule solaire pérovskite/Si.....	34
Tableau 3.2 : Caractéristiques de la cellule PVK/Si cascade (4T)	48
Tableau 3.3 : Caractéristiques de la cellule PVK/Si série (2T)	51

Liste des symboles

Liste des symboles

Eg : Energie du gap.

Eph : L'énergie d'un photon.

λ : Longueur d'onde.

h : Constante de Planck .

c : la vitesse de la lumière.

n , p: Les densités des porteurs.

q : charge de l'électron.

R : taux de recombinaison.

G : taux de génération.

Icc : courant de court-circuit.

Vco : tension de circuit ouvert.

Pmax : puissance maximale.

η : rendement.

E : champ électrique.

Jn : densité de courant des électrons.

Jp : densité de courant des trous μ .

Abréviations

PV : photovoltaïque.

PVK : pérovskite.

FF : facteur de forme.

PCE : Power Conversion Efficiency.

PSC : Perovskite Solar Cells.

HTM : Matériau de transport de trous.

ETM : Matériau de transport d'électron.

TiO₂ : Dioxyde de titane.

ITO : Oxyde d'indium-étain.

HOMO: Highest occupied molecular orbital.

Introduction Générale

Introduction générale

La demande d'énergie renouvelable augmente rapidement. Le photovoltaïque (PV) peut fournir de l'énergie propre à faible coût et devrait être la principale source d'énergie à l'avenir. Les cellules solaires au silicium sont la technologie photovoltaïque la plus courante, avec une part de marché de 90%. Ils offrent une efficacité d'environ 20 à 25%. Un moyen de surmonter ces valeurs est d'utiliser une structure en tandem qui augmente l'efficacité théorique de 30% à 42% [1] en ajoutant un semi-conducteur à large bande interdite au-dessus d'une cellule solaire Si. Les matériaux pérovskite aux halogénures organométalliques (PVK) sont des candidats idéaux pour le développement de tandems à couche mince à faible coût en raison de leurs propriétés optimales telles que l'absorbance élevée, le transport ambipolaire, la tolérance aux défauts, le traitement à basse température, l'accordabilité chimique et de bande [2,3]. Parmi les technologies tandem à couches minces, les tandems PVK/Si semblent être l'une des voies d'accès au marché les plus prometteuses selon la feuille de route technologique internationale pour le photovoltaïque et ont déjà dépassé l'efficacité de 31% [4]. Pour les rendre commercialement viables, des recherches approfondies sont menées dans le monde entier, non seulement pour démontrer une efficacité élevée, mais aussi pour faire face aux problèmes de mise à l'échelle sur de grandes surfaces [5,6] et de stabilité de la cellule de pérovskite.

Le travail présenté dans ce mémoire aborde l'étude des différentes caractéristiques d'une cellule solaire double jonction Pérovskite/Si. La structure se compose de deux cellules solaires, la cellule supérieure en $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3(1-x)}\text{Br}_{3x}$ avec une large bande interdite, et une cellule inférieure en Si avec une petite bande interdite.

La simulation de la cellule solaire sera faite par un logiciel de simulation numérique COMSOL multiphysiques. La présentation de cette étude a été répartie en trois chapitres :

- Le premier chapitre présente des généralités sur la conversion photovoltaïque, le principe de fonctionnement des cellules solaires ainsi que leurs caractéristiques.
- Le deuxième chapitre présente les cellules à base de matériaux pérovskite. Les propriétés électriques et optiques des matériaux pérovskite ainsi que les architectures des cellules tandem pérovskite/Si y sont décrites.
- Dans le troisième chapitre nous présenterons et discuterons les résultats de simulation

Enfin, nous terminerons par une conclusion générale.

Chapitre 01

Généralités sur les cellules

Photovoltaïques

1.1 Introduction

Dans ce chapitre on fait appel à quelques bases indispensables dans le domaine photovoltaïque. Nous aborderons ainsi en premier lieu quelques notions sur la source d'énergie photovoltaïque. Nous décrirons ensuite les semi-conducteurs, la jonction P-N et les cellules solaires avec leurs caractéristiques photovoltaïques et on terminera par les étapes du processus de conversion (l'absorption et la recombinaison) et les équations des semi-conducteurs.

1.2 Historique du photovoltaïque [7]

1839 : Le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.

1875 : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.

1954 : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter des satellites.

1958 : une cellule avec un rendement de 9% est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

1973 : la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'université de Delaware.

1983 : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 km en Australie.

1.3 L'énergie solaire

L'énergie solaire est une source d'énergie qui dépend du soleil. Cette énergie permet de produire de l'électricité à partir de panneaux photovoltaïques ou de centrales solaires thermiques grâce à la lumière du soleil captée par des panneaux solaires.

L'énergie solaire est la source d'énergie renouvelable la plus disponible et la plus importante.

1.4 Rayonnement solaire

Le soleil libère en permanence beaucoup d'énergie rayonnante dans le système solaire. La terre intercepte une infime fraction de l'énergie solaire émise dans l'espace.

La constante solaire égale à 1367 W/m^2 , c'est une moyenne obtenue pour chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre (pour une distance moyenne terre-soleil de 150 millionsde km).

Quand le soleil bouge dans le ciel, la lumière traverse une distance plus grande et perd plus d'énergie.

Comme le soleil est au zénith pendant une courte période, donc l'énergie utilisable est inférieure à 1000 W/m^2 [8].

Les scientifiques ont donné un nom au spectre standard de la lumière du soleil sur la surface de la terre : AM1.5G ou AM1.D.

L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement à :

- 9% dans la bande des ultraviolets ($<0,4\mu\text{m}$),
- 47% dans la bande visible ($0,4$ à $0,8\mu\text{m}$)
- 44% dans la bande des infrarouges ($>0,8\mu\text{m}$) [9].

Le rayonnement solaire est constitué de photons transportant chacun une énergie E_{ph} qui répond à la relation suivante :

$$E_{ph} = \frac{hc}{\lambda} \quad (1.1)$$

Chapitre 01 : généralités sur les cellules photovoltaïques

Où E_{ph} représente la quantité d'énergie, λ la longueur d'onde, h la constante de Planck et c la vitesse de la lumière.

Le rayonnement solaire qui arrive finalement au sol avec une intensité réduite (1000 W/m^2 au niveau de la mer) avec une bande spectrale répartie de la manière suivante : UV=5%, visible=40%, IR= 55% à cause des différentes atténuations atmosphériques et il se subdivise en trois composantes : diffuse, directe et réfléchi par le sol [10].

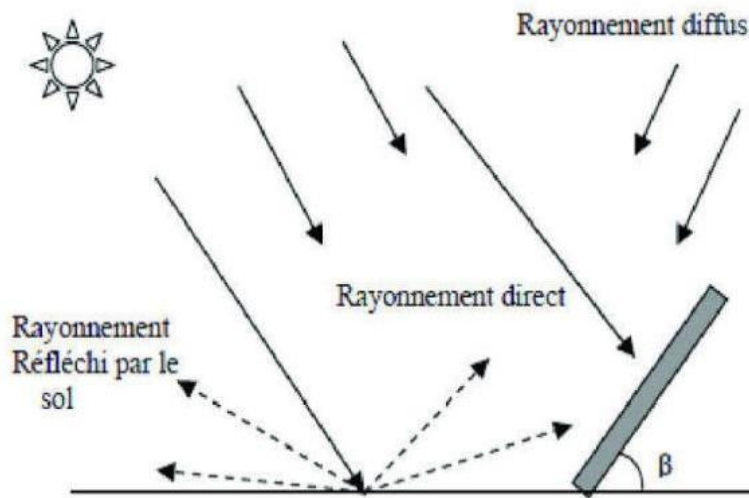


Figure 1.1 : les composantes du rayonnement solaire [11]

Le rayonnement solaire global est le rayonnement émis par le soleil incident sur une surface donnée. Le rayonnement direct est le rayonnement solaire incident sur un plan donné, et provenant d'un petit angle solide centré sur le disque solaire. Le rayonnement diffus est le rayonnement solaire global à l'exception du rayonnement direct. Il comprend la plus grande partie du rayonnement diffusé par l'atmosphère ainsi qu'une partie du rayonnement réfléchi par le sol, suivant l'inclinaison de la surface réceptrice [12,13].

1.5 Le spectre solaire

Le spectre solaire est la distribution spectrale (en fonction de la longueur d'onde ou de la fréquence) du rayonnement électromagnétique émis par le soleil, depuis les rayonnements radio jusqu'aux rayons X.

Le spectre solaire à la surface de la terre n'est plus le même que dans l'espace, car il est atténué par l'absorption des molécules présentes dans l'atmosphère (O_3 , CO_2 , H_2O , ...). La valeur réelle du spectre est déterminée par l'influence de la présence des molécules et les situations climatiques.

L'intégration de l'irradiance sur la totalité du spectre permet d'obtenir la puissance P (en $W \cdot m^{-2}$) fournie par le rayonnement. Pour simplifier, on utilise les notations suivantes :

- AM0 : Hors atmosphère (application spatiales). $P \approx 1.3 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$
- AM1 : Le soleil est au zénith du lieu d'observation (l'équateur).
- AM1.5 G : Spectre standard, le soleil est à 45° . $P \approx 1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$.

La figure 1.2 montre le spectre d'émission solaire

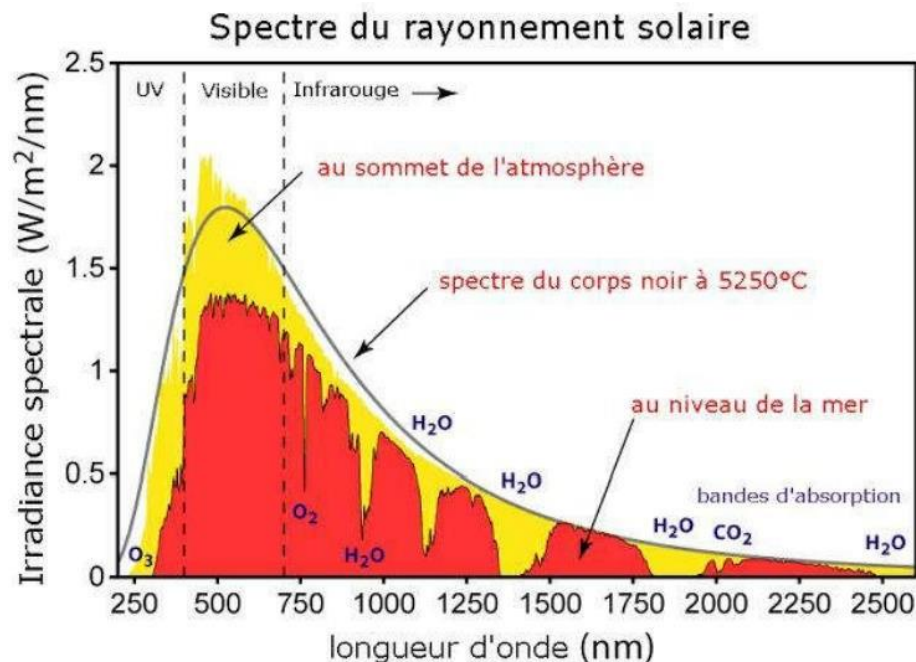


Figure 1.2 : Le spectre solaire

1.6 La cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique. Le principe de fonctionnement de cette cellule fait appel aux propriétés du rayonnement et celles des semi-conducteurs [14].

Une cellule photovoltaïque fonctionne selon le phénomène physique appelé « effet photovoltaïque » établissant une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut alors varier en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température et du vieillissement de la cellule [15].

1.7 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique. Le principe de fonctionnement de cette cellule fait appel aux propriétés du rayonnement et celles des semi-conducteurs.

Dans la cellule photovoltaïque, l'absorption des photons libère des électrons chargés négativement et des trous chargés positivement. Ceux-ci sont récoltés par une électrode, ce qui crée une différence de potentiel entre les deux bornes. La cellule photovoltaïque délivre une tension continue.

La conversion photovoltaïque met en jeu des physiques, intimement liées et simultanées :

- L'absorption de la lumière dans le matériau.
- Le transfert d'énergie des photons aux charges électriques
- La collecte des charges.

Un matériau doit donc avoir des propriétés optique et électrique spécifiques pour permettre la conversion photovoltaïque.

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès

Chapitre 01 : généralités sur les cellules photovoltaïques

d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p. la zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p, une jonction PN est formée. En ajoutant des contacts métalliques sur la zones n et p, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel : le courant électrique circule (voir figure 1.3) [16].

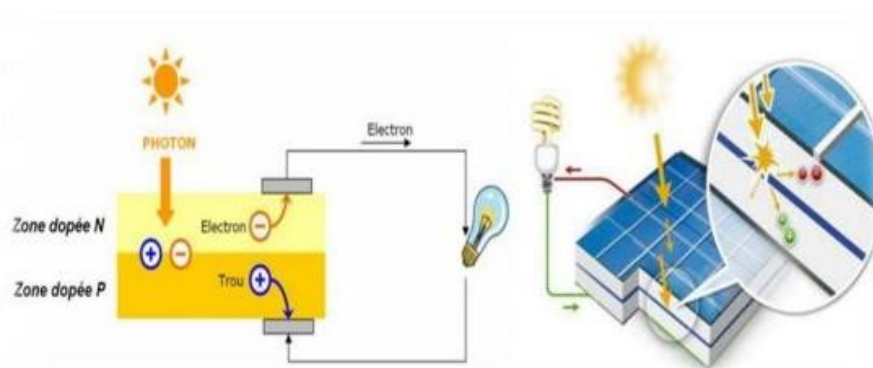


Figure 1.3 : Principe de fonctionnement d'une cellule PV [17]

1.8 Les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque

Les paramètres d'une cellule photovoltaïque sont déterminés à partir de la courbe caractéristique courant-tension (I-V) (figure 1.4) qui décrit le fonctionnement de la cellule.

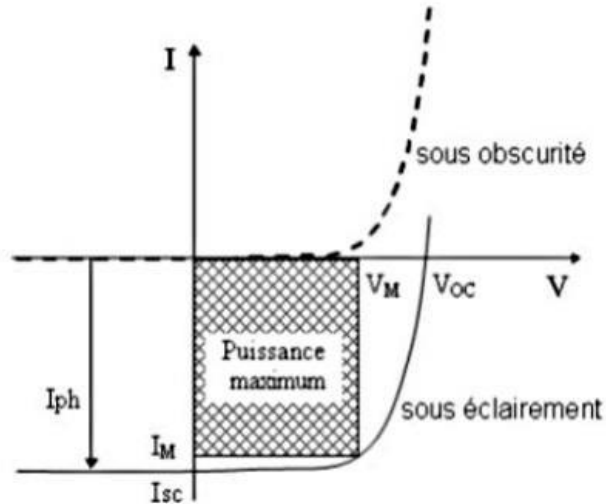


Figure 1.4 : Caractéristique I(V) d'une cellule solaire sous obscurité et éclairement [18]

1.8.1 Courant de court-circuit I_{cc}

Le courant de court-circuit I_{cc} correspond au courant produit à tension nulle $V=0$. Le courant est d'autant plus élevé que l'absorption de la cellule est grande et que les recombinaisons sont faibles.

1.8.2 Tension de circuit ouvert V_{co}

La tension de circuit-ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend du type de la cellule solaire, des matériaux de la couche active et de l'éclairage de la cellule.

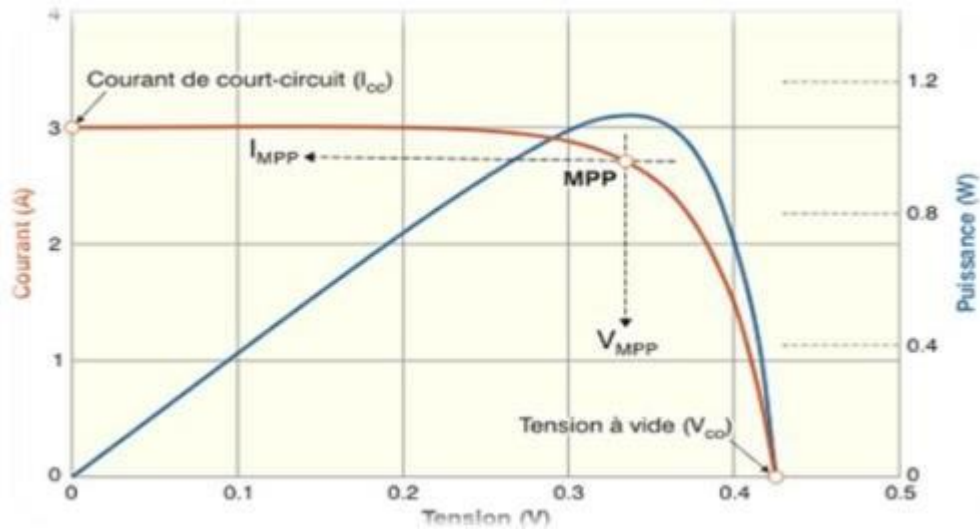


Figure 1.5 : représentation conventionnelle des courbes $I=f(V)$ et $P=f(V)$

1.8.3 Facteur de forme (FF)

Le facteur de forme (FF) de la courbe I-V exprime la différence entre la puissance réelle débitée par la cellule et sa puissance idéale. Il détermine la qualité électrique de la cellule, il est déterminé par l'équation suivante :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \cdot V_{co}} \quad (1.2)$$

1.8.4 La puissance maximale P_{max}

La puissance délivrée par une cellule solaire est maximum quand le produit $I \cdot V$ est maximum.

$$P_{max} = I_m \cdot V_m \quad (1.3)$$

1.8.5 Le rendement η

Il est défini comme le rapport entre la puissance maximale produite par la cellule et la puissance du rayonnement solaire qui arrive sur la cellule. Le rendement s'écrit :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} \quad (1.4)$$

P_{inc} : puissance incidente ;

Ou d'après $P_{max} = FF \times I_{cc} \times V_{co}$

$$\eta = FF \times I_{cc} \times \frac{V_{co}}{P_{inc}} \quad (1.5)$$

1.9 Les semi-conducteurs

Un semi-conducteur est un matériau qui a les caractéristiques d'un isolant, mais pour lequel la probabilité qu'un électron puisse contribuer à un courant électrique, quoique faible, est importante. En d'autres termes, la conductivité électrique d'un semi-conducteur est intermédiaire entre celle des métaux et celle des isolants.

Les semi-conducteurs sont largement utilisés en électronique pour réaliser des composants tels que des diodes, des transistors, des thyristors, des circuits intégrés ainsi que des lasers à semi-conducteur.

1.10 Les types de semi-conducteurs

1.10.1 Semi-conducteurs type n

Un matériau dopé n est un semi-conducteur dont la concentration en électrons est largement supérieure à la concentration en trous. Prenons par exemple le cas du silicium (Si) dans lequel on introduit de l'Arsenic (As) ; ce dernier possède 5 électrons sur la couche extérieure. Les quatre atomes voisins de silicium prêtent un électron chacun à l'atome de l'arsenic que lui-même met en commun quatre de ces cinq électrons périphériques, comme le montre la figure (1.6). On associe à l'arsenic un niveau donneur E_D dans la bande interdite très proche de la bande de conduction. La concentration d'électrons sera donc supérieure à la concentration de trous ce qui correspond à la définition d'un semi-conducteur dopé n.

La densité de porteurs libres « électrons » du semi-conducteur sera : [19]

$$n = p + N_d \quad (1.6)$$

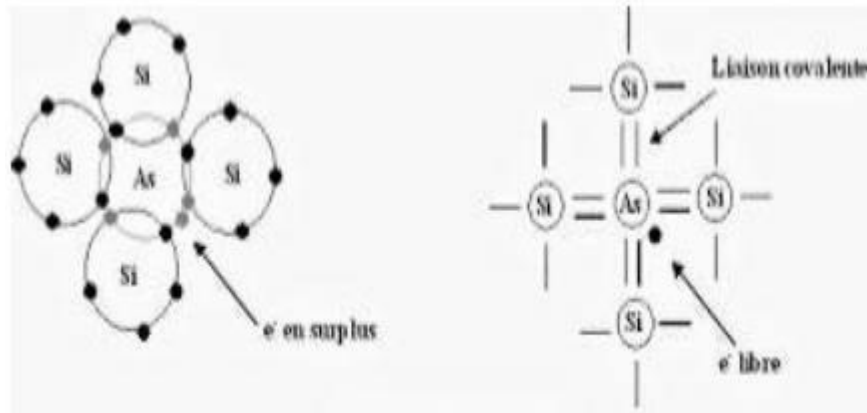


Figure 1.6 : semi-conducteurs de type n

1.10.2 Semi-conducteur type p

Il s'agit d'un semi-conducteur dont la concentration en trous est largement supérieure à la concentration en électrons. Donc cette fois les impuretés sont de type accepteur d'électrons ce qui correspond aux atomes de la colonne III, pour un cristal constitué d'atomes de la colonne IV. La figure (1.7) donne un aperçu de ce qui se passe pour un cristal de silicium dans lequel on introduit des atomes de Bore. Le Bore se retrouve ionisé négativement (charge fixe) et on assiste au déplacement d'un trou (libre) d'atome en atome. Donc on associe au Bore un niveau accepteur E_A dans la bande interdite très proche de la bande de valence. De la même façon que pour le semi-conducteur dopé n, la concentration en trous du semi-conducteur sera :

$$p = n + Na \quad (1.7)$$

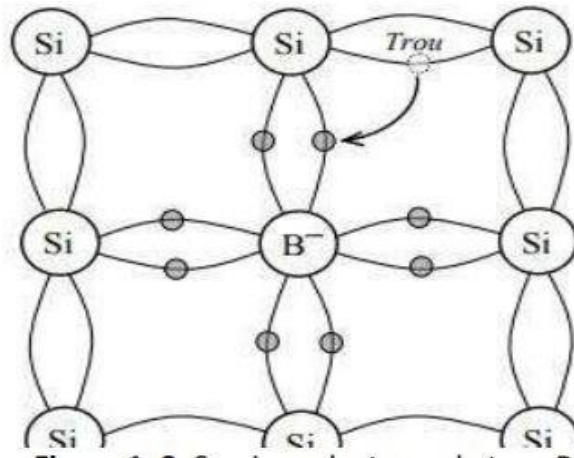


Figure 1.7 : semi-conducteurs de type P

1.11 L'absorption

L'absorption se réfère au processus par lequel l'énergie d'un photon est prise par une autre entité, par exemple, un atome qui fait une transition entre deux niveaux d'énergie électronique. Le photon disparaît lors de ce processus. Ainsi, l'une des propriétés d'un matériau photovoltaïque est son coefficient d'absorption (α). Ce coefficient est donc lié à l'énergie du gap et à l'énergie des photons incidents [20].

- **Le coefficient d'absorption**

L'énergie minimale nécessaire au photon incident pour provoquer la transition électronique dépend de la largeur de bande interdite du matériau, c'est la raison pour laquelle on détermine un coefficient d'absorption intrinsèque. Pour des photons d'énergie inférieure à E_g , le coefficient d'absorption est négligeable et la radiation lumineuse traverse le matériau avec une atténuation quasiment nulle.

A proximité du seuil d'absorption intrinsèque, le coefficient d'absorption est proportionnel à la différence ($h\nu - E_g$) :

$$\alpha = B.(h\nu - E_g)^a \quad (1.8)$$

L'indice a prend des valeurs différentes, selon que le matériau est à transition inter bande directe ($a=1/2$), ou indirecte ($a= 2$). Le facteur multiplicatif B dépend du matériau.

1.12 Taux de génération

Les photons d'énergie supérieure au gap du matériau entrant dans un semi-conducteur génèrent des paires électron-trous (on suppose implicitement la création d'une seule paire par photon). L'expression du taux de génération G dépend de la forme du faisceau et de la surface éclairée [21]. Le taux de génération s'écrit :

$$G = (1-R).e^{-\alpha x} \quad (1.9)$$

Avec :

R : coefficient de réflexion

x : distance de la surface

α : coefficient d'absorption

1.13 Recombinaisons

Par définition, la recombinaison est le retour de l'électron de l'état excité à l'état initial ou de la bande de conduction vers la bande de valence, car il ne peut rester dans un état excité que pour un temps faible ($t < 10^{-8}$ s). Ce retour de l'électron de l'état excité vers l'état stable peut avoir lieu selon plusieurs façons [22].

- **Recombinaison radiative**

La recombinaison radiative correspond à la recombinaison d'un électron de la bande de conduction avec un trou de la bande de valence, avec émission d'un photon d'énergie proche de celle du gap du matériau (processus inverse de la photo-génération).

Chapitre 01 : généralités sur les cellules photovoltaïques

Le mécanisme de recombinaison radiative est un processus dominant dans les semi-conducteurs à gap direct comme le GaAs. Pour le silicium à gap indirect, ce mécanisme est relativement rare du fait que cette transition ne peut avoir lieu qu'avec l'assistance d'un phonon [23].

- **Recombinaison en surface**

La surface d'un semi-conducteur est un lieu où les recombinaisons sont particulièrement nombreuses, en raison des liaisons non satisfaites des atomes de surface et d'autres défauts.

- **Recombinaison Auger**

Ce type de recombinaison est décrit comme un mécanisme à trois entités. En effet, l'excès d'énergie issu de la recombinaison d'un électron de la bande de valence peut être transféré à une troisième particule libre, électron ou trou. Ces charges sont considérées comme quasi-libres et n'interagissant pas entre elles [24].

- **Recombinaison RSH (Read-Shockley-Hall)**

Ce sont des recombinaisons indirectes assistées par des centres de pièges qui introduisent des niveaux l'énergie dans la bande interdite. Elles sont prépondérantes dans les semi-conducteurs à gap indirect [25].

- **Taux de recombinaison**

Lors d'une génération des paires électrons-trou, il faut aussi considérer le processus inverse ou recombinaison des paires électrons-trou, permettant de définir les taux de recombinaison R_n pour les électrons et R_p pour les trous par : [26]

$$R_{n,p} = \frac{\Delta n,p}{\tau_{n,p}} \quad (1.10)$$

- $\Delta n,p = n,p - n_e,p_e$: la densité des porteurs générés.
- n_e,p_e : la densité des porteurs à l'équilibre.
- $\tau_{n,p}$: la durée de vie de ces porteurs.

1.14 Les équations des semi-conducteurs

1.14.1 Équation de Poisson

L'équation de Poisson nous permet de calculer le champ électrique et le potentiel électrostatique dans les dispositifs à semi-conducteurs [22].

$$\mathbf{div. E} = \frac{\rho}{\varepsilon} \quad (1.11)$$

\mathbf{E} est le champ électrique, ρ la densité de charges électriques, ε la permittivité.

$$\mathbf{E} = -\mathbf{grad} \varphi \quad (1.12)$$

φ est le potentiel électrostatique.

$$\rho = q(p - n + Nd - Na) \quad (1.13)$$

Donc l'équation de Poisson devient :

$$\mathbf{div}(\varepsilon \mathbf{E}) = q(p - n + Nd - Na) \quad (1.14)$$

1.14.2 Les équation de continuité des électrons et des trous :

$$\mathbf{div.}(\mathbf{Jn}) = q(R - G) \quad (1.15)$$

avec : R taux de recombinaison, G taux de génération

- Les densités de courant des électrons et des trous sont données par [22] :

$$J_n = q\mu_n \frac{\partial EF_n}{\partial x} \quad (1.16)$$

$$J_p = q\mu_p \frac{\partial EF_p}{\partial x} \quad (1.17)$$

Avec :

- μ_n et μ_p : mobilités des électrons et des trous.
- n et p : concentration des électrons et des trous.
- E_{Fn} et E_{Fp} : quasi-niveaux de Fermi des électrons et des trous.

1.15 La jonction PN

Une jonction PN est l'accolement d'une région dopée P et d'une région dopée N. lors de cet assemblage les porteurs de charges libres s'attirent et se recombinent dans la zone de jonction où les porteurs libres disparaissent : c'est la zone de transition [27].

Les trous de la région P vont diffuser vers la région N laissant derrière eux des ions, qui constituent autant de charges négatives fixes. Il en est de même pour les électrons de la région N qui diffusent vers la région P laissant derrière eux des charges positives [28].

Le potentiel électrostatique varie dans la zone de la jonction PN et la différence de potentiel V_d , appelée tension de diffusion, atteint des valeurs non négligeables.

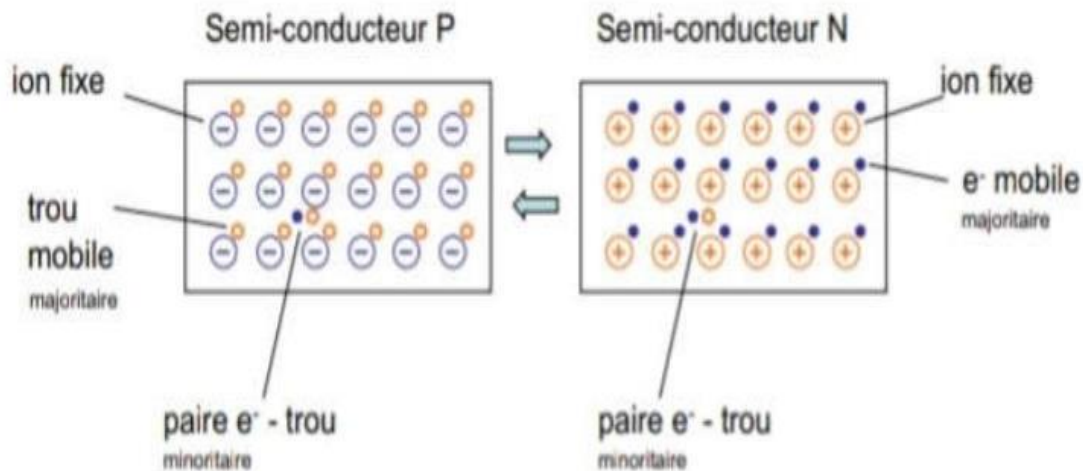


Figure 1.8 : Jonction PN

1.16 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vu des notions théoriques sur le photovoltaïque et ses applications sur les cellules solaires. Nous avons ensuite expliqué le fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales. Ce que nous avons vu, va donc nous aider à étudier notre cellule.

Chapitre 02 : les cellules solaires à base de Pérovskite/silicium

2.1 Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque est le candidat le plus important pour accélérer la transition du système énergétique non renouvelable existant vers un système plus efficace et respectueux de l'environnement. Actuellement, les cellules au silicium dominent le marché photovoltaïque en raison de leur rentabilité et de leur haute efficacité, approchant aujourd'hui la limite théorique. Une efficacité plus élevée peut être obtenue par des dispositifs tandem, où un semi-conducteur à large bande est empilé au-dessus de la cellule en silicium. La technologie de la pérovskite est apparue comme l'une des plus prometteuses pour le développement des tandems à base de silicium en raison des propriétés opto-électroniques optimales de la pérovskite et des progrès rapides réalisés au cours de la dernière décennie.

Ce chapitre donne un aperçu des matériaux pérovskite et différentes structures seront présentées. Leur principe de fonctionnement, leurs avantages et leurs inconvénients y seront expliqués.

De plus, les propriétés du matériau pérovskite, qui permettent une telle performance photovoltaïque, seront dévoilées.

Enfin, les cellules solaires en tandems pérovskite-silicium et leurs architectures seront présentées.

2.2 Les cellules solaires à base de pérovskite

2.2.1 Les pérovskites

Le terme « pérovskite » a été attribué à la structure cristalline du titanate de calcium (CaTiO_3), qui a été découvert par le minéralogiste allemand Gustav Rose en 1839 et nommé en l'honneur du minéralogiste russe « Lev Perovski ». Les pérovskites hybrides organiques-inorganiques à base d'halogénures sont largement étudiées dans les années 1990 pour l'application dans la technologie des transistors et des diodes électroluminescentes, en raison de leurs excellentes propriétés opto-électroniques et de la capacité de traitement en solution de ces matériaux [29].

Les pérovskites hybrides organiques-inorganiques à base d'halogénures sont un groupe de matériaux de formule générale ABX_3 , où A est un cation organique (CH_3NH_3^+ ou

Chapitre 02 : les cellules solaires à base de pérovskite/Silicium

$\text{NH}_2\text{CH}_3\text{NH}_2^+$), B est un cation divalent (Pb^{2+} ou Sn^{2+}) et X est un anion halogénure monovalent (I^- , Br^- ou Cl^-) [30].

Les cellules solaires à pérovskite (CSP) sont devenues l'une des technologies photovoltaïques les plus prometteuses de l'histoire. En moins de huit ans de développement, l'efficacité des CSP est passée de 3,8 % à une efficacité certifiée de 22,1 % [31]. Les cellules solaires en pérovskite sont bon marché et faciles à fabriquer, ce qui profitera à la fois à la science et à l'industrie [32].

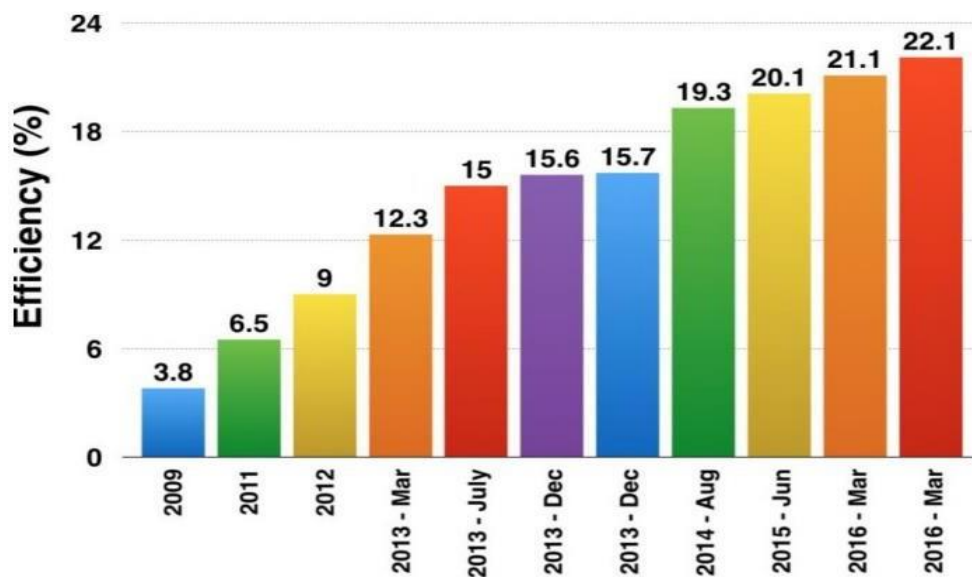


Figure 2.1: Augmentation annuelle de l'efficacité des cellules solaires à pérovskite. [31]

2.2.2 la structure cristalline de la pérovskite

Le terme « pérovskite » désigne à l'origine le minéral naturel CaTiO_3 (titanate de calcium). Aujourd'hui la pérovskite est devenue le nom générique des cristaux ABX_3 possédant la même structure mère. La formule ABX_3 fait référence à des structures tridimensionnelles (3D) de symétrie cubique (figure 2.2). Dans cette structure cristalline, le cation « A » occupe les huit sommets d'un cube entouré par douze anions « X », alors que le cation « B » se trouve au centre d'un octaèdre formé par six anions X situés aux centres des faces du cube [33]. Cette famille structurale est importante en termes de diversité, de composition et d'abondance. Les statistiques ont montré que plus de 50% du volume terrestre est composé de minéraux pérovskites.

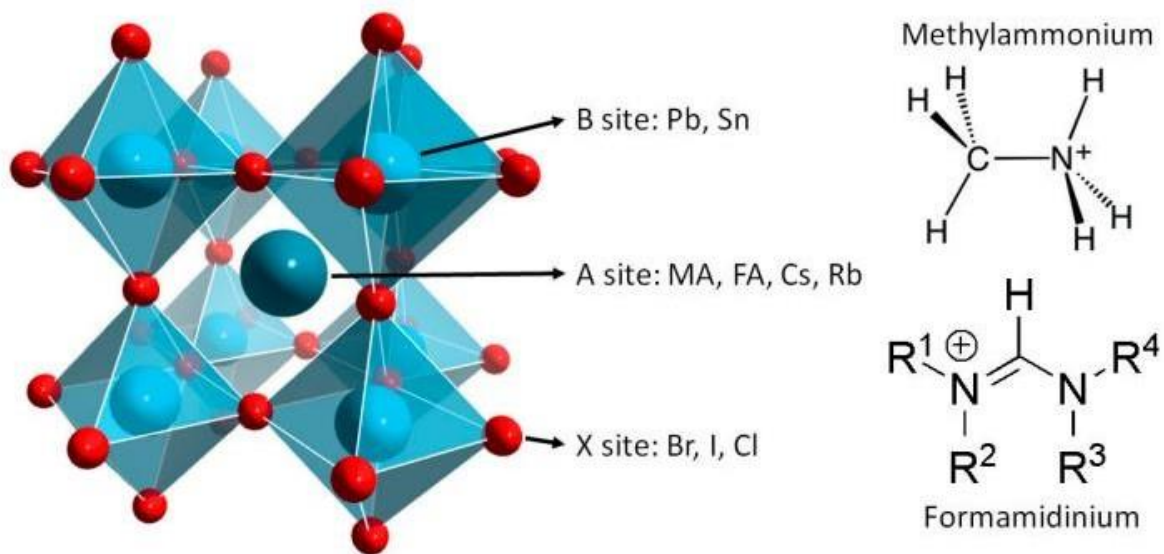


Figure 2.2 : La Structure cristalline ABX₃ des matériaux pérovskites et structure chimique des deux cations du site A les plus utilisés: méthylammonium et formamidinium. [34]

Les pérovskites sont divisées en deux groupes : les pérovskites sous forme d'oxydes qui sont inorganiques et les pérovskites halogénées qui peuvent être inorganiques ou inorganiques-organiques (hybrides) [35].

Dans le cas des oxydes, X représente un atome d'oxygène O, B est un cation métallique tétravalent tels que Ti^{4+} , Si^{4+} et Sn^{4+} ..., et A représente un cation divalent tels que Mg^{2+} , Ca^{2+} , Sr^{2+} , Ba^{2+} ...

Dans le cas des pérovskites halogénées, X est un atome d'halogène tel que Cl^- , Br^- ou I^- , B représente un métal ionique divalent tel que Pb^{2+} , Sn^{2+} ou Ge^{2+} [36]. L'élément A peut représenter un métal alcalin monovalent tels que Li^+ , Na^+ , K^+ , Rb^+ ou Cs^+ dans le cas d'une pérovskite halogénée inorganique. L'élément A peut-être aussi une petite molécule organique telles que le Methylammonium ($\text{CH}_3\text{NH}_3^+ = \text{MA}$) ou le Formamidinium ($\text{HC}(\text{NH}_2)_2^+ = \text{FA}$) (cas des matériaux hybrides) [37], [38].

2.2.3 Les propriétés optoélectroniques du matériau pérovskite hybride

L'intérêt porté aux oxydes de structure pérovskite ABX₃, depuis plus de quatre décennies, résulte dans la facilité de changer la nature des cations A et B présents dans la structure. De ce fait cette modification des éléments entraîne un changement des propriétés du matériau

Chapitre 02 : les cellules solaires à base de pérovskite/Silicium

laissant ainsi la porte ouverte à toutes sortes de propriétés physiques en fonction de la nature chimique et électronique des deux atomes A et B [39].

2.2.3.1 Propriétés optiques

La pérovskite est un matériau à bande interdite directe et par conséquent, elle a une force d'absorption optique élevée et une plage plus large pour absorber suffisamment d'énergie solaire pour atteindre une valeur élevée d'efficacité de conversion de puissance [40]. De la figure (2.3) on peut voir qu'à la longueur d'onde visible le coefficient d'absorption de la pérovskite est plus élevé, de sorte que la pérovskite peut absorber plus de photons. Cette grande absorption, comparée à celle du silicium cristallin permet de réduire l'épaisseur de la couche pérovskite à environ 500 nm pour une absorption quasi complète [41]. Les porteurs de charges photo générés sont alors plus facilement collectés du fait de la plus faible distance à parcourir.

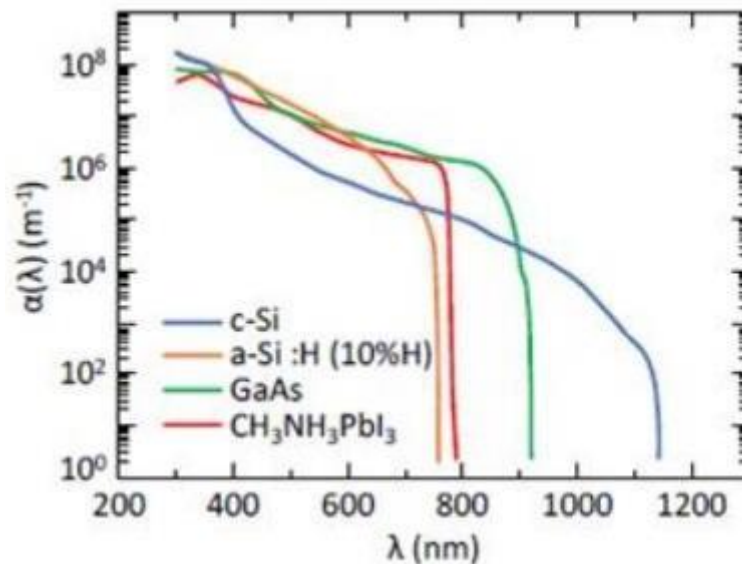


Figure 2.3 : Courbe d'absorption des matériaux.

2.2.3.2 Propriétés électriques

La pérovskite $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ possède des propriétés optiques et électriques intéressantes pour le photovoltaïque et qui ont activement été étudiées durant les vingt dernières années pour d'autres applications [42, 43, 44, 45]. Ses propriétés optoélectroniques font de ce matériau un excellent absorbeur. Contrairement aux oxydes métalliques, les propriétés de transport de charge de la pérovskite hybride halogénée sont rarement variées par dopage extrinsèque, mais leurs propriétés intrinsèques peuvent être facilement modulées en changeant la composition du matériau [46].

Les propriétés électroniques des pérovskites sont régies par la liaison B-X de la composante inorganique alors que la nature du cation A ne contribue pas directement à la modification de ces propriétés [45,47]. Cependant, des simulations ont démontré que la taille du cation pouvant altérer le degré de distorsion, elle peut affecter de manière indirecte les propriétés électroniques du matériau [42].

2.2.4 Le coefficient d'absorption

L'énergie minimale nécessaire au photon incident pour provoquer la transition électronique dépend de la largeur de bande interdite du matériau, c'est la raison pour laquelle on détermine un coefficient d'absorption intrinsèque. Pour des photons d'énergie inférieure à E_g , le coefficient d'absorption est négligeable et la radiation traverse le matériau avec une atténuation quasiment nulle.

A proximité du seuil d'absorption intrinsèque, le coefficient d'absorption est proportionnel à la différence $(h\nu - E_g)$:

$$\alpha = A\sqrt{h\nu - E_g} \quad (2.1)$$

Le facteur multiplicatif A dépend du matériau : $A=2,5 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-1}\text{eV}^{-1/2}$ [48]

2.2.5 La structure photovoltaïque d'une cellule à base de pérovskite

Une cellule solaire à pérovskite est constituée d'un substrat verre sur lequel est déposé l'oxyde d'étain dopé au fluor FTO, et sur FTO est déposé le dioxyde de titane TiO_2 . Le TiO_2 sert à améliorer le transport d'électrons. La couche active est constituée d'un matériau

Chapitre 02 : les cellules solaires à base de pérovskite/Silicium

pérovskite. Pour améliorer le transport de trous, une couche HTM est déposée entre l'électrode en Or et la couche active.

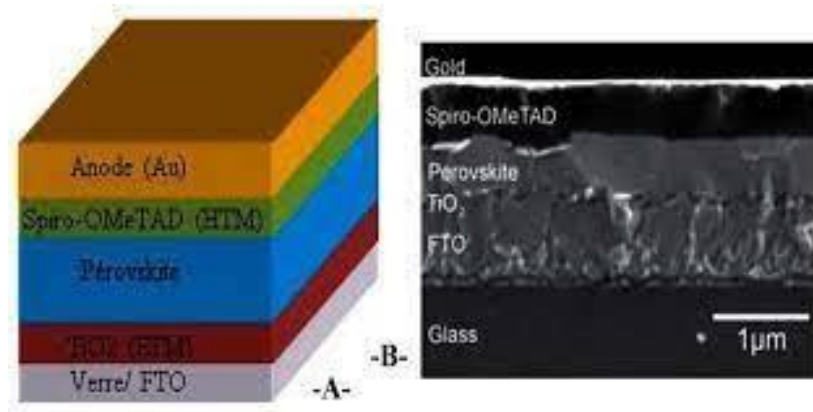


Figure 2.4: Structure d'une cellule photovoltaïque à pérovskites (A) structure et (B) Image MEB montrant l'architecture d'une cellule solaire à hétérojonction planaire à base de matériaux pérovskites [49]

- **Electrode 1 :** nous avons choisi l'ITO (oxyde d'indium-étain) pour l'électrode 1. Ce choix est basé sur ses nombreuses qualités telles que sa transmittance élevée $> 80 \%$, sa meilleure transparence optique et aussi de sa résistivité faible $15 \Omega/\text{cm}^2$. Ces avantages font de l'ITO un bon choix comme anode dans les cellules pérovskites.
- **Couche de transport des trous :** pour le matériau donneur (transporteur de trous p) nous avons choisi Le Spiro-OMeTAD. Le matériau de transport de trous (HTM) est une étape importante dans l'histoire de cellules solaires à pérovskite. Le bon choix des HTM est un facteur clé pour une extraction de charges et une bonne stabilité dans les cellules solaires. Spiro-OMeTAD est prouvée être l'HTM le plus approprié en raison de sa mise en œuvre facile et sa haute performance.
- **Couche active :** la pérovskite représente la couche active dans cette configuration inverse multicouche. Nous avons utilisé la pérovskite $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3(1-x)}\text{Br}_{3x}$ qui diffère de la pérovskite $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ par le dopage de Brome. La substitution de l'iode par le Brome permet d'augmenter la bande interdite de la pérovskite.
- **Couche de transport des électrons :** pour le matériau accepteur (transporteur des électrons) nous avons choisi l'oxyde de titane TiO_2 qui est un matériau du transport des électrons (Electron Transport Layer ETL) de la couche active vers l'électrode métallique.

Chapitre 02 : les cellules solaires à base de pérovskite/Silicium

2.2.5.1 Matériaux de transport de trous (HTM)

Les matériaux de transport de trous idéaux pour les PSC doivent répondre à certaines exigences, telles qu'une bonne mobilité des trous, un niveau d'énergie HOMO compatible, de bonnes propriétés de solubilité et de formation de films, une excellente stabilité thermique et photochimique et des performances de coût élevées.

Les HTM organiques peuvent être divisés en trois types : HTM moléculaires, HTM polymères et complexes organométalliques, tandis que les HTM inorganiques sont principalement des oxydes métalliques de transition, des halogènes.

Le matériau le plus couramment utilisé est le spiro - OMeTAD, qui détient le PCE record (21,6%) des PSC rapportés. [50]

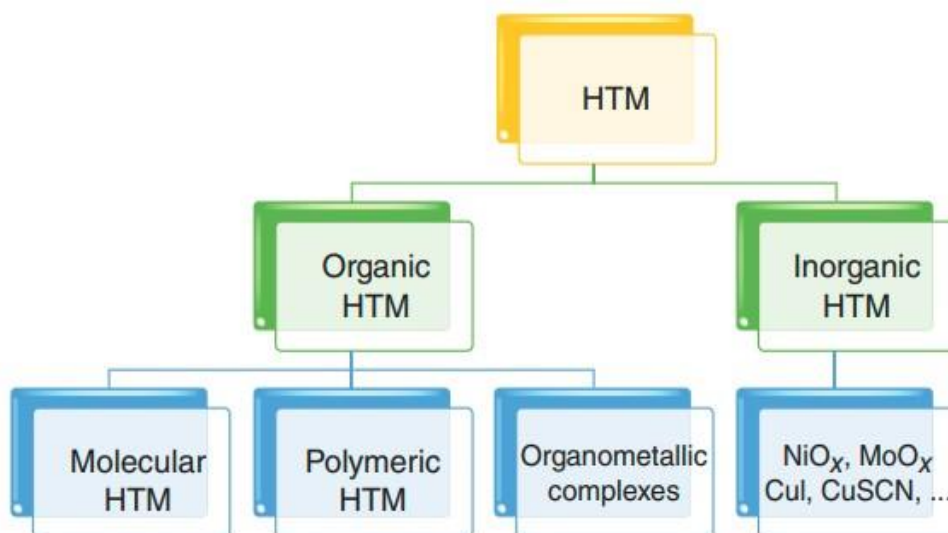


Figure 2.5 : Matériaux HTM

2.2.5.2 Matériaux de transport d'électron (ETM)

Le matériau de contact électronique sélectif (ETM) dans les PSC est responsable de l'extraction sélective d'électrons et de bloquer les trous de la recombinaison avec les électrons injectés. Il peut être divisé en ETM inorganiques, organiques et composites.

Le matériau de contact électron sélectif le plus couramment utilisé est le TiO_2 . [50]

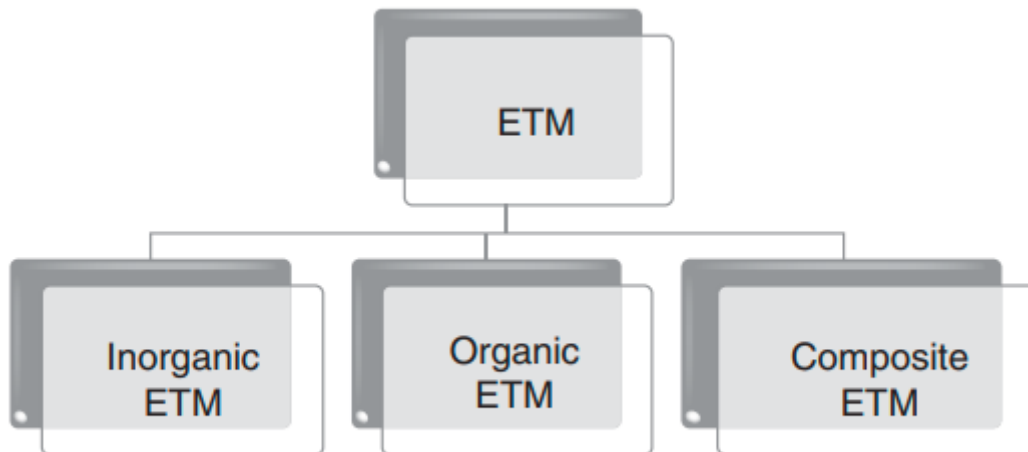


Figure 2.6: Matériaux ETM

2.2.6. Les avantages et les inconvénients de la pérovskite

Avantages

- Relativement facile à fabriquer et à déposer sur une surface à l'aide de procédés peu coûteux
- Potentiel d'efficacité de conversion de puissance élevée
- Bande interdite réglable, ce qui signifie qu'il peut être fabriqué pour être idéal pour la production d'énergie solaire
- La production nécessite 20 fois moins de matériaux que les cellules en silicium et n'utilise pas de métaux de terres rares
- Le processus de fabrication est beaucoup moins énergivore que celui des cellules solaires traditionnelles

Inconvénients

- Les pérovskites se décomposent avec le temps lorsqu'elles sont exposées à l'humidité, la lumière, la chaleur et l'oxygène, ce qui signifie qu'il faut ajouter des technologies supplémentaires pour stabiliser les cellules pour une utilisation généralisée.

Chapitre 02 : les cellules solaires à base de pérovskite/Silicium

- Les meilleures pérovskites pour générer de l'énergie contiennent du plomb, qui est une neurotoxine, et l'industrie cherche des moyens de réduire la toxicité potentielle de la pérovskite.
- Les cellules pérovskites ne sont pas encore prêtes pour une production commerciale.

2.3 Les cellules solaires à base de pérovskite /Silicium

Les cellules solaires à halogénure de plomb organique-inorganique présentent plusieurs avantages qui les rendent très intéressantes pour leur utilisation comme cellule supérieure dans les cellules solaires tandem à base de silicium. La performance des cellules pérovskites a été rapidement augmentée à >22%, avec un nombre croissant de groupes de recherche. Leurs propriétés optoélectroniques exceptionnelles sont également bien adaptées aux applications en tandem, notamment un coefficient d'absorption élevé, une faible absorption sous-bande interdite et un bord d'absorption abrupt. De plus, les cellules solaires en pérovskite offrent une accordabilité de bande interdite sur une large gamme spectrale, une tension de circuit-ouvert élevée avec une faible perte potentielle, une tolérance élevée aux défauts, et de longues longueurs de diffusion de porteurs de charge. Il est important de noter que les cellules solaires en pérovskite combinent des rendements élevés et d'excellentes propriétés optoélectroniques avec le potentiel de traitement à faible coût et la disponibilité abondante des éléments constitutifs. [51]

2.3.1 Architectures tandem Pérovskite/Silicium

Les cellules solaires tandem peuvent être fabriquées en plusieurs configurations, chacune avec ses propres avantages et inconvénients. L'architecture de dispositif tandem la plus simple est la 4T empilée mécaniquement (Figure 2.9 a), qui nécessite quatre électrodes avec une transparence élevée. Pendant le fonctionnement, les deux sous-cellules peuvent être maintenues à leur point de puissance maximum, ce qui réduit l'absorption parasite et les coûts de fabrication. Cependant, l'utilisation de 4 terminaux implique le doublement de toute l'électronique de puissance, ce qui est coûteux.

Les cellules tandem à 2 terminaux se composent d'une cellule supérieure de pérovskite déposée sur une cellule de fond de silicium, les deux sous-cellules sont reliées en série par une

Chapitre 02 : les cellules solaires à base de pérovskite/Silicium

couche de recombinaison ou une jonction tunnel. Elles ont un potentiel d'efficacité pratique élevé en raison d'une utilisation de matériaux réduite et de moins d'étapes de dépôt. Cependant, ils ont certaines contraintes, comme avoir une tension égale à la somme des tensions des deux sous-cellules et être sensibles aux variations spectrales. Les cellules tandem pérovskite/silicium ont une limite d'efficacité de 43%, avec des valeurs qui chutent brusquement pour des bandes de cellules supérieures non idéales. Les cellules solaires de pérovskite sont des partenaires appropriés pour le silicium cristallin et les technologies de couches minces émergentes, et leurs performances ont rapidement été élevées à >20%. [51]

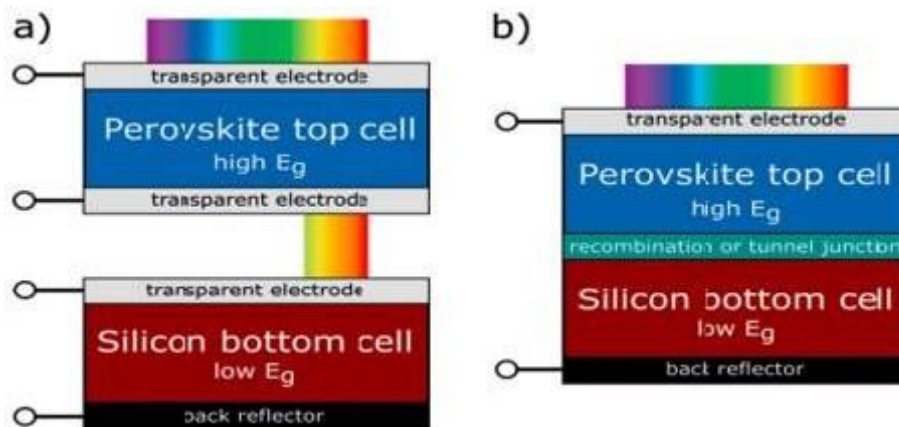


Figure 2.7 : – Schémas de plusieurs architectures tandem pérovskite/silicium

a) 4 terminaux : empilées mécaniquement,

b) 2 terminaux : monolithiquement intégrées [51]

Chapitre 02 : les cellules solaires à base de pérovskite/Silicium

Pour toutes ces configurations, la cellule supérieure en pérovskite a une bande interdite plus élevée (E_g) que la cellule inférieure en silicium cristallin avec $E_g = 1,1$ eV.

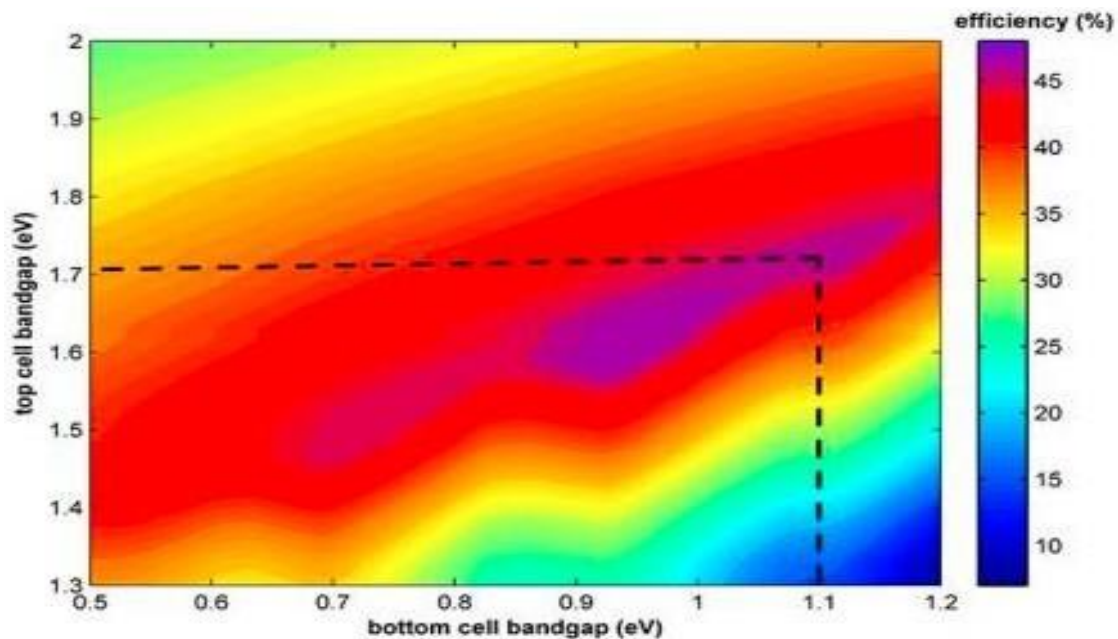


Figure 2.8 : Rendement théorique des cellules tandem Pérovskite/Si.[52]

2.4 Conclusion

Les matériaux pérovskites sont en mesure de perturber le paysage photovoltaïque actuel. Ils seront importants pour la recherche et la commercialisation des cellules solaires au cours des prochaines années. Cependant, quelques problèmes doivent être minimisés en ce qui concerne la commercialisation : (1) la rentabilité, (2) la stabilité dans l'humidité et (3) la toxicité des atomes de plomb. Alternativement, les matériaux absorbeurs de pérovskite peuvent être couplés à des cellules solaires sensibilisées aux colorants ou aux cellules solaires au silicium pour former des rendements plus élevés. Il est également possible de travailler sur différentes méthodes de dépôt combiné pour réaliser des rendements de conversion de puissance plus élevés.

Chapitre 03 : Simulations et résultats

Chapitre 03 : Simulations et résultats

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons étudier les deux sous cellule pérovskite et silicium, en utilisant les paramètres les plus importants qui permettent un meilleur fonctionnement de la cellule. La simulation permet d'optimiser certains paramètres physiques comme le courant de court-circuit J_{cc} , la tension de circuit ouvert V_{co} , la puissance maximale P_{max} ainsi que le rendement η en fonction des épaisseurs pour les deux cellules séparément, ensuite, nous avons déduit les caractéristiques de la cellule photovoltaïque à double jonction optimisée. L'objectif de cette étude est d'obtenir un meilleur rendement.

3.2 Présentation du logiciel COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics est un outil puissant pour la modélisation et l'analyse des cellules photovoltaïques. Le logiciel permet de modéliser et de simuler les performances des cellules photovoltaïques en fonction des caractéristiques de conception telles que la géométrie, les propriétés optiques et électriques des matériaux, les conditions environnementales, etc.

En utilisant COMSOL Multiphysics, les ingénieurs et les scientifiques peuvent explorer différentes configurations de cellules photovoltaïques et optimiser leur rendement énergétique.

En outre, COMSOL Multiphysics peut être utilisé pour modéliser et simuler des systèmes complets de panneaux solaires, y compris les connexions électriques et les dispositifs de stockage d'énergie associés. Cette approche de simulation permet de tester et d'optimiser la performance de ces systèmes dans des conditions réelles, en prenant en compte les perturbations environnementales telles que la variation de l'éclairement solaire, la température, le vent, etc.

Les principales étapes pour faire la simulation avec ce logiciel sont :

- Mettre en place l'environnement modèle ;
- Construire la géométrie ;
- Spécifier les propriétés des matériaux ;
- Définir les conditions limites de la physique ;
- Créer le maillage ;
- Exécuter la simulation ;
- Post-traiter les résultats.

3.3 Présentation de la cellule étudiée

Notre travail consiste à simuler une cellule solaire double jonction à base de $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3(1-x)}\text{Br}_{3x}$ /Silicium. La cellule supérieure en Pérovskite avec une large bande interdite ($E_g > 1.55\text{eV}$) dont l'épaisseur sera réglable, la cellule inférieure en Si avec une petite bande interdite ($E_g=1,12\text{eV}$) dont l'épaisseur sera fixée. Nous allons optimiser ces paramètres électriques et géométriques afin de concevoir une cellule ayant un rendement électrique optimal.

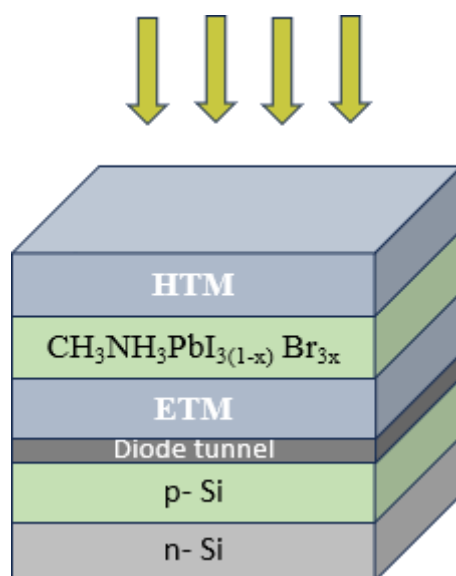


Figure 3.1: Schéma de la structure de la cellule solaire $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3(1-x)}\text{Br}_{3x}/\text{Si}$

3.4 Paramètres de la simulation

Les paramètres des différentes couches utilisées dans la simulation de la cellule pérovskite/Si sont regroupés dans le tableau (3.1).

Chapitre 03 : Simulations et résultats

Paramètres	HTM	Pérovskite	TiO ₂	Si
W (μm)	0.4	0.85 (variable)	0.3	100
x	–	0 (variable)	–	–
E _g (ev)	3	1.55 + 0.75 * x	3.2	1.12
χ (ev)	2.45	3.9 - 0.55 * x	3.9	4.45
tau (s)	1 e-7	1e-6	1e -7	1e-5
N _A (m ⁻³)	2 e ²⁴	–	–	–
N _D (m ⁻³)	–	1e ¹⁹	1e ²²	–
N _C (m ⁻³)	2.2 e ²⁴	2.2 e ²⁴	2.2 e ²⁴	2.2 e ²⁴
N _V (m ⁻³)	1.8 e ²⁵	1.8 e ²⁵	1.8 e ²⁵	1.8 e ²⁵
μ _n (m ² /Vs)	2 e ⁻⁸	2 e ⁻⁴	2 e ⁻³	100
μ _p (m ² /Vs)	2 e ⁻⁸	2 e ⁻⁴	1e ⁻³	25
ε	3	6.5	9	10

Tableau 3.1 Paramètres utilisés pour la simulation de la cellule solaire pérovskite/Si

Signification des symboles :

W : Epaisseur de la couche

x : Concentration de Brome

E_g : Energie de gap

χ : Affinité électronique

tau : Durée de vie des électrons et des trous

N_A : Concentration de dopage accepteur

N_D : Concentration de dopage donneur

N_C: Densité effective d'états dans la bande de conduction

N_V : Densité effective d'états dans la bande de valence

μ_n/μ_p : Mobilité des électrons et des trous

ε : Permittivité relative

3.5 Etude de la cellule pérovskite à base de $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3(1-x)}\text{Br}_{3x}$

3.5.1 Influence de la concentration du Brome

3.5.1.1 Caractéristiques courant-tension J(V)

La figure 3.2 représente les caractéristiques courant-tension pour différentes valeurs de la concentration x de Br. On observe que le courant de court-circuit diminue et la tension de circuit ouvert augmente avec l'augmentation de x . Ceci est dû à l'augmentation du gap de la couche pérovskite lorsque x augmente.

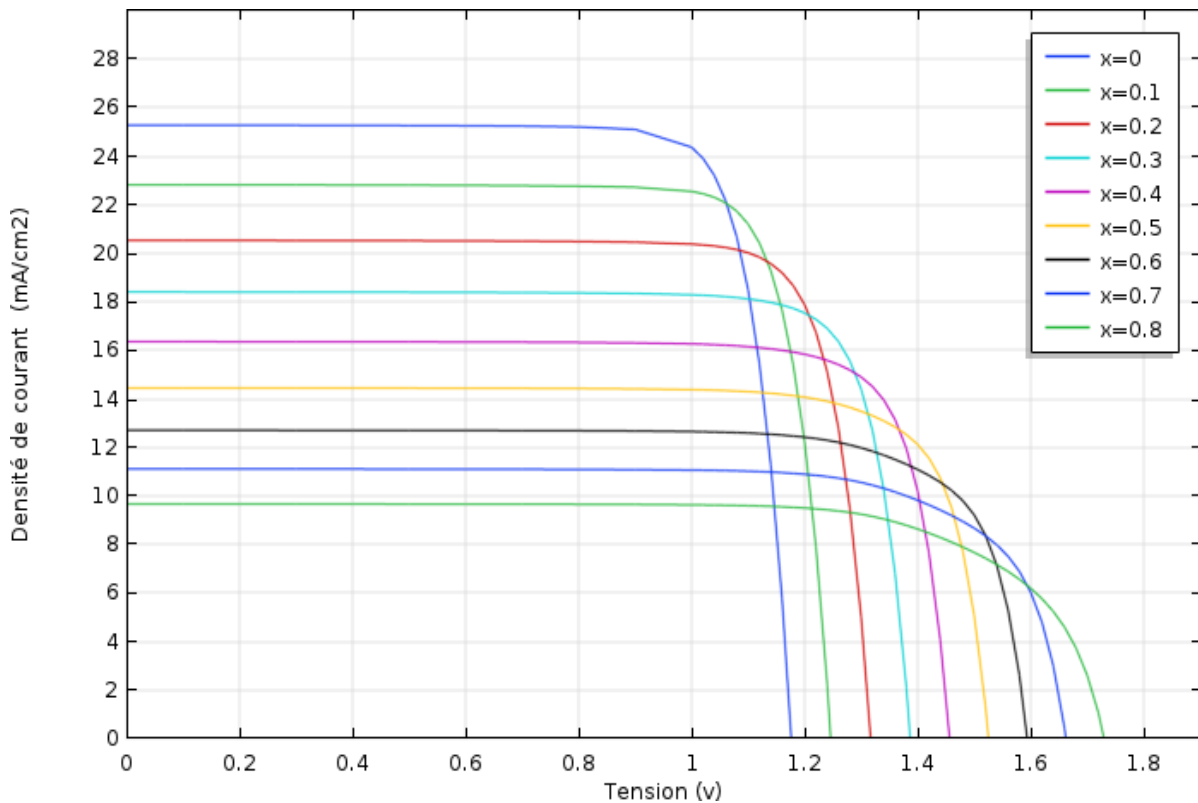


Figure 3.2 : Caractéristiques courant tension pour différentes valeurs de x .

3.5.1.2 Caractéristiques puissance tension P(V)

La figure 3.3 représente les caractéristiques puissance-tension pour différentes valeurs de la concentration de Brome x . On constate que la puissance maximale diminue lorsque x augmente et atteint sa valeur maximale pour $x=0$, c.à.d. pour $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$.

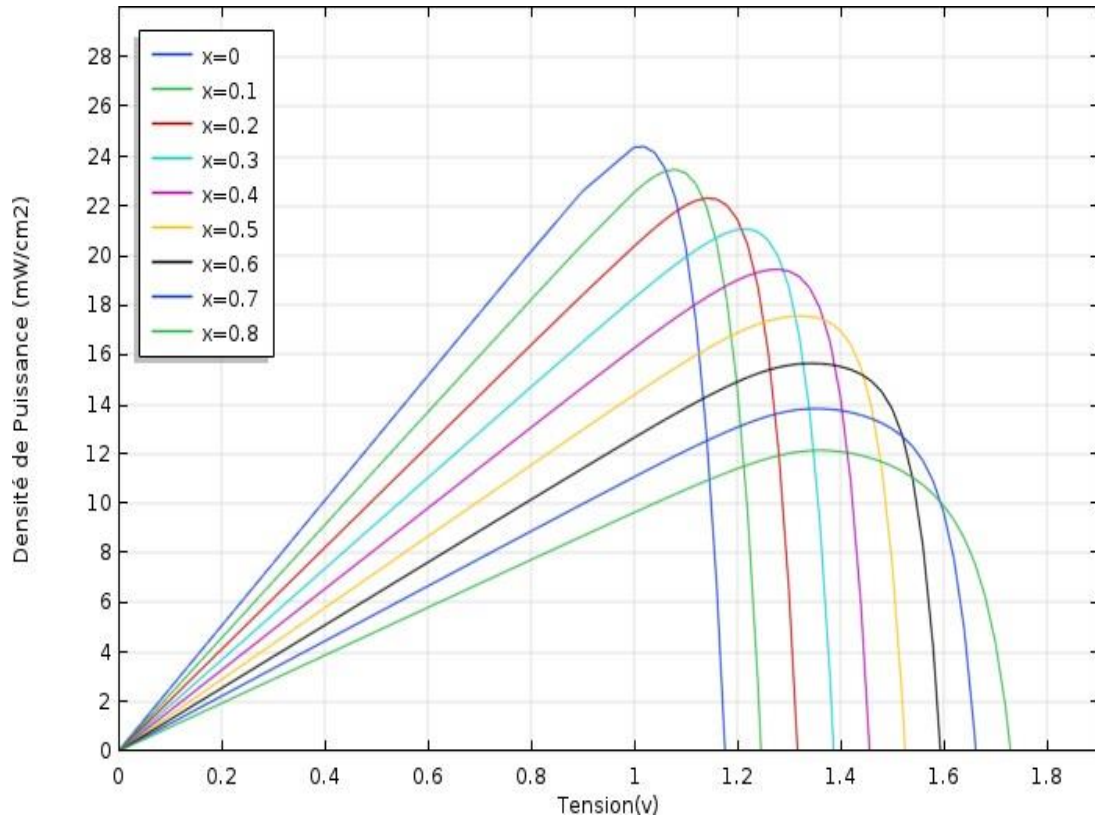


Figure 3.3 : Caractéristiques puissance tension pour différentes valeurs de x .

3.5.1.3 Densité de courant de court-circuit J_{cc}

La figure 3.4 présente l'effet de x sur la densité du courant de court-circuit J_{cc} . On constate que le courant de court-circuit diminue lorsque x augmente et ceci à cause de l'augmentation du gap.

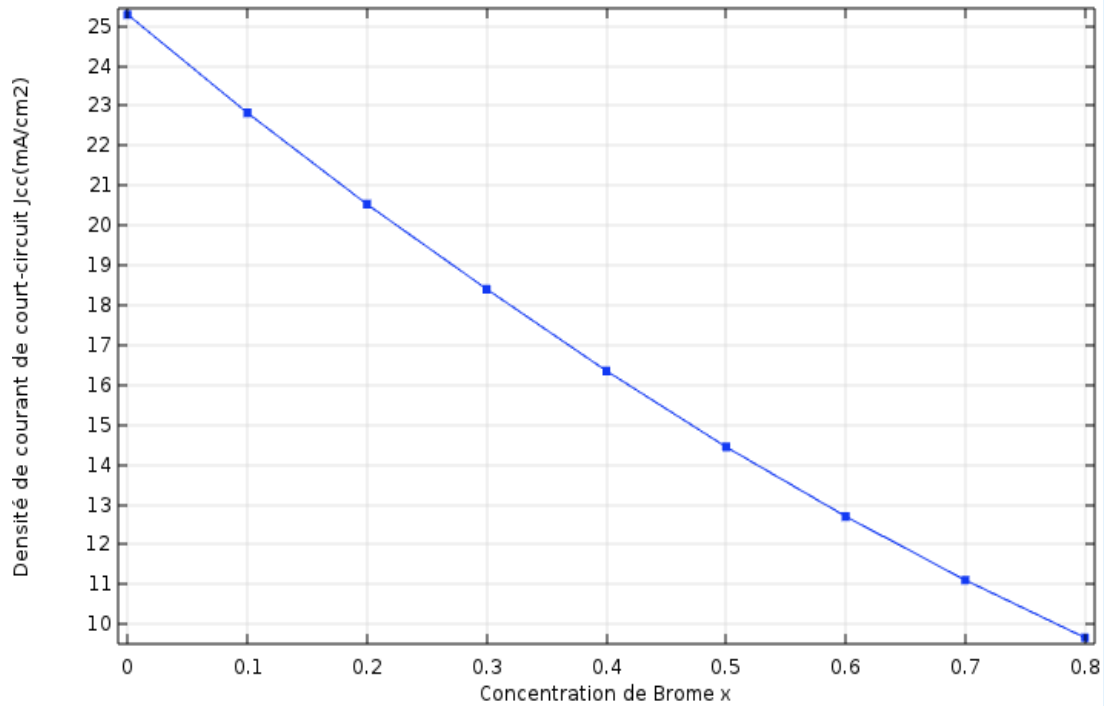


Figure 3.4: Représentation de la variation de la densité de courant J_{CC} en fonction de x de la cellule pérovskite

3.5.2 Effet de l'épaisseur de la couche absorbante pérovskite W_2

3. 5.2.1 Caractéristiques courant tension J(V)

La figure 3.5 montre l'effet de l'épaisseur de la couche pérovskite sur la densité de courant. Nous pouvons constater que la variation de l'épaisseur de la couche pérovskite agit sur la densité de courant. La densité de courant croît avec l'augmentation de l'épaisseur ensuite elle se stabilise pour une épaisseur $W_2=1\mu\text{m}$.

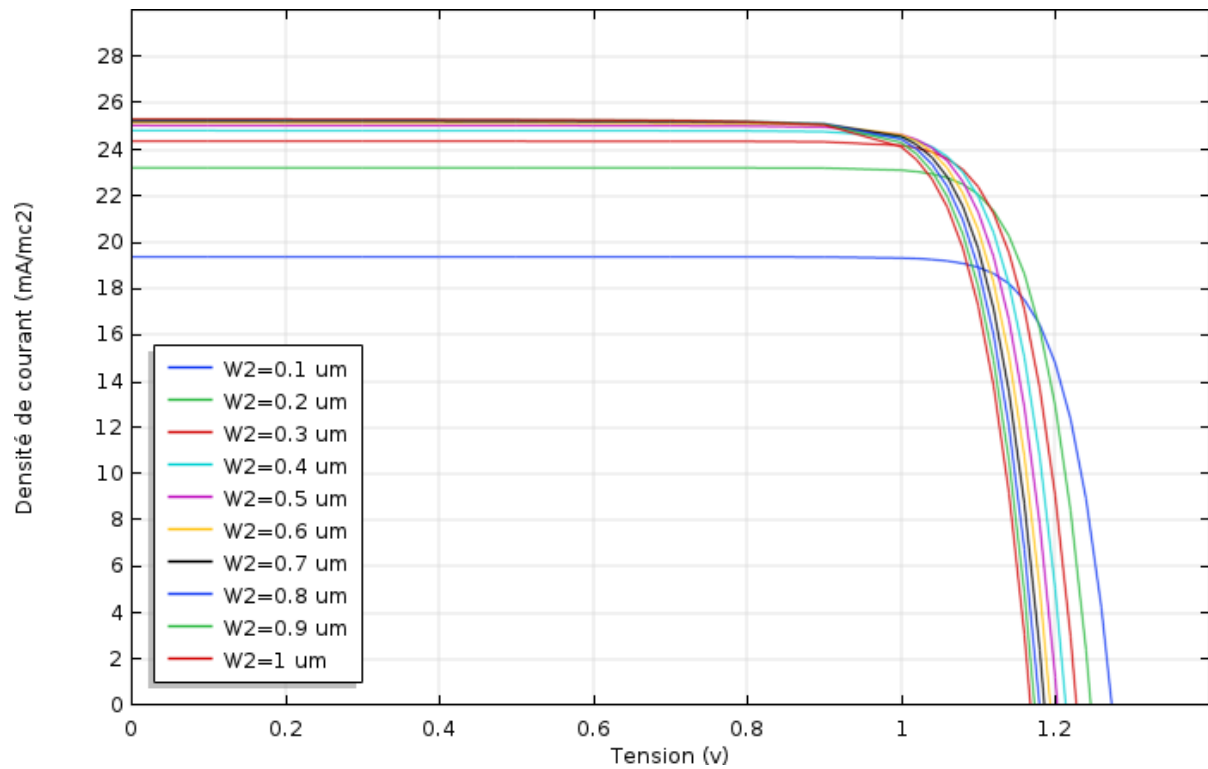


Figure 3.5: Caractéristiques J-V pour différentes épaisseurs de la couche pérovskite.

3. 5.2.2 Caractéristiques puissance tension P(V)

La figure 3.6 présente les caractéristiques P(V) pour différentes épaisseurs de la couche absorbante pérovskite dans la cellule supérieure. On remarque que la puissance maximale augmente avec l'augmentation de l'épaisseur, atteint un maximum ensuite diminue. Quant à la tension de circuit ouvert elle varie faiblement.

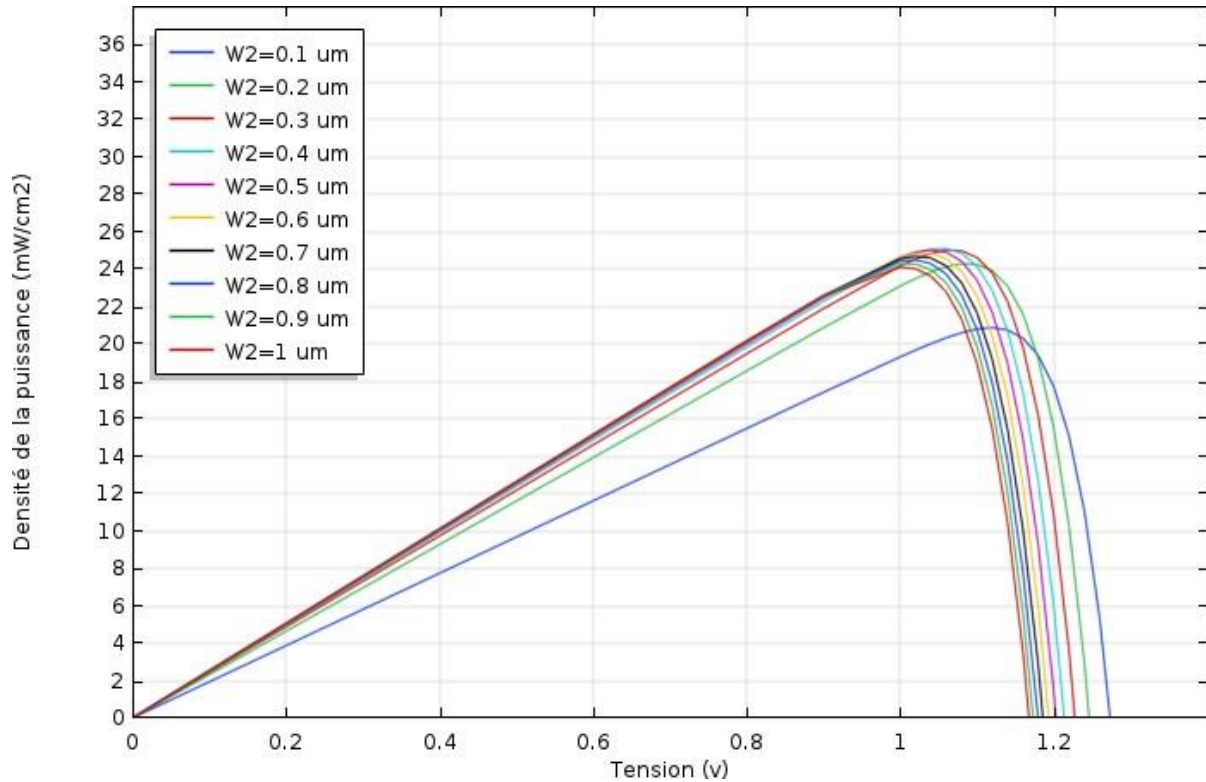


Figure 3.6 : Caractéristiques puissance tension pour différentes épaisseurs de la couche pérovskite.

3.5.2.3 Densité de courant de court-circuit J_{cc}

La variation de la densité de courant de court-circuit J_{cc} en fonction de l'épaisseur de la couche Pérovskite dans la cellule supérieure est illustrée sur la figure 3.7. On remarque que le courant de court-circuit J_{cc} augmente très rapidement entre 0 et $0,4\mu\text{m}$, ensuite il tend à se stabiliser.

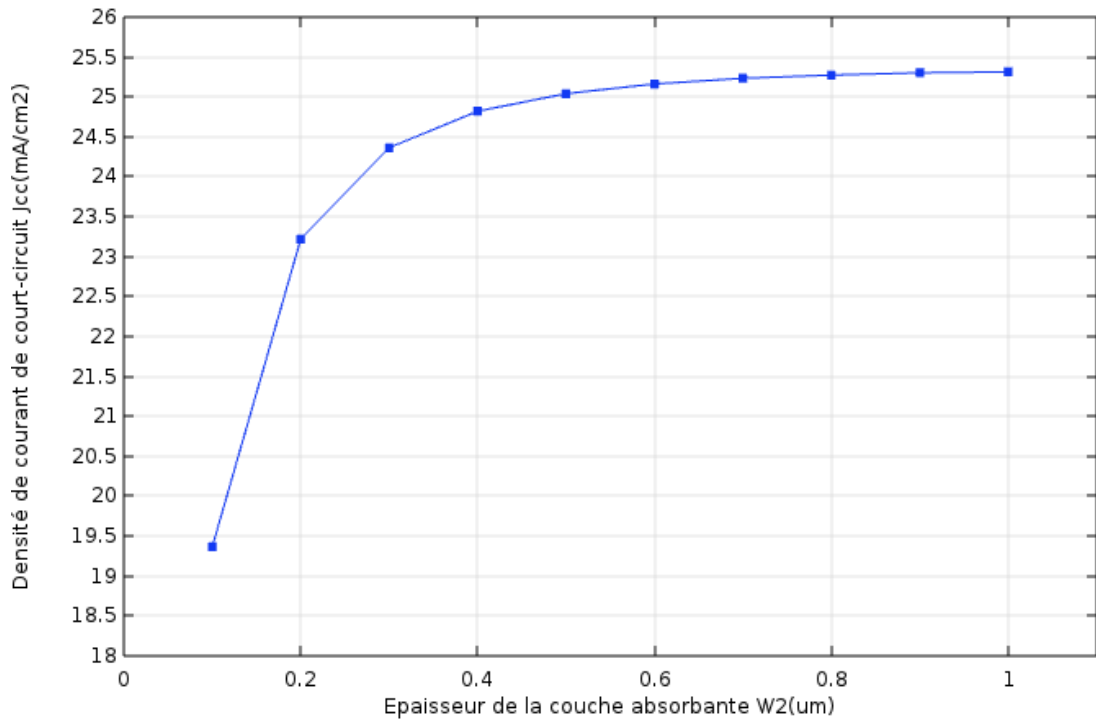


Figure 3.7: Densité du courant de court-circuit J_{CC} en fonction de l'épaisseur de la couche pérovskite.

3. 5.2.4 Tension de circuit ouvert V_{co}

L'influence de la couche absorbante pérovskite sur la tension de circuit ouvert est représentée dans la figure 3.8. On remarque que V_{co} diminue avec l'augmentation de W_2 .

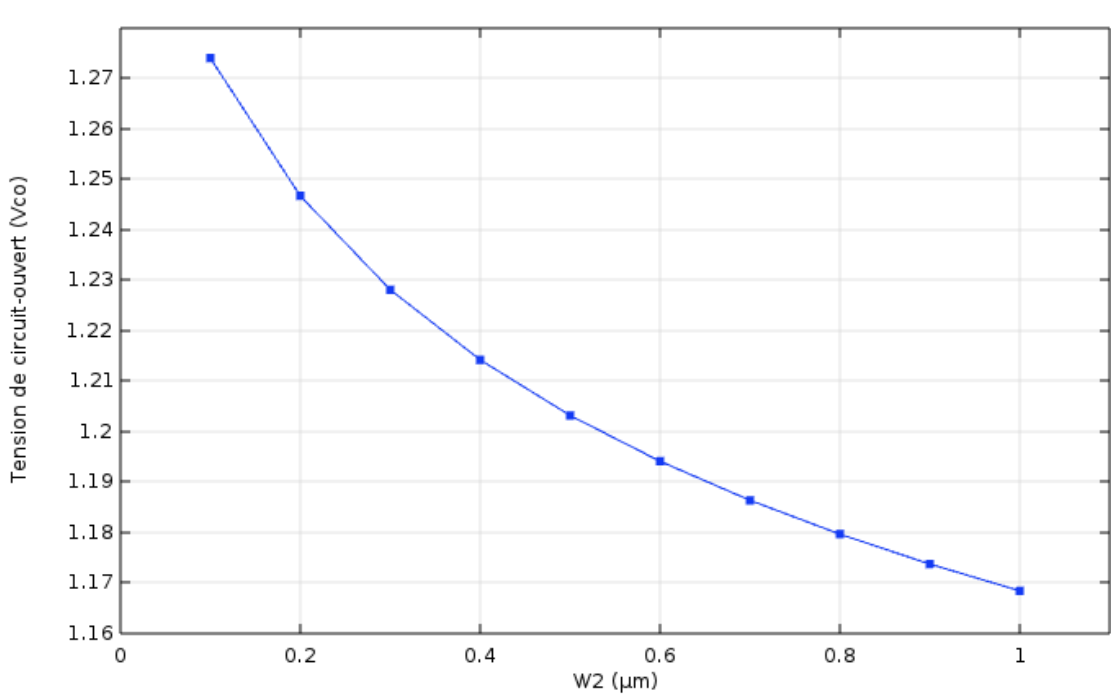


Figure 3.8: Variation de la tension de circuit ouvert V_{co} en fonction de l'épaisseur de la couche pérovskite.

3. 5.2.5 Puissance maximale Pmax

Dans la figure 3.9 on observe que la puissance maximale augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche absorbante pérovskite jusqu'à une valeur $W2=0.4\mu\text{m}$, ensuite elle diminue.

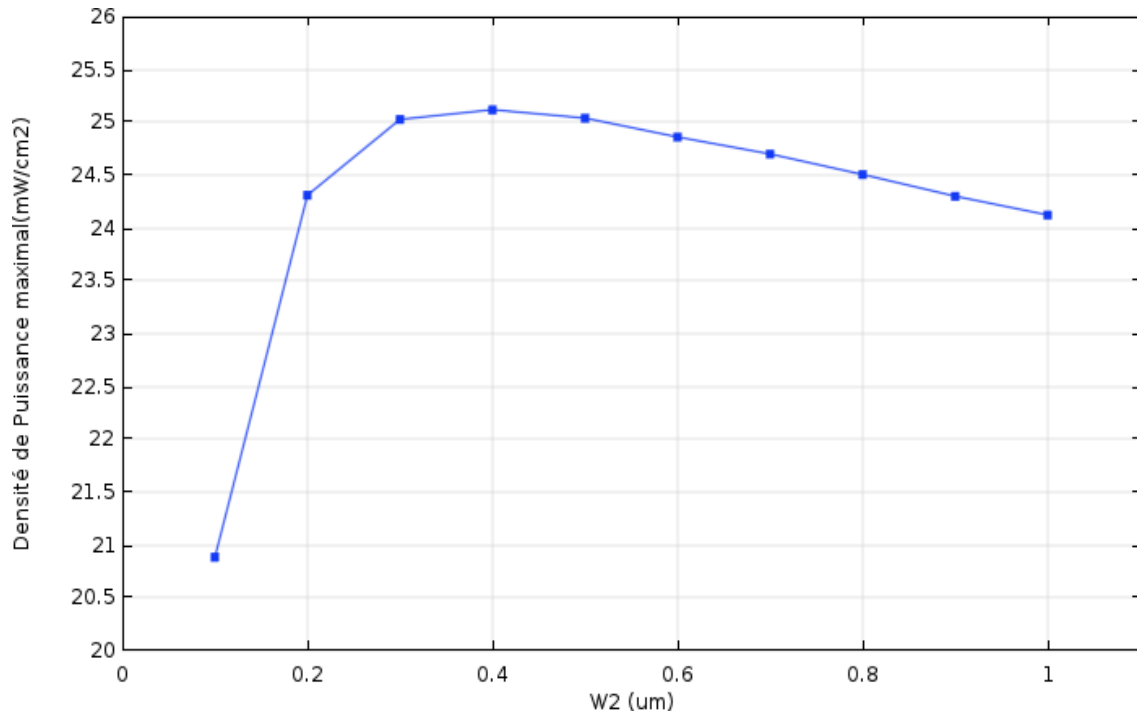


Figure 3.9 : Variation de la puissance maximale en fonction de l'épaisseur de la couche PVK

3. 5.2.6 Rendement

La figure 3.10 présente le rendement en fonction de l'épaisseur $W2$ pour différentes valeurs de x . On remarque que le rendement diminue avec x et atteint sa valeur maximale pour une épaisseur $W2$ entre 0.3 et $0.4\mu\text{m}$.

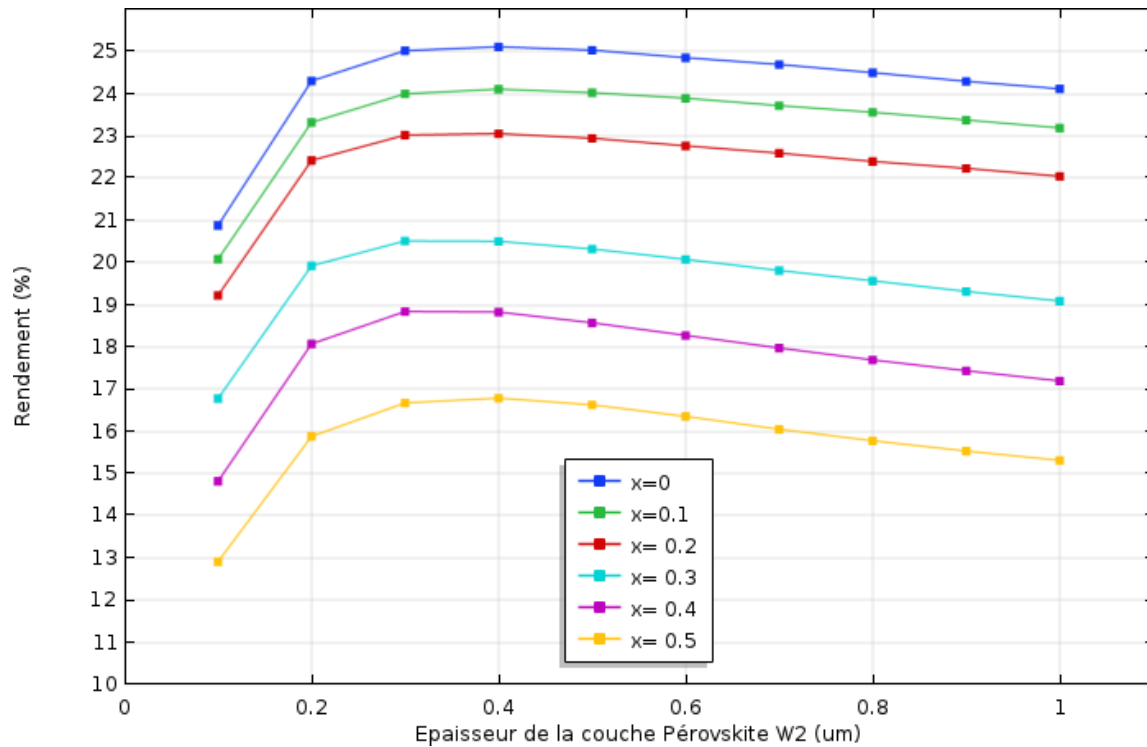


Figure 3.10 : Rendement pour différentes valeurs de x de la cellule pérovskite

3.6 Etude de la cellule inférieure Si

3.6.1 Caractéristiques courant tension J(V)

La figure 3.11 représente les caractéristiques courant-tension pour différentes valeurs de l'épaisseur de la cellule inférieure Si (W4). On constate que le courant augmente avec l'augmentation de l'épaisseur W4 jusqu'à la valeur W4=100um, ensuite la variation devient de plus en plus faible. Quant à la tension de circuit ouvert, elle augmente faiblement.

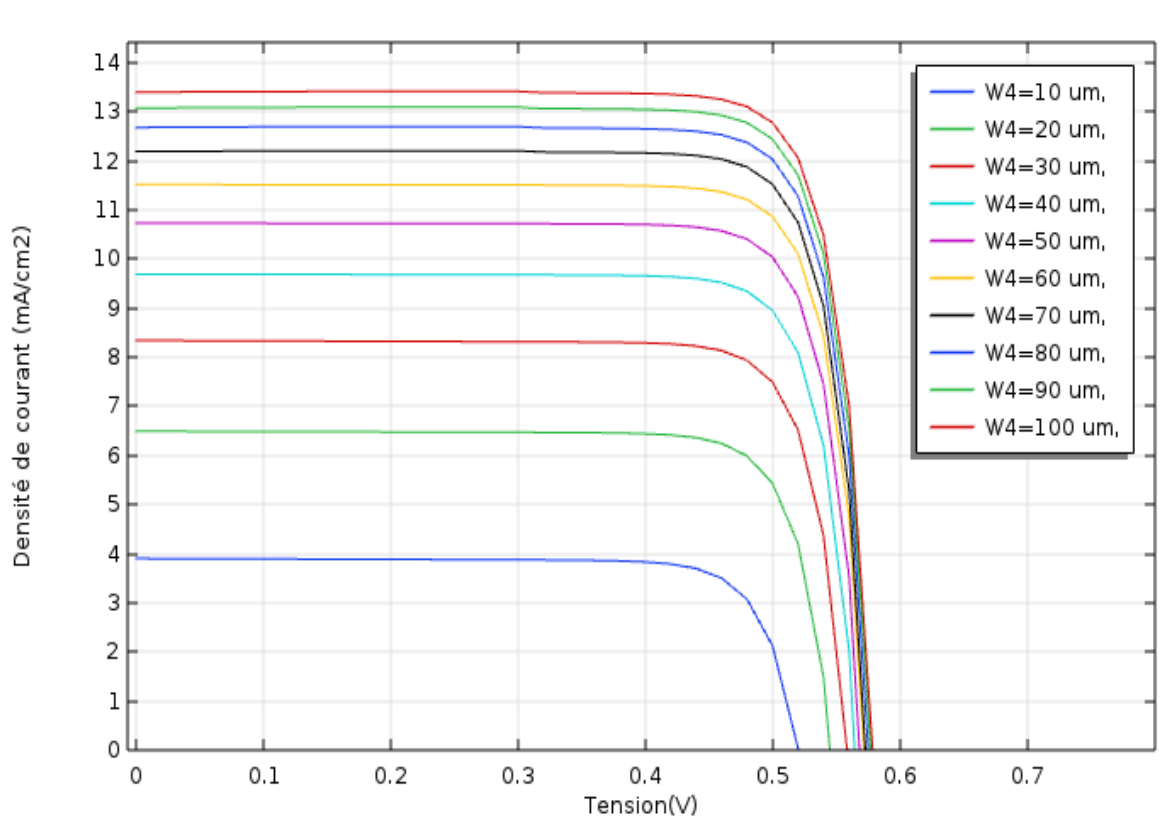


Figure 3.11: Caractéristiques courant tension pour différentes épaisseurs de la couche Si de la cellule Inférieure

3.6.2 Caractéristiques puissance tension P(V)

La figure 3.12 présente les caractéristique P(V) pour différentes épaisseurs de la cellule Si. On remarque que la puissance maximale augmente avec l'augmentation de l'épaisseur, La variation devient très faible à partir de W4=100μm. Quant à la tension de circuit ouvert, elle augmente très faiblement.

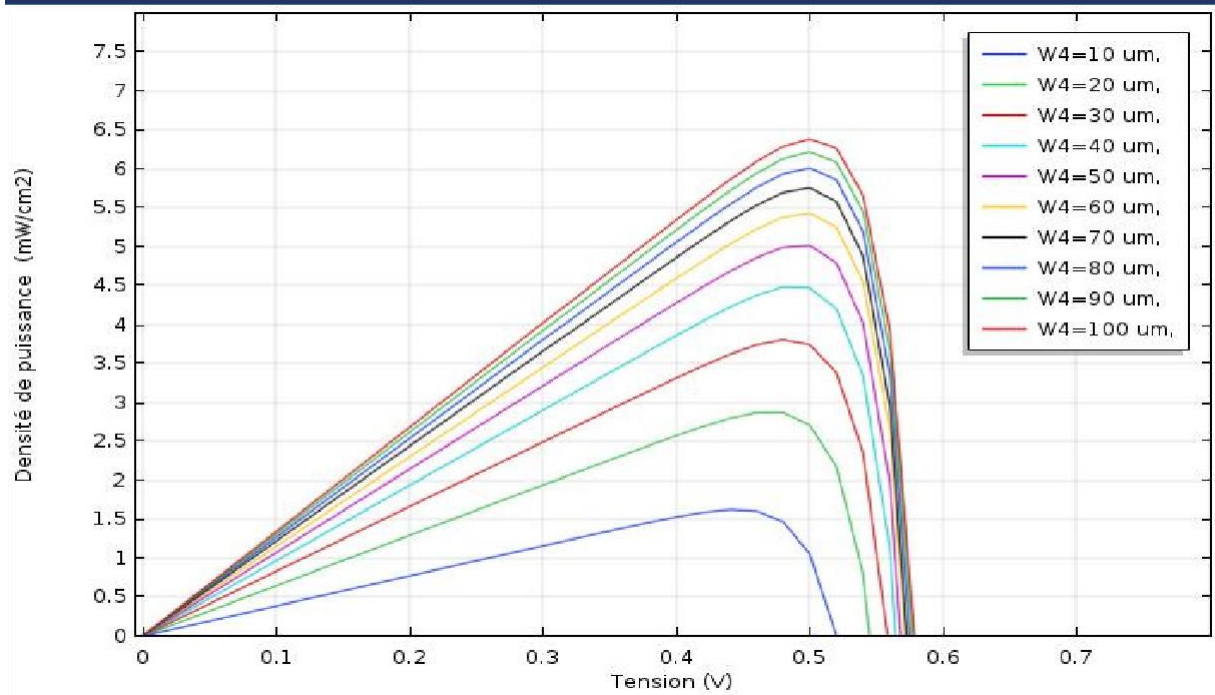


Figure 3.12: Caractéristiques puissance tension pour différentes épaisseurs de la couche Si.

3.6.3 Densité de courant de court-circuit J_{cc}

La figure 3.13 montre la variation du courant de court-circuit en fonction de différentes valeurs de l'épaisseur W_4 de la couche absorbante Si. On remarque que le courant augmente avec W_4 et tend à se stabiliser vers $100\mu\text{m}$.

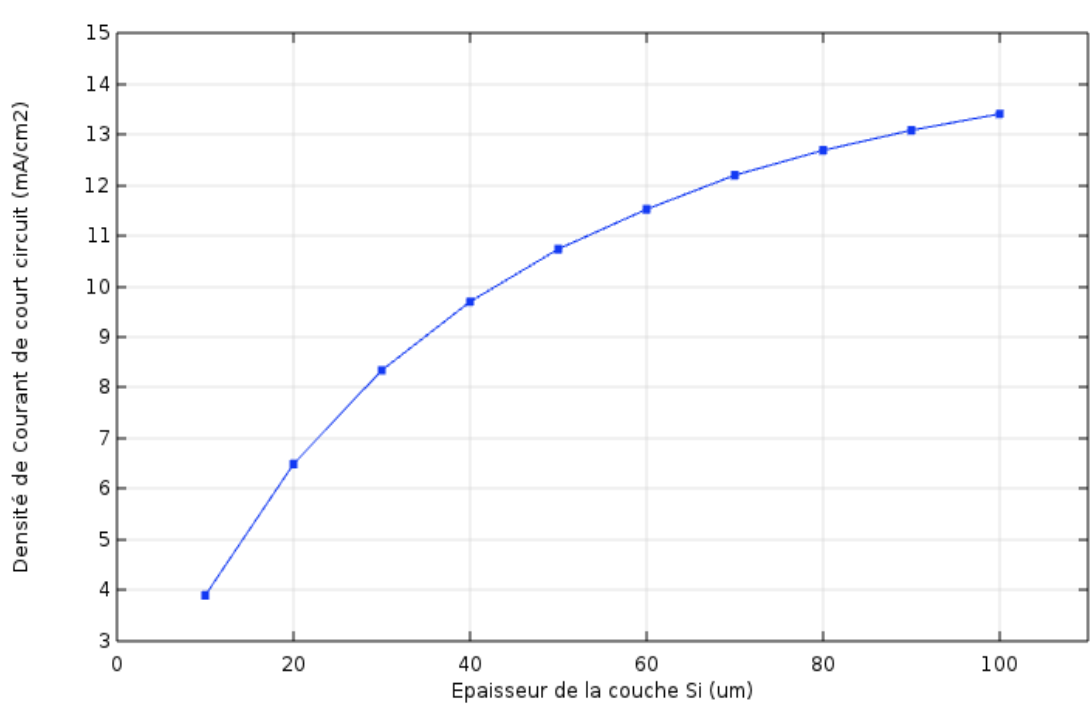


Figure 3.13 : Variation de la densité de courant J_{cc} en fonction de l'épaisseur de la couche Si

3.6.4 Tension de circuit ouvert V_{CO}

L'influence de l'épaisseur de la couche absorbante Si sur la tension de circuit ouvert dans la cellule inférieure est représentée sur la figure 3.14. On voit que l'épaisseur de la couche absorbante Si a une faible influence sur la tension de circuit ouvert V_{CO}

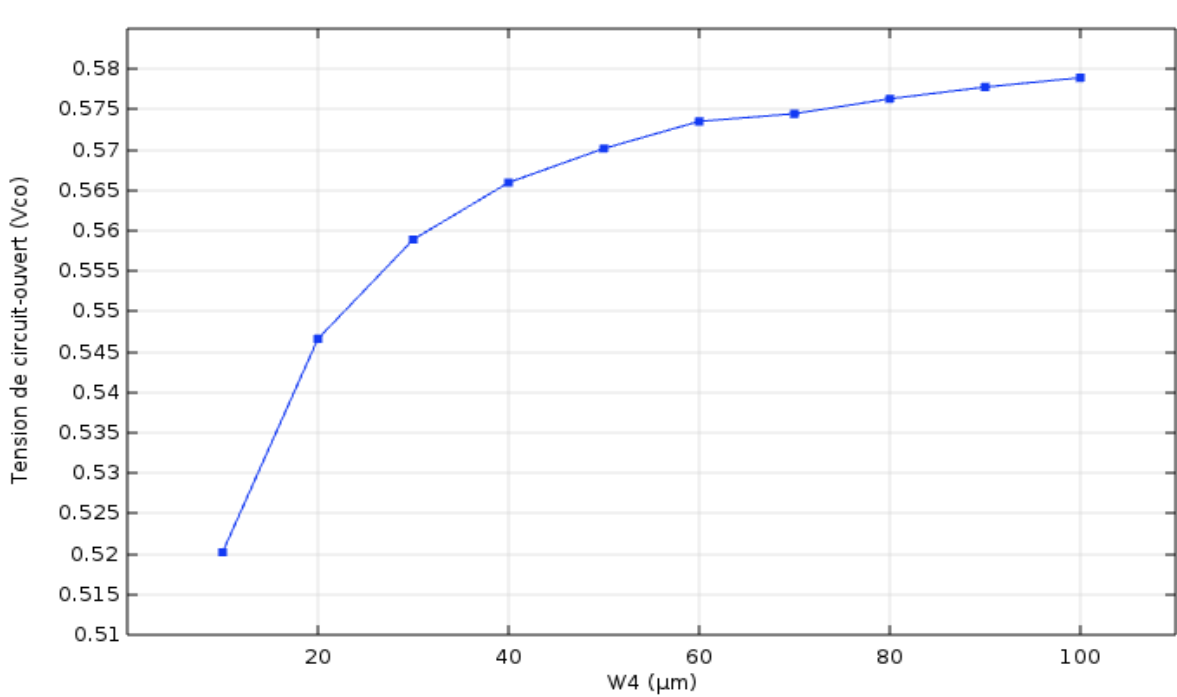


Figure 3.14: Variation de la tension de circuit ouvert V_{CO} en fonction de l'épaisseur de la couche Si

3.6.5 Puissance maximale P_{max}

Dans la figure 3.15 on constate que la puissance maximale augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche Si. La puissance commence à se stabiliser à partir de $W4=100\mu\text{m}$.

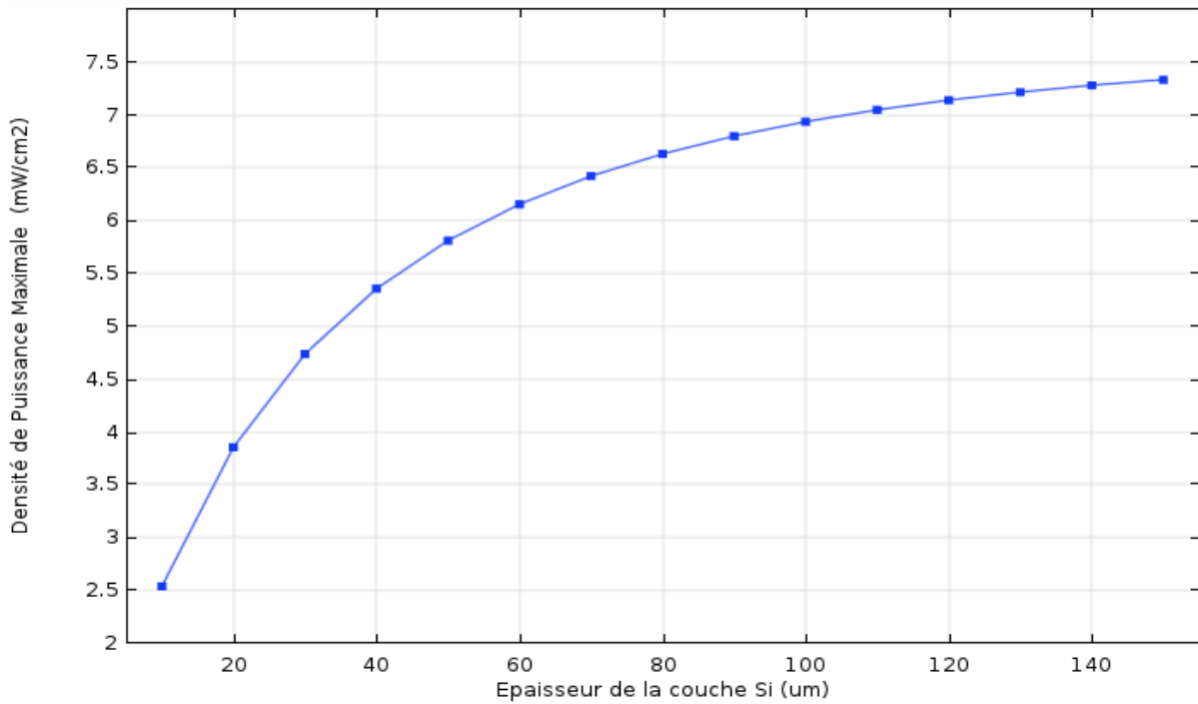


Figure 3.15: Variation de la puissance maximale en fonction de l'épaisseur de la couche Si

3.6.6 Rendement η

Dans la figure 3.16 on constate que le rendement augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche Si. Le rendement commence à se stabiliser à partir de $W_4=100\mu\text{m}$.

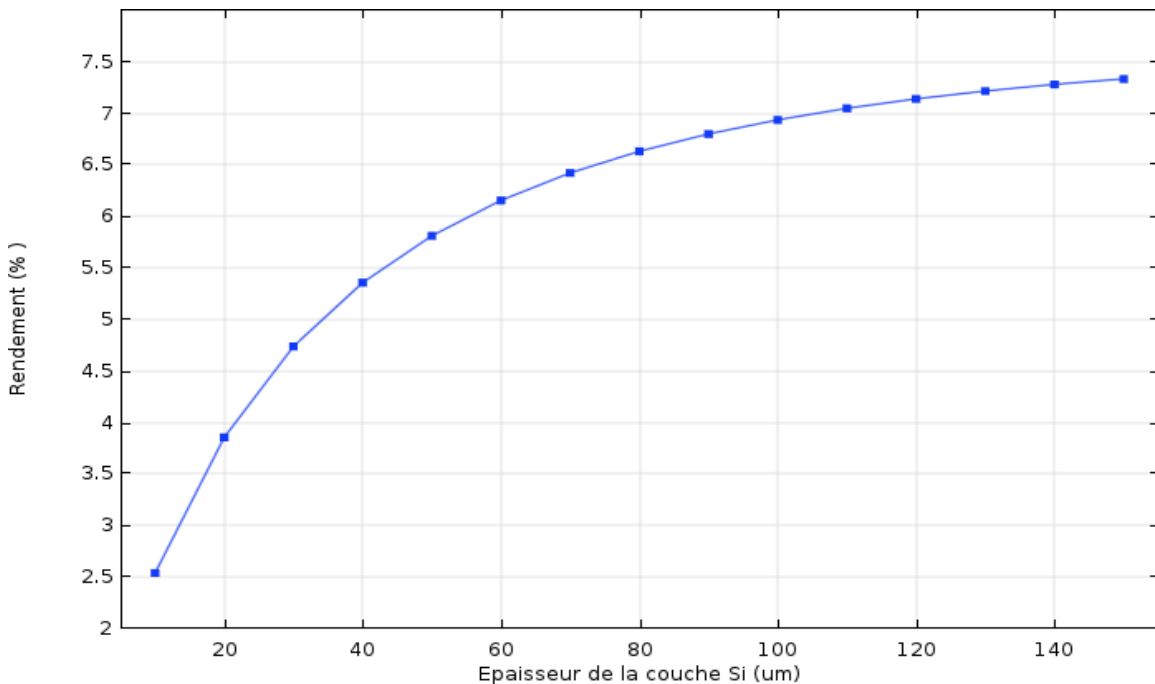


Figure 3.16 : Variation du rendement de la cellule Si en fonction de W_4

La figure 3.17 représente la variation du rendement de la cellule inférieure Si en fonction de l'épaisseur de la couche pérovskite W2 pour différentes valeurs de x. le rendement de la cellule inférieure diminue lorsque W2 augmente, et se stabilise vers W2= 0.5 μm . D'autre part, le rendement augmente lorsque x augmente.

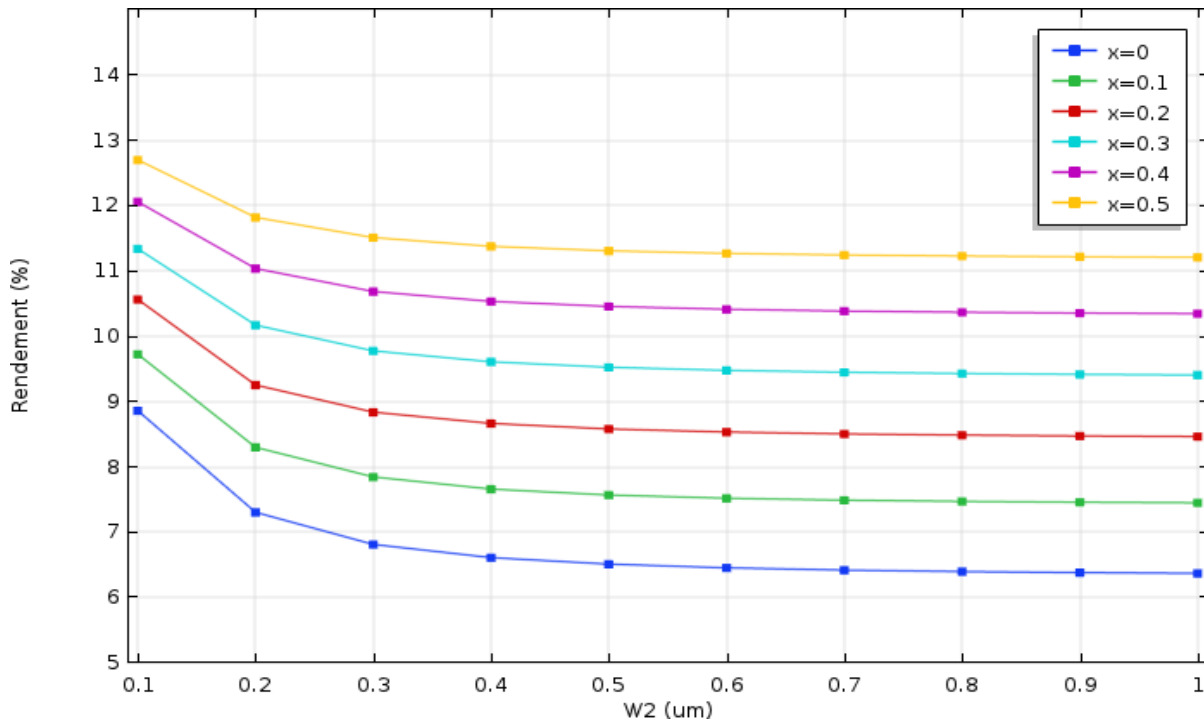


Figure 3.17 : Variation du rendement de la cellule inférieure Si en fonction de l'épaisseur de la couche pérovskite W2

3.7 Etude de la cellule Pérovskite /Si

3.7.1 Cellule PVK/Si cascade à 4 électrodes (4T)

Dans cette configuration les deux cellules sont isolées électriquement et le rendement total de la cellule est la somme des rendements des deux cellules.

La figure 3.18 représente le rendement total de la structure cascade. On constate que le rendement est maximum pour une épaisseur de la couche pérovskite égale à 0.3 μm et une concentration de Brome x=0.2. Le rendement optimal de cette configuration est **31,85%**.

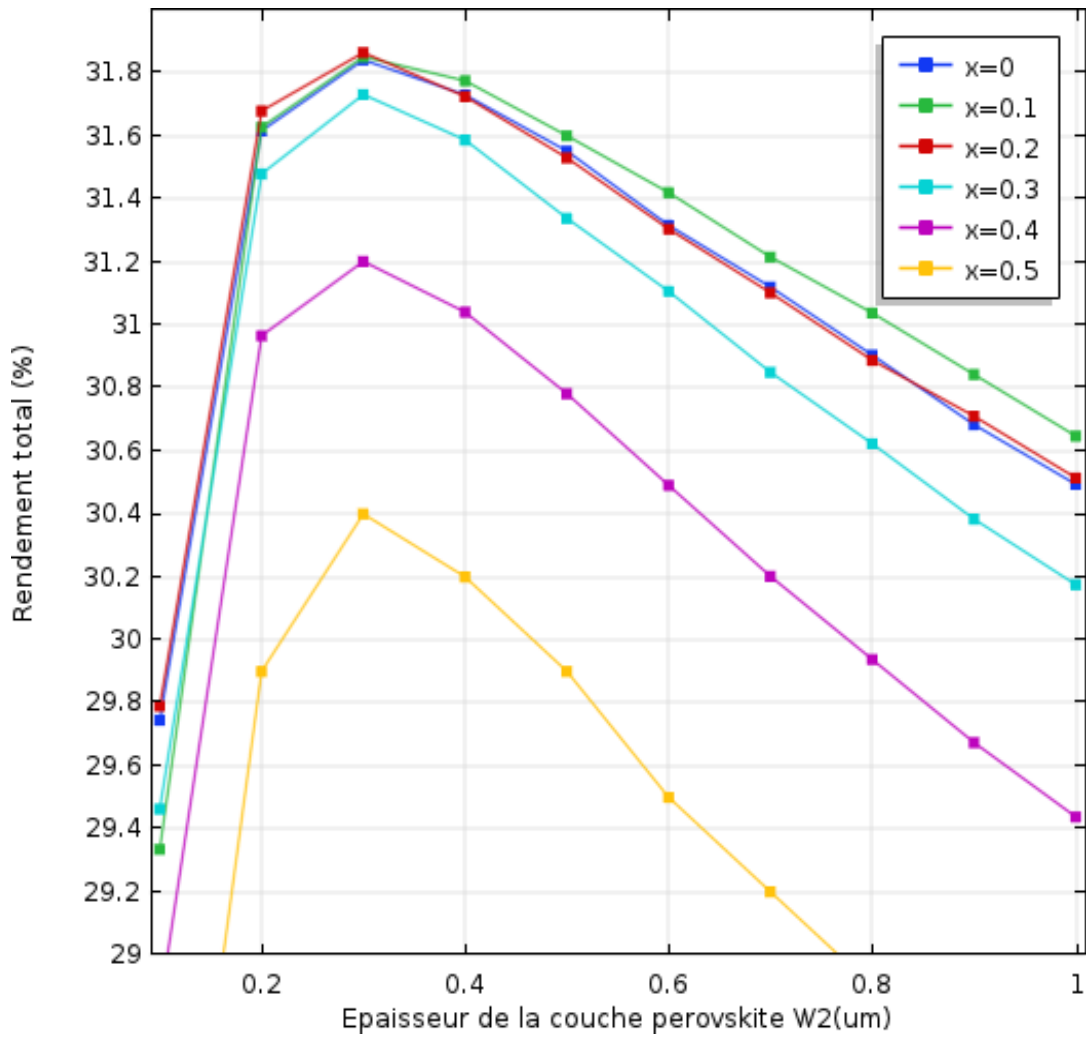


Figure 3.18: Variation du rendement total de la structure cascade PVK/Si

Les caractéristiques de la cellule PVK/Si (4T) sont regroupées dans le tableau 3.2.

Paramètres	J_{cc} (mA/cm ²)	V_{co} (v)	P_{max} (mW/cm ²)	η (%)
Pérovskite	19.75	1.37	23	23
Silicium	18.3	0.59	8.84	8.84
PVK/Si	-	-	31.84	31.84

Tableau 3.2 : Caractéristiques de la cellule PVK/Si cascade (4T)

3.7.2 Cellule PVK/Si série à 2 électrodes (2T)

Dans cette configuration tandem (2T), les deux cellules sont en série. Le rendement est maximum lorsque les courants des deux cellules sont égaux. La figure 3.19 représente la variation des courants de court-circuit des deux cellules en fonction de l'épaisseur de la cellule supérieure Pérovskite.

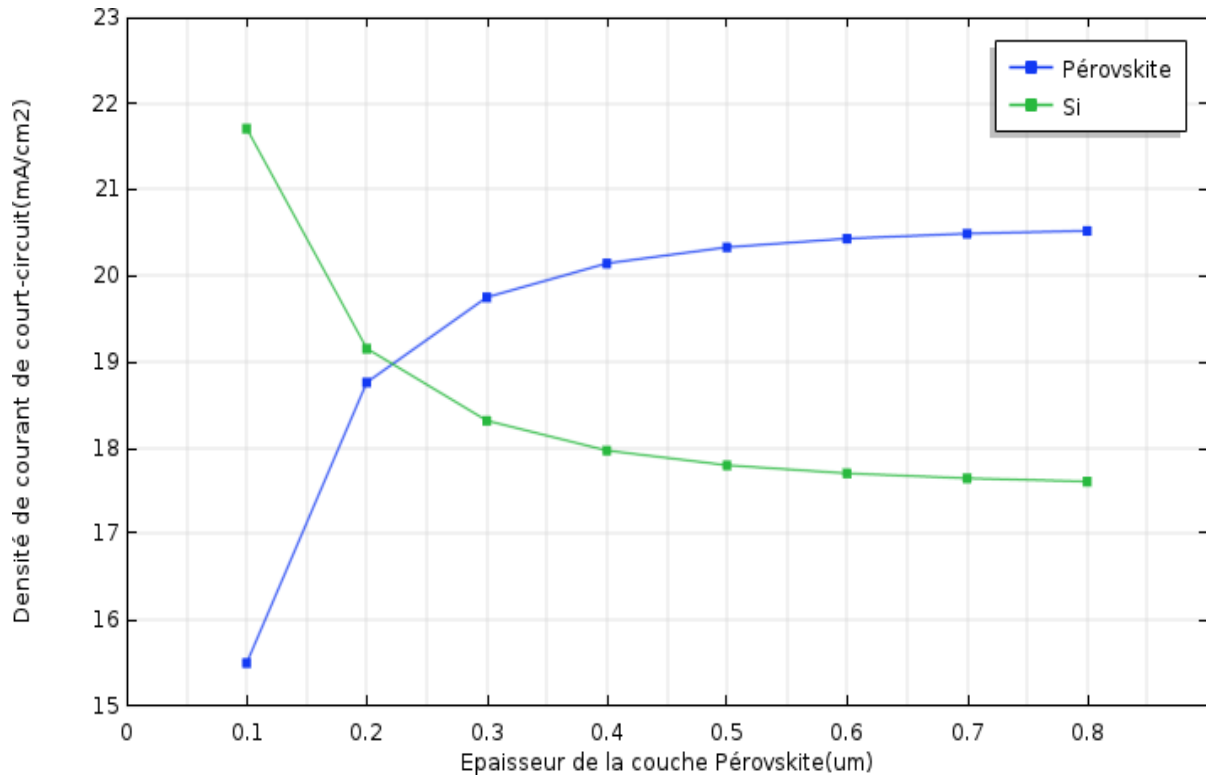


Figure 3.19: Variation des courants de court-circuit des deux cellules en fonction de W2

D'après la représentation graphique de la variation des deux courants, nous remarquons que les deux courbes se rencontrent dans un point d'intersection, la valeur du point représente le courant optimal qui est égale à $18,9 \text{ mA/cm}^2$ qui correspond à une épaisseur de la cellule Pérovskite égale à $0,22 \text{ }\mu\text{m}$. Les caractéristiques des deux cellules après optimisation sont représentées dans les figures 3.20 et 3.21.

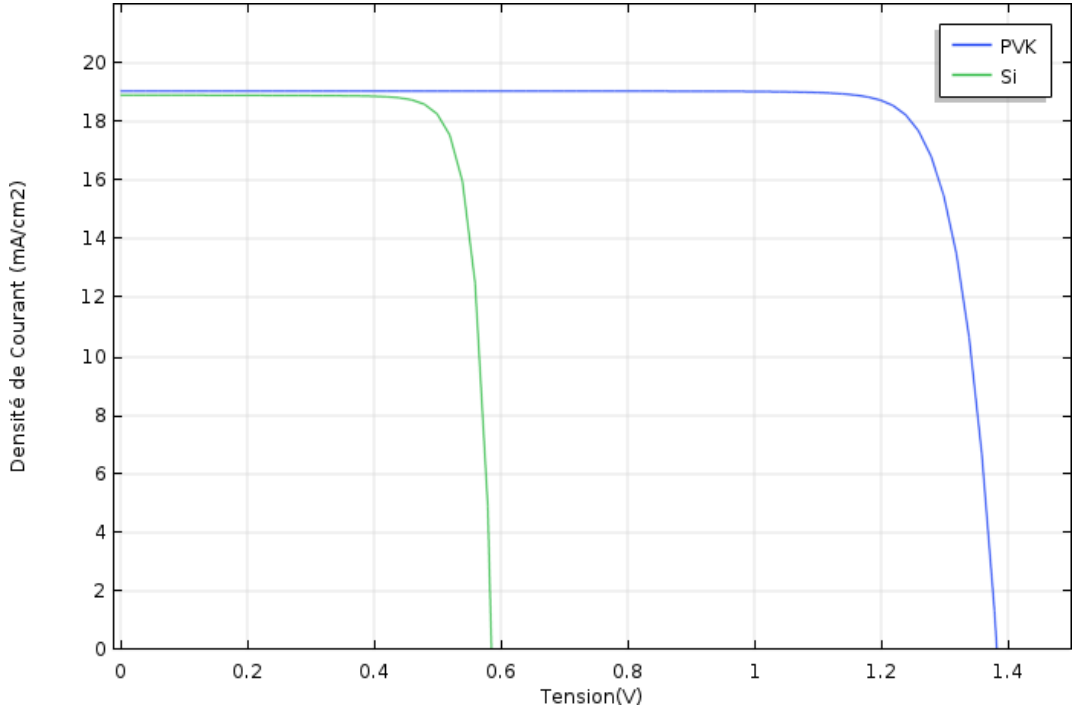


Figure 3.20: Caractéristiques courant-tension de la structure PVK/Si 2T optimisée

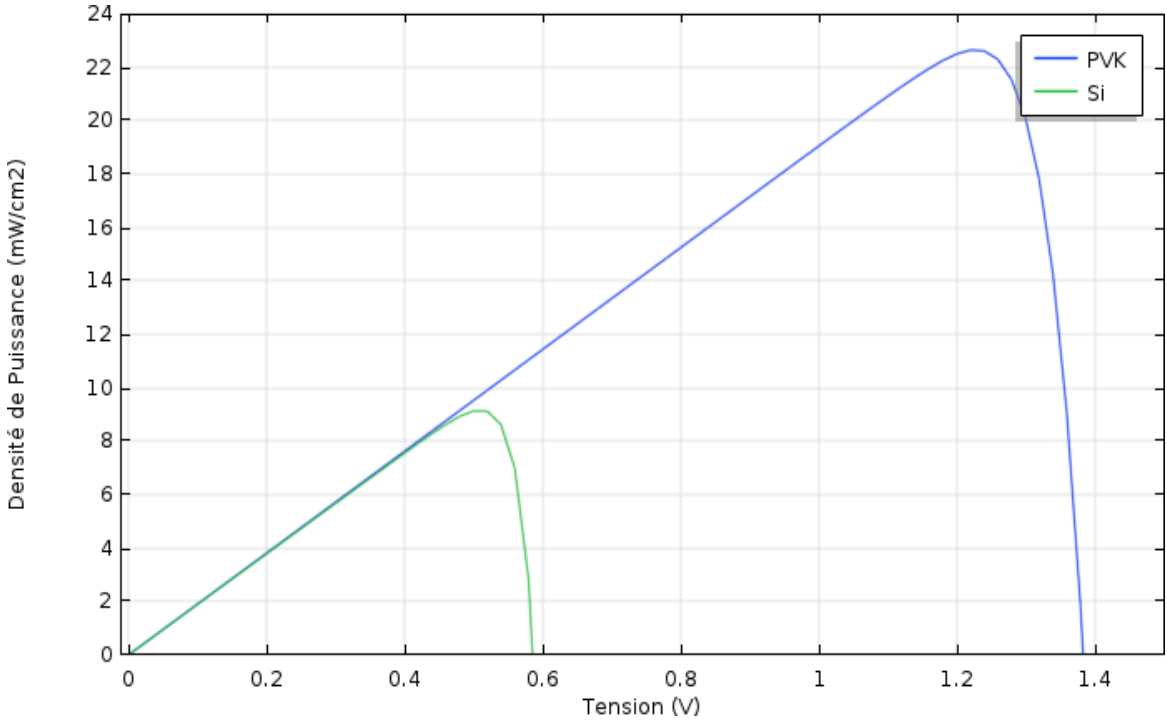


Figure 3.21: Caractéristiques puissance-tension de la structure PVK/Si 2T optimisée

Les caractéristiques de la cellule PVK/Si (2T) sont regroupées dans le tableau 3.3

Paramètres	J_{cc} (mA/cm ²)	V_{co} (v)	P_{max} (mW/cm ²)	η (%)
Pérovskite	18.9	1.38	22.8	22.8
Silicium	18.9	0.58	9	9
PVK/Si	18.9	1.96	31.8	31.8

Tableau 3.3 : Caractéristiques de la cellule PVK/Si série (2T)

3.8 Conclusion

Nous avons abordé, dans ce chapitre, la simulation numérique de la cellule tandem pérovskite/Si par le logiciel COMSOL. Cette étude a pour objectif d'optimiser certains paramètres électriques et géométriques pour obtenir un meilleur rendement.

Les résultats de la simulation montrent que les deux paramètres, concentration de Brome et épaisseur de la couche pérovskite, ont un rôle très important dans la détermination des performances de la cellule.

Un rendement de l'ordre de 32% est prévu pour les deux configurations.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Les cellules solaires à base de Pérovskite peuvent, avec les développements des technologies d'élaboration, constituer des dispositifs prometteurs dans le domaine de la conversion photovoltaïque.

L'utilisation des cellules tandem constitue une solution attrayante pour améliorer le rendement des cellules solaires.

Dans ce travail, nous avons fait l'étude, la simulation et l'optimisation d'une cellule solaire double jonction Pérovskite/Si.

L'utilisation de l'outil de simulation le logiciel COMSOL a permis à travers la détermination de la caractéristiques (J-V) de la cellule d'obtenir les différentes caractéristiques à savoir : le courant de court-circuit J_{cc} , la tension de circuit ouvert V_{co} , et le rendement de conversion η .

Les résultats obtenus dans cette étude ont permis de constater que les performances optimales de notre structure dans la configuration cascade (4T) sont obtenues pour une concentration de Brome de la couche pérovskite $x=0.2$, une épaisseur de la couche absorbante de la cellule supérieure de l'ordre de $0.3\mu\text{m}$ et de la cellule inférieure de l'ordre de $100\mu\text{m}$ et un rendement de conversion optimal de l'ordre de 32% peut être atteint. Et dans la configuration série (2T), les performances optimales sont obtenues pour une concentration de Brome $x=0.2$, une épaisseur de la couche absorbante de la cellule supérieure de l'ordre de $0.22\mu\text{m}$ et de la cellule inférieure de l'ordre de $100\mu\text{m}$ et un rendement de conversion optimal de l'ordre de 32% peut être atteint.

En perspective, la suite de ce travail peut être envisagée en considérant d'autres matériaux pour la cellule inférieure tel que CIGS, et de considérer un matériau Pérovskite sans Plomb qui est un élément toxique et doit être évité.

Bibliographie

- [1] T. He, Q. Huang, A. Ramirez, Y. Wang, K. Regan, N. Rogado, et al., « Superconductivity in the non-oxide perovskite MgCNi_3 », *Nature*, vol. 411, pp. 54-56, 2001.
- [2] L. G. Tejuca et J. Fierro, *Properties and applications of perovskite-type oxides*: CRC Press, 2000.
- [3] N.-G. Park, « Perovskite solar cells: an emerging photovoltaic technology », *Materials Today*, vol. 18, pp. 65-72, 3// 2015.
- [4] V. Goldschmidt, « Crystal structure and chemical correlation », *Ber Deut Chem Ges*, vol. 60, pp. 1263-1296, 1927.
- [5] W. Travis, E. N. K. Glover, H. Bronstein, D. O. Scanlon et R. G. Palgrave, « On the application of the tolerance factor to inorganic and hybrid halide perovskites: a revised system », *Chemical Science*, vol. 7, p. 4548-4556, 2016.
- [6] Z. Li, M. Yang, J.-S. Park, S.-H. Wei, J. J. Berry et K. Zhu, « Stabilizing Perovskite Structures by Tuning Tolerance Factor: Formation of Formamidinium and Cesium Lead Iodide Solid-State Alloys », *Chemistry of Materials*, vol. 28, pp. 284-292, 2016.
- [7] Z. Bendjellouli, « Contribution à la modélisation d'une cellule solaire », *Mémoire de magister*, Université de Béchar, 2009.
- [8] R. Bettignies, « Cellules photovoltaïques organiques dérivées de nouveaux systèmes conjugués », *Thèse de doctorat*, Angers, 2003
- [9] G. Adam. R, *Modeling heterogeneous carbon nanotube networks for photovoltaic application using silvaco atlas software*», Thesis Naval postgraduate school Monterey California. 2012.
- [10] Anne Labouret, Michel Viloz, *Energie Solaire Photovoltaïque*, 3ème édition, Dunod, Paris, 2006.
- [11] <https://www.researchgate.net/figure/Composantes-du-rayonnement-solaire-Le-rayonnement-solaire-arrive-au-sol-directement>.
- [12] Anne Labouret, Michel Viloz, *Energie Solaire Photovoltaïque*, 3ème édition, Dunod, Paris, 2006.

Bibliographie

- [13] Jack Bernard, Energie solaire calcul et optimisation, 2004, France
- [14] Djeghbala Afaf, « Etude par simulation numérique de l'effet du Dopage et des épaisseurs sur les Caractéristiques électriques d'une Cellule solaire (p/n) en Silicium », Mémoire de Master, Université Med Khider Biskra, 2013.
- [15] Yiannis Trip Anagnostopoulos . Hybrid Photovoltaic / Thermal Collectors. Building Integration of Solar Thermal Systems - TU1205 - BISTS, Univ. of Patras, Patra, Greece
- [16] REYNAUD Jean-François. « Recherches d'optimums d'énergies pour charge/décharge d'une batterie à technologie avancée dédiée à des applications », T H E S E En vue de l'obtention du DOCTORAT Université Toulouse III Paul Sabatier 2011.
- [17] Dr. BELAID LALOUNI Sofia, Maître de Conférences Classe B. Cours Energie Solaire
- [18] <http://public.iutenligne.net/etudes-et-realizations/sivert/panneaux->
- [19] OUSSIDHOUM Samira : ' Etude comparative des performances des cellules solaires à jonctions simples et multiples', Mémoire de magister, Université MOULOUD MAMMERI Tizi -Ouzou, 2015
- [20] M. KAABACHE CHOKRI : 'SIMULATION ET ETUDE DES CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES D'UN CONTACT METAL SEMI - CONDUCTEUR A BASE DU GaAs', Mémoire de master, Université A.MIRA-BEJAIA,2016.
- [21] <https://www.techno-science.net/definition/2906.html>
- [22] Université Djillali Liabès de Sidi Bel Abbès, these "Propriétés électriques et photoélectriques des diodes Schottky à base du matériau GaAs nitruré : Mesures et Simulation" Par Mr RABEHI ABDELAZIZ
- [23] Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen, MAGISTER-thème « ETUDE COMPARATIVE DES PARAMETRES PHYSIQUES DES MATERIAUX PHOTOVOLTAÏQUES A BASE DE SILICIUM MONOCRISTALLIN ET POLYCRISTALLIN » réalisé par : M me GHENNOU Épouse BAKHTI Souad.
- [24] O. Hardouin Duparc : Pierre Auger - Lise Meitner, Contributions Comparées à l'effet Auger, Reflets de la Physique, (2010)
- [25] BELAIDI Siham : 'Simulation par Excel d'une cellule solaire conventionnelle en Silicium ' ,Projet de Fin d'Etudes master , Université Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem , 2018 .
- [26] Mémoire de master thème "Etude et simulation d'une cellule solaire à base couches minces CZTS " présenté par Oubouchou Amina
- [27] <https://www.emse.fr/~dutertre/enseignement.html>

Bibliographie

- [28] H. Mathieu, « Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques », Edition Masson, Paris, 1996.
- [29] M. Sessolo and H. J. Bolink, “Perovskite Solar Cells Join The Major League,” *Science* vol. 350, no. 6263, pp. 917–917, Nov. 2015.
- [30] S. J. Yoon, K. G. Stamplecoskie, and P. V. Kamat, “How Lead Halide Complex Chemistry Dictates the Composition of Mixed Halide Perovskites,” *J. Phys. Chem. Lett.*, vol. 7, no. 7, pp. 1368–1373, Apr. 2016.
- [31] (Consulté le 01/06/2017). Tableau d’efficacité NREL. Disponible : http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg
- [32] Y. Ma et al., “Recent Research Developments of Perovskite Solar Cells,” *Chinese J. Chem.*, vol. 32, no. 10, pp. 957–963, 2014.
- [33] Zouhair El Jouad. Réalisation et caractérisation des cellules photovoltaïques organiques. Physique [physics]. Université d’Angers, 2016. Français. NNT : 2016ANGE0022. tel-01443621.
- [34] Adapté de <https://chemicalstructure.net/portfolio/perovskite/>
- [35] D. Bi et al., « Nucleation et croissance cristalline à base de polymères de films de pérovskite pour les cellules solaires avec une efficacité supérieure à 21% », *Nature Energy*, vol. 1, non. 10, p. 16142, 2016.
- [36] M. Habibi, F. Zabihi, M. R. Ahmadian-Yazdi et M. Eslamian, « Progress in cellules solaires émergentes à couche mince traitées en solution – Partie II : cellules solaires à pérovskite, » *Revue des énergies renouvelables et durables*, vol. 62, pages 1012-1031, 2016.
- [37] S. Luo et W. A. Daoud, « Les progrès récents de la pérovskite aux halogénures organiques-inorganiques cellules solaires : mécanismes et conception de matériaux », *Journal of Materials Chemistry A*, vol. 3, non. 17, pages 8992–9010, 2015.
- [38] J.-H. Im, J. Chung, S.-J. Kim et N.-G. Park, « Synthèse, structure et propriété photovoltaïque d’un nouveau sensibilisateur nanocristallin 2H de type pérovskite (CH₃ CH₂ NH₃) PbI₃ », *Lettres de recherche à l’échelle nanométrique*, vol. 7, non. 1, p. 353, 2012.
- [39] P. Edelman, W. Henley et J. Lagowski, « Imagerie de longueur de diffusion de photoluminescence et de porteurs minoritaires dans le silicium et le GaAs », *Semicond. Sci. Technol.*, Vol. 7, non. 1A, p. A22 – A26, janvier 1992.

Bibliographie

- [40] J.-W. Lee, D.-J. Seol, A.-N. Cho et N.-G. Park, « Pérovskite à haute efficacité cellules solaires basées sur le polymorphe noir de HC (NH₂)₂PbI₃, « *Advanced Matériaux*, vol. 26, non. 29, pages 4991 à 4998, 2014.
- [41] V. Sarritzu et al., « Bande interdite directe ou indirecte dans les pérovskites aux halogénures de plomb hybrides ? », *Adv. Opter. Mater.*, Vol. 6, non. 10, p. 1701254, mai 2018.
- [42] “Solar Generation V” Greenspace-European. Photovoltaic Industry Association.
- [43] N-G Park. (2013). Organometal Perovskite Light Absorbers Toward a 20% Efficiency Low-Cost Solid-State Mesoscopic Solar Cell. *The Journal of Physical Chemical Letters*.
- [44] T. Baikie, Y. Fang, J. M. Kadro, M. Schreyer, F. Wei, S. G. Mhaisalkar & T. J. White. (2013). Synthesis and crystal chemistry of the hybrid perovskite (CH₃NH₃)PbI₃ for solid-state sensitised solar cell applications. *Journal of Materials Chemistry A*, 1, 5628-5641.
- [45] P. Umari, E. Mosconi & Filippo De Angelis. (2014). Relativistic GW calculations on CH₃NH₃PbI₃ and CH₃NH₃SnI₃ Perovskites for Solar Cell Applications. *Scientific Reports*, 4, 4467.
- [46] Global Market outlook for photovoltaics until 2019. Solar Power Europe.
- [47] Y.H Chang and C.H. Park. (2004). First-principles study of the structural and the electronic properties of the lead-halide-based inorganic-organic perovskites (CH₃NH₃)PbX₃ and CsPbX₃ (X=Cl, Br, I). *J. of the Korean Phys. Soc.*, 44(4), 889-893.
- [48] *Opt Quant Electron* (2018) 50 :21 <https://doi.org/10.1007/s11082-017-1284-0/>
- [49] <https://www.clicours.com/presentation-du-logiciel-comsol-muitiphysics/>
- [50] Tze-Chien Sum and Nripan Mathews, “Halide Perovskites Photovoltaics, Light Emitting Devices, and Beyond”. KGaA, Boschstr. 12, 69469 Weinheim, Germany , p132,133,139,140. 2019
- [51] Jérémie WERNER, « Perovskite/Silicon Tandem Solar Cells: Toward Affordable Ultra-High Efficiency Photovoltaics ? » THÈSE NO 8659, ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE, p 7-10 , 2018.
- [52] www.cense.iisc.ac.in/research/solar-cells