

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Saâd Dahleb, Blida-1
Faculté de Technologie
Département des Énergies Renouvelables



Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du Diplôme de Master en Energies Renouvelables
OPTION : Conversion Photovoltaïque

Thème :

**Étude et simulation d'une cellule solaire à
base des matériaux pérovskite hybride
($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$)**

**Présenter par : -BELHENNICHE Amine
-MELLOUK Abdelhak**

Soutenu devant le jury composé de :

Dr. M.M BOUZAKI	MCB	USDB	President
Dr. H.MAZOUZ	MCA	USDB	Examineur
Dr. A.BEDIA	MCA	USDB	Examineur
Dr. M.BENAHMED	MCB	USDB	Encadreur
Dr. T.DOUMAZ	MAA	USDB	Co-encadreur

Année Universitaire : 2021/2022

Remerciements

Remerciements

Mes Remerciements, avant tout à Dieu tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il m'a donnée durant ces longues années d'études afin que je puisse arriver à ce stade.

Un grand Merci à mes très chers parents qui m'ont toujours encouragé.

Je tiens à remercier mon promoteur, Dr.BENAHMED Abdelmoumene, enseignant au département des énergies renouvelables, 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, dont les encouragements et les conseils judicieux qui m'ont été de très grande utilité.

Mes Remerciements s'adressent également à Professeur AISSAT Abdelkader, enseignant à l'université Saad Dahleb Blida1.

Je tiens à remercier tous les membres de jury.

Je tiens à remercier enfin tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à réaliser ce travail.

Dédicace

Nous dédions ce modeste mémoire

Pour nos mères

A nos parents

A nos frères et sœurs

Pour toute notre famille

A tous nos amis

Résumé

ملخص: تعتبر الخلايا الكهروضوئية أفضل طريقة لاستخدام الطاقة الشمسية عن طريق امتصاص أشعة الفوتون. الغرض من هذا العمل البحثي هو محاكاة خلية شمسية من البيروفسكايت وإيجاد السماكة المثلى للطبقة الممتصة وتأثير درجة الحرارة. نقوم هنا بتشغيل محاكاة لخلايا بيروفسكايت الشمسية على برنامج محاكاة SCAPS-1D. يستخدم هيكل الخلية تشابهاً مع الخلايا الشمسية غير العضوية الأخرى مثل CIGS و Cu (In و CdTe) ، Se₂ (Ga) طبقة الامتصاص هي $CH_3NH_3PbI_{3-x}Cl_x$ المستخدمة هنا لاهتمامها الكبير كمتص فعال للغاية. تم الحصول هنا على جهد دائرة مفتوحة عالية 1.1981 فولت وكفاءة 25.82%. من خلال تغيير سمك الطبقة الماصة، تم الحصول على النتيجة المثلى وتوضح ذلك في خصائص I-V وكفاءة الكم (QE) .

وقمنا أيضاً بدراسة تأثير الكلور على الخلايا الشمسية من البيروفسكايت و قمنا بمقارنتها مع الخلايا الشمسية بدون الكلور.

الكلمات المفتاحية: خلية شمسية، بيروفسكايت، سكاپس -1D، سمك، كفاءة كمومية $CH_3NH_3PbI_{3-x}Cl_x$

Résumé : La cellule photovoltaïque est le meilleur moyen d'utiliser l'énergie solaire en absorbant le rayonnement photonique. Le but de ce travail est de simuler une cellule solaire en pérovskite et de trouver l'épaisseur optimale de la couche absorbante et l'effet de la température. Ici, nous exécutons une simulation de cellules solaires pérovskite sur le logiciel de simulation SCAPS-1D. La structure cellulaire utilise la similitude avec d'autres cellules solaires inorganiques telles que CIGS, CdTe et Cu (In, Ga) Se₂. La couche absorbante est $CH_3NH_3PbI_{3-x}Cl_x$ utilisé ici pour sa grande attention en tant qu'absorbeur très efficace. Une tension de circuit ouvert élevée de 1,1981 V obtenue ici et le rendement est de 25.82 %. En faisant varier l'épaisseur de la couche absorbante, un résultat optimal a été obtenu et le démontre dans les caractéristiques I-V et l'efficacité quantique (QE).

Nous avons également étudié l'effet du chlore (Cl) sur les cellules solaires en pérovskite et les avons comparées avec des cellules solaires sans chlore (Cl).

Mots clés : cellule solaire pérovskite, Scaps-1D, $CH_3NH_3PbI_{3-x}Cl_x$, épaisseur, efficacité quantique.

Abstract: Photovoltaic cells are the best way to use solar energy by absorbing photon radiation. The purpose of this paper is to simulate the perovskite solar cell parameters which are: the absorber layer optimal thickness as well as the effect of temperature. A simulation of perovskite

Résumé

solar cells is carried out on the SCAPS-1D simulation software. The cell structure uses similarity to other inorganic solar cells such as CIGS, CdTe and Cu(In, Ga)Se₂. The absorber layer is CH₃NH₃PbI₃-XCl_x used here for its great attention as a very efficient absorber. A high open circuit voltage of 1.1981 V is obtained and the efficiency is around 25.82%. By varying the thickness of the absorbent layer, and through the I-V characteristic curves as well as the quantum efficiency (QE), optimal results were obtained.

We also studied the effect of chlorine on perovskite solar cells and compared them with solar cells without chlorine.

Keywords: perovskite solar cell, Scaps-1D, CH₃NH₃PbI₃-XCl₃, thickness, quantum efficiency.

Sommaire

Sommaire

Remerciement.....	
Dédicace.....	
Résumé.....	
Sommaire.....	
Liste des figures, tableaux et équations.....	
Introduction générale.....	
Chapitre I: Généralité sur les cellules photovoltaïques	4
I.1 Introduction :	5
I.2 Historique :	5
I.3 L'effet photovoltaïque :	6
I.4 Energie solaire :	7
I.4.1 Eclairages solaires :	7
I.4.2 Rayonnement solaire :	7
I.4.3 Distribution Spectrale du rayonnement :	8
I.5 Cellule photovoltaïque :	9
I.5.1 Cellules monocristallines :	10
I.5.2 Cellules poly-cristallines :	10
I.5.3 Cellules amorphes :	10
I.6 Paramètres d'une cellule photovoltaïque :	11
I.7 Les différentes générations photovoltaïques :	12
I.7.1 Les cellules photovoltaïques de la première génération :	13
I.7.2 Les cellules photovoltaïques de la deuxième génération :	14
I.7.3 Les cellules photovoltaïques de troisième génération :	16
I.8 Perspective d'évolution des différentes technologies photovoltaïques :	18
I.9 Conclusion :	20
Chapitre II: Les cellules solaires à base de matériaux pérovskites	21
II.1 Introduction :	22
II.2 Les pérovskites :	22
II.2.1 Propriétés structurales des pérovskites :	23
II.2.2 Propriétés électriques :	25
II.2.3 Propriétés optiques :	25
II.3 Architecture des cellules Pérovskites :	27
II.4 Principe de fonctionnement de la cellule solaire à base de pérovskite :	28
II.5 Elaboration des cellules photovoltaïques pérovskites :	29
II.5.1 Electrode de collecte transparente :	29
II.5.2 Couche bloqueuse de trou :	30
II.5.3 Transporteur d'électron (ETL) :	30
II.5.4 Absorbeur solaire (Pérovskite) :	30

Sommaire

II.5.5	Transporteur de trou :	30
II.5.6	Contre-électrode :	31
II.6	Conclusion :	31
Chapitre III: Simulation et résultats		32
III.1	Introduction :	33
III.2	Logiciels de simulation les plus utilisés :	33
III.2.1	Logiciel SCAPS :	33
III.3	Optimisation de la cellule pérovskite à base de $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$:	34
III.3.1	Présentation de la cellule solaire à base de $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$:	34
III.3.2	Structure de la cellule :	35
III.4	Étude des performances de la cellule solaire à base de $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$:	39
III.4.1	Influence de l'épaisseur de la couche absorbante sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire à base de $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$:	39
III.4.2	Influence de l'énergie de gap de la couche absorbante sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire à base de $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$:	42
III.4.3	Influence de la température sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire à base de $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$:	44
III.4.4	Influence de la résistance R_s et R_{sh} sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire à base de $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$:	47
III.5	Optimisation un autre cellule pérovskite à base de $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$ avec un augmentation de concentration de Chlore (Cl) :	50
III.5.1	Structure de la cellule :	50
III.5.2	Effet de l'augmentation de Chlore (Cl) :	51
III.6	Comparaison :	55
III.7	Conclusion :	57
Conclusion générale.....		
Bibliographie.....		

Liste des figures, tableaux, et équations

Liste des figures

Chapitre I

Figure I-1: Une représentation schématique de l'effet photoélectrique.....	6
Figure I-2: Valeur des éclaircissements en fonction de la qualité du ciel	7
Figure I-3: Composantes du rayonnement solaire au sol.	8
Figure I-4: Distribution spectrale du rayonnement	9
Figure I-5: Une cellule photovoltaïque.....	9
Figure I-6: Les principaux Types de cellule.....	10
Figure I-7: Représentation conventionnelle des courbes $I=f(V)$ et $P=f(V)$	11
Figure I-8: Cellule solaire à base de silicium monocristallin.	13
Figure I-9: Cellule solaire à base de silicium poly cristallin.	14
Figure I-10: Cellule solaire au silicium amorphe.	15
Figure I-11: Cellule solaire organique.....	16
Figure I-12: Cellule solaire à pérovskite.	18
Figure I-13: L'Evolution historique des rendements record des cellules photovoltaïques selon leur type.	19
Figure I-14: Evolution des parts de marché des technologies photovoltaïques sur le marché	20
Figure II-1: Structure d'un cristal de pérovskite générique ABX_3	23
Figure II-2: classification du système de pérovskite.	24
Figure II-3: Représentations schématiques des structures cristallines, (a) de la pérovskite halogénée inorganique $CsPbBr_3$ (b), de la pérovskite halogénée hybride $MAPbBr_3$	25
Figure II-4: Spectres d'absorption de $CH_3NH_3PbI_3-xCl_x$	27
Figure II-5: Les quatre architectures les plus utilisés dans les cellules solaires à pérovskite, (a) mésoporeux, (b) couche de recouvrement, (c) n-i-p planaire et (d) p-i-n planaire.....	27
Figure II-6: Diagramme de transfert des électrons et les processus de recombinaison dans les cellules solaires à base de pérovskite.	29
Figure II-7: Structure moléculaire du Spiro-OMeTAD	31
Figure III-1: Structure 3D de cellule solaire a bas de pérovskite mixte ($CH_3NH_3PbI_3-xCl_x$).....	35
Figure III-2: schéma de diagramme de bande d'énergie	35
Figure III-3: Représentation de la variation de la densité de courant J en fonction de tension pour la couche $CH_3NH_3PbI_3$ à $T=300K$ ($27^\circ C$), $d=0.5\mu m$ et $E_g=1.5 eV$	37
Figure III-4: Représentation de la variation de la puissance P en fonction de tension pour la couche $CH_3NH_3PbI_3$ à $T=300K$ ($27^\circ C$), $d=0.5\mu m$ et $E_g=1.5 eV$	37
Figure III-5: Représentation de la variation de la Capacitance en fonction de la fréquence pour la couche $CH_3NH_3PbI_3$ à $T=300K$ ($27^\circ C$), $d=0.5\mu m$ et $E_g=1.5 eV$	38
Figure III-6: Représentation de la variation du Rendement Quantique externe en fonction de λ pour de la couche $CH_3NH_3PbI_3$ à $T=300K$ ($27^\circ C$) et $d=0.5\mu m$ et $E_g=1.5 eV$	38
Figure III-7: Représentation de la variation de la densité de courant J en fonction de tension pour différentes épaisseurs de la couche $CH_3NH_3PbI_3$ à $T=300K$ ($27^\circ C$).	39
Figure III-8: Représentation de la variation de la puissance P en fonction de tension pour différentes épaisseurs de la couche $CH_3NH_3PbI_3$ à $T=300K$ ($27^\circ C$).....	40
Figure III-9: Représentation de la variation du Facteur de forme (FF) et le rendement (η) en fonction de l'épaisseur de la couche $CH_3NH_3PbI_3$	40
Figure III-10: Représentation de la variation du la densité de courant J en fonction de la tension pour différentes énergies de gap de la couche $CH_3NH_3PbI_3$ à $T=300K$ ($27^\circ C$), $d_{CH_3NH_3PbI_3} = 0.5 \mu m$	42
Figure III-11: Représentation de la variation de la puissance P en fonction de tension pour différentes énergies de gap de la couche $CH_3NH_3PbI_3$ à $T=300K$ ($27^\circ C$), $d_{CH_3NH_3PbI_3} = 0.5 \mu m$	43
Figure III-12: Représentation de la Variation du Facteur de forme (FF) et Le rendement (η) en fonction de l'énergie de gap	43
Figure III-13: Représentation de la variation de la puissance en fonction de la tension à différentes épaisseurs de la couche $CH_3NH_3PbI_3$ avec $d_{CH_3NH_3PbI_3} = 0.5 \mu m$ et $E_g=1.5 eV$	45
Figure III-14: Représentation de la variation de la densité de courant J en fonction de la tension à différentes épaisseurs de la couche $CH_3NH_3PbI_3$, avec $d_{CH_3NH_3PbI_3} = 0.5 \mu m$ et $E_g=1.5 eV$	45
Figure III-15: La variation du Facteur de forme (FF) et du rendement (η) en fonction de la	

Liste des figures, tableaux, et équations

température.....	46
Figure III-16:Variation du Facteur de forme (FF) Le rendement (η) en fonction de R_s	47
FigureIII-17: Représentation de la variation du la densité de courant J en fonction de tension pour la couche $CH_3NH_3PbI_3$ pour déférence R_{sh}	48
Figure III-18: La Variation du Facteur de forme (FF) et Le rendement (η) en fonction de R_{sh}	49
Figure III-19:Structure 3D de cellule solaire a bas de pérovskite mixte ($CH_3NH_3PbI_{3-x}Cl_x$) [54]....	50
Figure III-20: La variation de énergie de gap en fonction de x.....	51
Figure III-21: La variation de permittivité en fonction de x.....	52
Figure III-22: La variation de la densité J en fonction de V pour plusieurs concentration x.....	52
Figure III-23: La figure présente la variation du EQE en fonction de Lambda pour plusieurs concentration.....	53
Figure III-24: Représente la variation du la puissance p en fonction de la tension pour différentes concentration X.....	53
Figure III-25: La variation de V_{oc} et J_{sc} en fonction de X.....	54
Figure III-26: La variation de FF et Eta en fonction de X.....	54
Figure III-27:La variation de la densité J en fonction de V avec et sans Cl.....	56
Figure III-28: La variation de P en fonction de V avec et sans Cl.....	56
Figure III-29: La variation de rendement Externe Quantique en fonction de Lambda avec et sans Cl.....	57

Liste des Tableaux

Tableau I-1: Les principaux types de cellules et leurs rendements.....	11
Tableau II-1:Propriétés de différente avance halogénure pérovskites.....	26
Tableau III-1: Montre les paramètres utilisés pour la simulation de cellule solaire en pérovskite mixte $CH_3NH_3PbI_3$	36
Tableau III-2: Les résultats de simulation pour une variation de l'épaisseur entre 0.3 et 0.8 μm	39
Tableau III-3: Les résultats de simulation pour une variation de l'énergie de gap entre 1.3 et 1.7eV.....	42
Tableau III-4: Les résultats de simulation des paramètres V_{oc} , J_{sc} , FF et Eta en fonction de la température.....	44
Tableau III-5: Les résultats de simulation des paramètres V_{oc} , J_{sc} , FF et Eta en pour une variation de resistance serie.....	47
TableauIII-6: Les résultats de simulation des paramètres V_{oc} , J_{sc} , FF et Eta pour une variation de resistance shunt.....	48
Tableau III-7:Montre les paramètres utilisés pour la simulation de cellule solaire en pérovskite mixte $CH_3NH_3PbI_{3-x}Cl_x$	50
Tableau III-8:les résultats de simulation avec lagmuntation de X.....	52
Tableau III-9: Comparaison entre les deux cellules.....	55

List des équations

$I_{ph} = qG(L + L_p)$	(I-1).....	12
$v_{oc} = K T q \ln(I_{cc} I_0 + 1)$	(I-2).....	12
$P_m = I_m \cdot V_m$	(I-3).....	12
$FF = pmvco \times I_{cc}$	(I-4).....	12
$Rendment = pmpin$	(I-5).....	12
$E_g = 1.521 + 0.269x + 0.873x^2$	(III-1).....	51
$E_s = 5.698 - 2.593x$	(III-2).....	52

Liste des symboles

Liste des symboles

E_C : L'énergie du bas de la bande de conduction.

E_V : L'énergie du haut de la bande valence est notée.

E_g : Energie de gap.

E : L'énergie d'un photon.

λ : Longueur d'onde.

I_{ph} : Photo-courant

T : Température effective de la cellule.

P_{max} : Puissance maximal fournie par la cellule.

V_{max} : Tension maximal fournie par la cellule.

I_{max} : Courant maximal fournie par la cellule.

n : La densité de l'électron libre.

p : La densité du trou libre.

K : la constante de Boltzmann

T : la température absolue du corps.

q : charge de l'électron

I_{ph} : photo-courant

I_0 : Courant de saturation de la diode.

Cl : Chlore

Abréviation

ETL : La couche de transport d'électron (The electron transport layer).

HTL : La couche de transport de trou

CdTe : Tellure de cadmium

CIS :Le sélénium de cuivre et indium.

FTO : l'oxyde d'étain dopé au fluor.

TiO₂ : Le dioxyde de titane.

Introduction Générale

Introduction générale

Afin de réduire la consommation mondiale de l'énergie fossile et de minimiser la pollution, la demande de production d'énergie propre et renouvelable a augmenté pour répondre aux futurs besoins énergétiques du monde [1]. Ainsi, les chercheurs essaient de produire une variété de sources d'énergie renouvelable, dont l'énergie photovoltaïque a reçu une grande attention considérable de la part de la communauté scientifique. Les cellules photovoltaïques se sont rapidement développées au cours des dernières décennies. En fait, le développement des nouvelles technologies de cellules solaires rentables et l'augmentation de production ont rendu cette réalisation possible. En revanche, la commercialisation de ces technologies a été bloquée à cause du coût élevé des modules photovoltaïques [2]. Même si les chercheurs ont amélioré au fil des années les performances, réduire le coût et augmenter la fiabilité des systèmes photovoltaïques qui restent une préoccupation majeure. La nécessité de développer des technologies efficaces, en particulier des technologies à couches minces, qui sont encore moins chères et rentables et englobent également des matériaux peu coûteux [2].

Les cellules solaires pérovskite ont aussi attiré l'attention des chercheurs et du monde en 2009 [3]. Lorsqu'une efficacité de conversion (23.3%) supérieure à celle du silicium a été atteinte [3], ainsi que pour leurs excellentes propriétés photovoltaïques et leur manipulation facile telles que la bande interdite directe et le coefficient d'absorption supérieur à 10^4cm^{-1} . Ainsi, Les cellules pérovskite à base de plomb suscitent un grand intérêt en raison de leurs méthodes de fabrication à faible coût et leur efficacité de conversion énergétique élevée [4]. Les composants de la cellule solaire pérovskite sont nécessairement deux couches, la couche de transport d'électron (ETL) et la couche de transport de trous (HTL). La conception et la simulation de ces couches de ce type de cellules solaires fait actuellement l'objet d'une attention croissante. En effet, l'utilisation d'outils de simulation joue un rôle important dans l'évaluation et l'optimisation de dispositifs électroniques et technologiques. Grâce à ces méthodes, nous pouvons réduire le temps et les coûts.

Notre travail consiste en une étude numérique sur l'évaluation des performances d'une cellule solaire pérovskite pour des différents matériaux avec (CI) et sans (CI). Premièrement, nous allons présenter une cellule sans (CI) et la simuler. Puis, une comparaison dans les paramètres technologiques est introduite. Deuxièmement, on va voir l'effet de l'épaisseur et l'énergie de gap et la température dans la couche d'absorption est traitée afin d'optimiser l'épaisseur et l'énergie de gap de ce matériau.

Introduction générale

La simulation des performances de ces cellules solaires a été effectuée à l'aide du logiciel SCAPS-1D.

Et après nous allons présenter un autre matériau avec (Cl) et applique même travail à ce matériau. Enfin en fait une comparaison entre les deux matériaux.

L'objectif de notre travail est principalement concentré sur l'évaluation et l'amélioration de l'efficacité énergétique d'une cellule solaire pérovskite à base de $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$.

Ce mémoire est divisé en trois chapitres.

- Premier chapitre : généralité sur les cellules photovoltaïques : nous présentons une introduction sur l'énergie solaire et le rayonnement ainsi que la description et l'évolution cellules photovoltaïques au fil du temps. Nous mentionnerons en particulier le développement technologique des différentes générations.
- Le deuxième chapitre : présente les cellules à base de matériaux pérovskite, leur propriétés (électrique, optique et la structure) , principe de fonctionnement d'une cellule pérovskite et leur architecture.
- Le troisième chapitre : comprend les résultats et les discussions de la simulation réalisée

Nous terminons ce travail par une conclusion générale.

Chapitre I: Généralité sur les cellules photovoltaïques

I.1 Introduction

L'augmentation du coût de l'énergie conventionnelle et la limitation de ses ressources d'une part, et faire du photovoltaïque l'option énergétique prometteuse avec de nombreux avantages sans pollution et disponible partout sur terre d'autre part. Actuellement, il y a un regain d'intérêt pour les installations qui utilisent l'énergie solaire, particulièrement utile pour les applications sur sites isolés.

La conversion photovoltaïque est l'une des façons les plus intéressantes d'utiliser l'énergie solaire. Il permet d'utiliser l'appareil pour obtenir de l'électricité directement et de manière autonome avec durée de vie fiable et relativement longue, réduisant la maintenance.

Les systèmes photovoltaïques sont conçus pour utiliser la conversion directe de l'énergie solaire. La demande d'énergie électrique de l'utilisateur est satisfaite par l'effet photovoltaïque.

I.2 Historique

L'histoire du PV débute en 1839 lorsque le physicien français 'Antoine César Becquerel' découvre le principe photovoltaïque (C'est son petit-fils, 'Antoine Henri Becquerel' qui découvrira la radioactivité). L'effet photovoltaïque en tant que tel a été découvert en 1887 par le physicien 'Allemand Heinrich Rudolf Hertz'. C'est 'Albert Einstein' qui est le premier à pu expliquer le principe photovoltaïque avec le prix Nobel de physique en 1921.

En 1955, des chercheurs américains (Chapin, Fuller, Pearson et Prince) travaillant pour les laboratoires Bell Téléphone (devenus aujourd'hui Alcatel-Lucent Bell Labs) développent une cellule photovoltaïque à haut rendement de 6 %. Les Américains lancent en 1959 le satellite Vanguard qui est alimenté par des piles photovoltaïques ayant un rendement de 9% [3]. La première maison avec une installation photovoltaïque voit le jour en 1973 à l'université de Delaware aux Etats-Unis d'Amérique. C'est en 1983 que la première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt 4000 kilomètres en Australie. Aujourd'hui, Dans le monde des semi-conducteurs, Des rendements de conversion autour de 25.7 % ont été atteints par de telle cellule au spectre AM1.5 [5]

Chapitre I: Généralité sur les cellules photovoltaïques

I.3 L'effet photovoltaïque

Une installation solaire photovoltaïque fonctionne sur un principe relativement simple : elle convertit le rayonnement solaire en électricité.

Cette opération est basée sur un phénomène physique appelé l'effet photovoltaïque. Ce mécanisme a été découvert par Antoine Becquerel en 1839, mais n'a été expliqué que près d'un siècle plus tard par Albert Einstein, qui lui a valu le prix Nobel de physique en 1921. Très schématiquement, l'effet photovoltaïque permet à certains matériaux d'émettre des électrons lorsqu'ils sont exposés à la lumière. Les cellules photovoltaïques sont constituées d'un de ces matériaux (généralement du silicium) et sont conçues de manière à ce que les électrons émis soient recyclés pour former un courant électrique. Les batteries sont assemblées pour générer un courant suffisamment élevé pour être utilisées, et ces ensembles de batteries sont appelés modules photovoltaïques ou, plus communément, panneaux solaires [6].

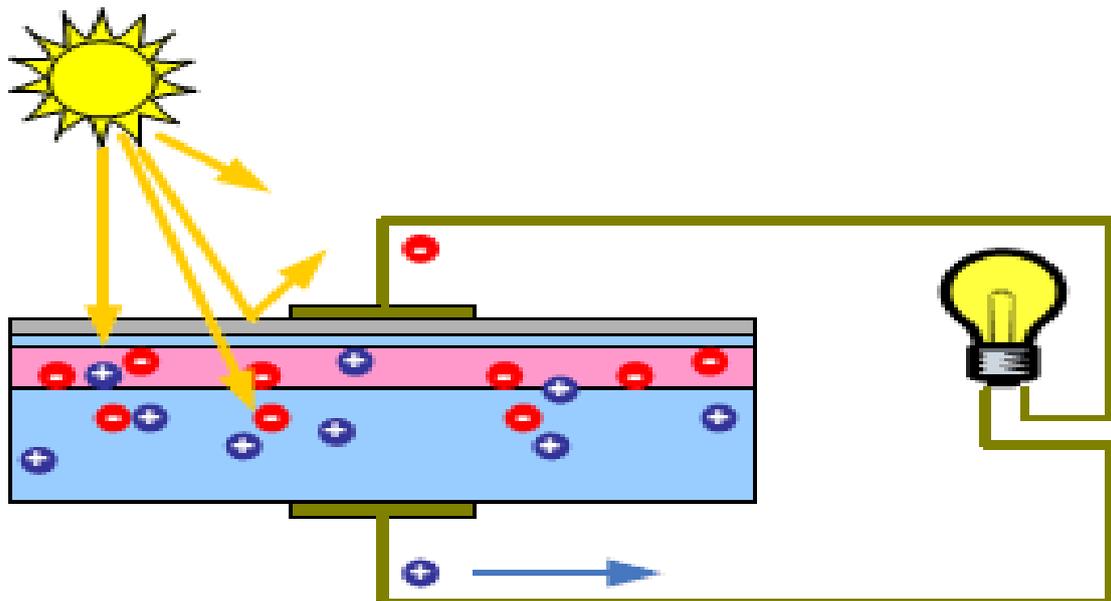


Figure I-1: Une représentation schématique de l'effet photoélectrique [6].

I.4 Energie solaire

I.4.1 Eclaircissements solaires

L'éclairement correspond à la puissance solaire reçue par une surface plane élémentaire, On distingue l'éclairement dû aux rayons solaires directs et celui dû au rayonnement solaire diffusé par le ciel ou réfléchi par une surface (le sol, un mur ...). La figure (2) montre l'intensité des éclaircissements en fonction de la qualité du ciel [7].

I.4.2 Rayonnement solaire

Le soleil est une étoile. Sa température à la surface est estimée à environ 5800K, la distance entre le soleil et la terre est d'environ 149 597 890km [7]. Le soleil émet une énorme quantité d'énergie radiante qui est le rayonnement solaire. Il existe trois types [7] :

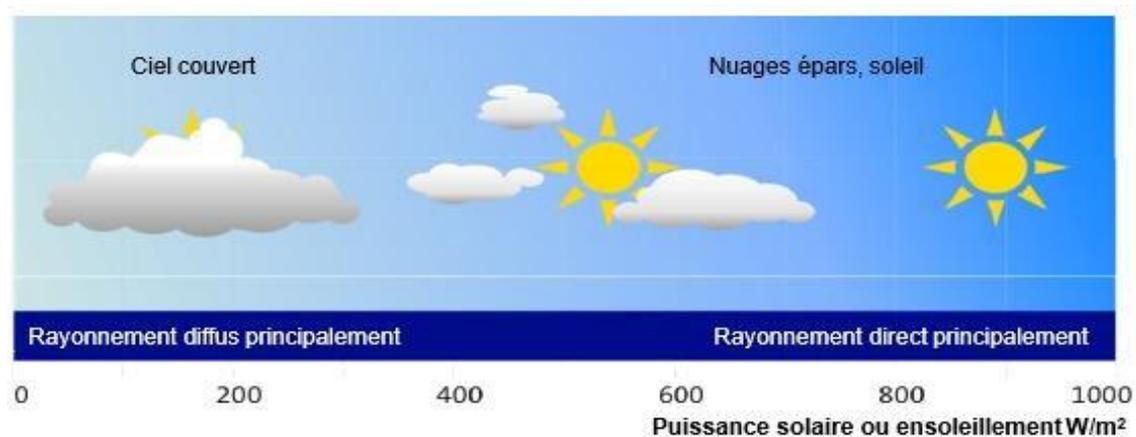


Figure 1-2: Valeur des éclaircissements en fonction de la qualité du ciel [7].

I.4.2.1 Type de rayonnement solaire

En fonction du type du rayonnement solaire et de la technique utilisée, l'énergie solaire peut permettre de produire de la chaleur ou de l'électricité. On distingue 3 types de rayonnement solaire :

I.4.2.1.a Rayonnement direct

Reçu directement du soleil, ce sont les rayons UV. Il à une trajectoire linéaire (il y a en effet, de légères déviations) C'est ce type de rayonnement qui est utilisé dans les systèmes à concentration.

Chapitre I: Généralité sur les cellules photovoltaïques

I.4.2.1.b Rayonnement diffus

Ce sont des rayons qui proviennent de toute la voûte céleste. Des rayons lumineux issus du soleil traversent les nuages et se diffusent sur toute la surface de la terre. Il contribue à l'éclairage mais ne peut pas être concentré à l'inverse du rayonnement direct.

I.4.2.1.c Rayonnement réfléchi

C'est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Ce rayonnement dépend de l'albédo du sol et il peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).

I.4.2.1.d Rayonnement global

C'est l'ensemble des trois précédents rayonnements (direct, diffus et réfléchi), voir figure (3), C'est celui-ci qui est utilisé pour faire fonctionner les panneaux solaires thermiques et photovoltaïques [7].

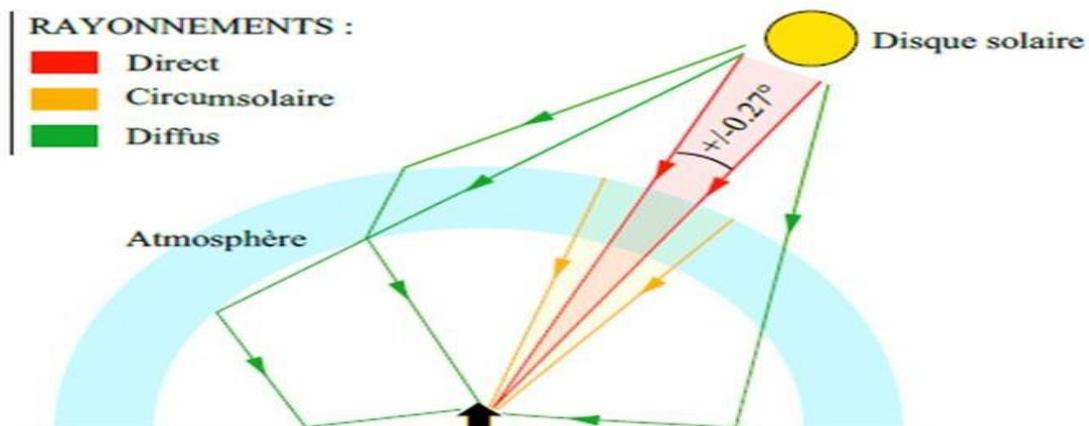


Figure I-3: Composantes du rayonnement solaire au sol [7].

I.4.3 Distribution Spectrale du rayonnement

Le soleil nous envoie de l'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique dont la longueur d'onde varie de 0,22 à 10 μm . La figure (4) représente la variation de la répartition spectrale de ce rayonnement. Sur ce graphe on constate que pour $\lambda \leq 0,3 \mu\text{m}$ le rayonnement est négligeable alors que pour la partie visible du rayonnement, pour des valeurs entre 0,3 et 0,7 μm l'absorption par l'atmosphère est faible [8].

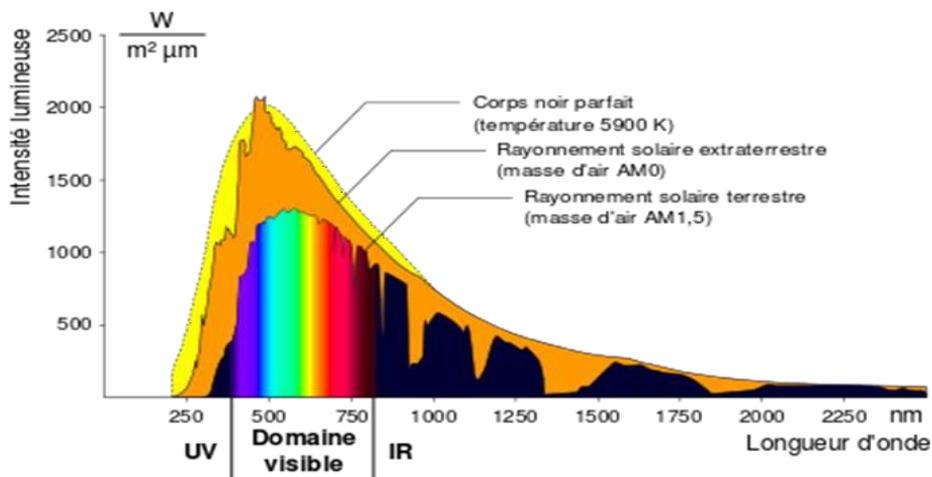


Figure I-4: Distribution spectrale du rayonnement [8].

I.5 Cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque, également appelée cellule solaire, est un composant électronique qui, lorsqu'il est exposé à la lumière (photons), génère de l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque. La puissance obtenue est proportionnelle à la puissance lumineuse incidente et dépend du rendement de la cellule. Une fois connecté à un circuit (généralement un onduleur, parfois une simple batterie), il fournit une tension et un courant continu à travers celui-ci.



Figure I-5: Une cellule photovoltaïque

Il existe plusieurs types de cellules PV, mais les technologies à base de silicium constituent plus de 90% du marché photovoltaïque mondial. On distingue trois catégories des cellules PV fabriquées à partir du silicium figure (6):



Figure I-6: Les principaux Types de cellule.

I.5.1 Cellules monocristallines

Chaque couche est découpée dans un monocristal de silicium. Ce type de cellule dispose d'un très bon rendement et pouvoir de conversion mais de coût cher.

I.5.2 Cellules poly-cristallines

Ce sont des cellules de bon rendement aussi mais légèrement inférieur à celui des cellules monocristallines, ce qui justifie leur coût amoindri.

I.5.3 Cellules amorphes

Ce type de cellules ne possède pas de structures cristallines. Elles présentent l'avantage d'être intégrées sur des supports souples et rigides. Elles sont souvent utilisées dans des appareils portables, calculatrices, montres, etc.

Récemment, une nouvelle génération de cellules PV est apparue, il s'agit des cellules à couche mince sous formes de films fins, elles possèdent une très grande efficacité de conversion énergétique et un bon rendement. Les cellules à couche mince peuvent être construites sur un substrat flexible.

Les cellules monocristallines et poly-cristallines sont les deux types de cellules PV les plus répandus sur le marché photovoltaïque.

Chapitre I: Généralité sur les cellules photovoltaïques

Tableau I-1: Les principaux types de cellules et leurs rendements

Technologie	Rendement de la cellule (laboratoire)	Rendement de la cellule (application)	Rendement du module (production)
Mono cristallin	24.7	21.5	16.5
Poly cristallin	20.3	16.5	14.2
Couche mince Amorphe	13	10.5	7.5

I.6 Paramètres d'une cellule photovoltaïque

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

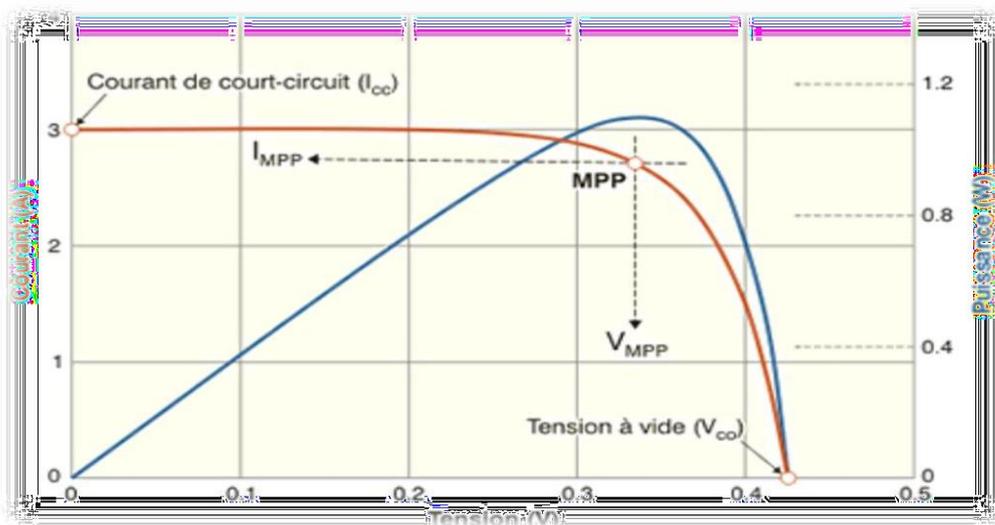


Figure I-7: Représentation conventionnelle des courbes $I=f(V)$ et $P=f(V)$ [33].

Les trois grandeurs physiques qui définissent cette courbe sont :

V_{co} : Tension en circuit ouvert, cette valeur représente la tension générée par une cellule éclairée non raccordée.

I_{cc} : Courant court-circuit, cette valeur représente le courant généré par une cellule éclairée raccordée à elle-même.

Son point de puissance maximal : MPP (en anglais : *maximal power point*) obtenu pour une tension et un courant optimal : V_{opt} , I_{opt} [33].

Ces paramètres sont définis par :

Chapitre I: Généralité sur les cellules photovoltaïques

- **Courant de court-circuit I_{cc}** : le courant de court-circuit est la valeur maximale du courant lorsque sa tension est égale à zéro ($V=0$). Il augmente généralement avec l'intensité d'illumination et dépend de : la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement incident, de la mobilité des porteurs et de la température.

$$I_{ph} = qG(L_n + L_p) \quad (I-1)$$

- **Tension à circuit-ouvert V_{co}** : la tension à 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'éclairement de la cellule.

$$v_{oc} = \frac{KT}{q} \ln\left(\frac{I_{cc}}{I_0} + 1\right) \quad (I-2)$$

K : la constante de Boltzmann

T : la température absolue du corps.

q : charge de l'électron

I_{ph} : photo-courant

I_0 : Courant de saturation de la diode.

- **Puissance maximale P_m** : le point de fonctionnement est imposé par la résistance de charge et non par la cellule elle-même. Un choix judicieux de la résistance de charge permettra donc d'obtenir la puissance maximale

$$P_m = I_m \cdot V_m \quad (I-3)$$

- **Facteur de forme FF** : il détermine la qualité électrique de la cellule, il est déterminé par l'équation suivante

$$FF = \frac{P_m}{v_{co} \times I_{cc}} \quad (I-4)$$

- **Le rendement η** : il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule P_m et la puissance lumineuse incidente P_{in} :

$$\text{Rendement} = \frac{P_m}{P_{in}} \quad (I-5)$$

I.7 Les différentes générations photovoltaïques

On peut classer ces principales technologies en trois générations, le but de la nouvelle génération est d'avoir des solutions pour les inconvénients de l'ancienne génération qui

Chapitre I: Généralité sur les cellules photovoltaïques

l'a précédée tel que la première génération basée sur des matériaux abondant sur terre mais avec un coût de fabrication élevé. La deuxième génération basée sur des technologies avec des coûts modérés mais présentant des rendements faibles par rapport à la génération précédente, ainsi elle utilise des matériaux toxiques. Tandis que la troisième génération motivée par la recherche des matériaux sans nocivité sur impact sur la santé humaine et l'environnement, abondants avec de faibles coûts et un rendement plus élevé. Cette technologie est encore au stade de la recherche.

I.7.1 Les cellules photovoltaïques de la première génération

➤ Silicium monocristallin :

Ce type de cellule est le plus utilisé Grâce à l'élément clés, le silicium est le plus abondant dans la croute terrestre après l'oxygène, il a l'avantage de pouvoir être produit à partir d'une ressource naturelle quasi inépuisable, la silice, un composant de granit, desables et des grès [9]. Le silicium monocristallin ou mono Si est obtenu parla méthode de « Gzochralski » en faisant fondre du silicium dans un creuset [10].



Figure I-8: Cellule solaire à base de silicium monocristallin[11].

Les avantages :

- Haut rendement 18% et 27% en laboratoire.
- Duré de vie 25 ans
- Très rentable.

Les inconvénients :

- Le coût est trop élevé.
- Il faut beaucoup d'énergie et d'effort pour obtenir un cristal pur.

Chapitre I: Généralité sur les cellules photovoltaïques

➤ **Silicium poly cristallin :**

Le silicium polycristallin, ou poly-Si est une forme particulière du silicium, qui se différencie du silicium monocristallin. Contrairement au mono Si qui est composé d'un seul cristal, le silicium polycristallin est constitué de multiples petits cristaux de tailles et de formes variées, qui lui confèrent des propriétés différentes [12], [13].

Caractéristiques [13]:

- Le coût de production est plus bas.
- Nécessite moins d'énergie.
- Le rendement entre 13% et 20%.



Figure I-9: Cellule solaire à base de silicium poly cristallin[14].

I.7.2 Les cellules photovoltaïques de la deuxième génération

➤ **Silicium amorphe :**

On obtient en évaporant du gaz silicium sur support en verre plastique souple ou métal [15]. Ces cellules sont apparues en 1976, elle est de couleur gris foncé. Les cellules de silicium amorphes, ses atomes sont turbulents, elle absorbe donc plus de lumière que les cellules monocristallines. Elles sont utilisées dans les petites machines comme les calculatrices et les montres.



Figure I-10: Cellule solaire au silicium amorphe[16].

Les avantages :

- Ce type de silicium est moins coûteux à fabriquer.
- Absorbe les rayons du soleil même les jours nuageux.
- Rentable.

Les inconvénients :

- Son rendement est faible entre 8% et 10,7%.
- Ses performances diminuent dans le temps.

➤ **Tellure de cadmium (CdTe) :**

Tellure de cadmium est un semi-conducteur de type P qui a besoin d'un autre matériau de type N (CdS ,SnO₂....) pour créer une jonction p-n [17].Il a été étudié en 1960 et développé en 1972 [18].

Les cellules solaires CdS/CdTe sont produites en évaporant une fine couche de CdS sur une couche de verre conducteur suivie d'une autre évaporation d'une couche épaisse de CdTe. Ensuite, la cellule est traitée pendant une courte période à 450°C [19].

Les avantages :

- Son rendement élevé est de 22.1% en 2015 [20].
- Le coefficient d'absorption est élevé.
- La bande interdite est parfaite 1.45eV [19].

Chapitre I: Généralité sur les cellules photovoltaïques

Les inconvénients :

- Toxique, pollué
- rareté du tellure.
- Sensibilité à la vapeur d'eau.

➤ Le sélénure de cuivre et indium (CIS ou CIGS) :

Le CIGS est un semi-conducteur. Il a besoin d'un matériau de type N pour créer une jonction p-n. Les cellules CIGS de type hétérojonction, il contient un absorbant fait de cuivre, de gallium, d'indium et de sélénium, il a été réalisé en 1975 par « S. Wagner et coll de Bell Téléphone » [21].

Les avantages :

- La bande interdite est jusqu'à 1.6eV donc une capacité d'absorption élevée.
- Le rendement de 23.4% en 2019 [22].

L'inconvénient :

- La rareté de gallium et de l'indium.
- Il faut beaucoup d'espace pour réaliser une bonne production.

1.7.3 Les cellules photovoltaïques de troisième génération :

➤ La filière des cellules organiques :

Les cellules organiques sont constituées d'un semi-conducteur organique. Il a été développé en 1970 afin de réduire le coût de l'électricité photovoltaïque [23].



Figure I-11: Cellule solaire organique [23].

Chapitre I: Généralité sur les cellules photovoltaïques

Les avantages :

- Le coût est faible.
- Abondance de matériaux utilisés.
- Facilité d'utilisation.
- Appareils flexibles.
- Le rendement de conversion est d'environ de 20% [24].

Les inconvénients :

- Sa croissance ralentit car elle est amorphe entraînant une diminution de la production.
- Durée de vie est faible.

➤ La filière des pérovskites :

Les premières cellules de pérovskites ont été décrites en 1839 par Gustave Rose [25]. Son nom provient du minéralogiste russe Lev Aleksevich von Perovski. Il était composé de calcium et de titane sa formule chimique CaTiO_3 [26]. Les cellules pérovskites utilisent des semi-conducteurs de type P inorganiques et organiques. Ce type de cellule se compose d'un substrat en verre FTO sur lequel est déposé l'oxyde d'étain dopé au fluor FTO, et sur FTO est déposé le dioxyde de titane TiO_2 . Pour améliorer le transport des trous, une couche de spiro-OMeTAD est déposée entre l'électrode en Or et la couche active [27].

Des semi-conducteurs organiques peuvent être utilisés $(\text{CH}_3\text{NH}_3)\text{PbX}_3$ et le X peut être (I, Br, Cl) [28]. Les cellules pérovskites sont devenues une rivale des cellules silicium et peut les remplacer. Il a pris une grande importance en raison du coefficient d'absorption et du mouvement de porteur de charge élevé, du faible coût de fabrication et son rendement est atteint environ 29% [29] après 2.2% en 2006.

Cependant il reste quelques problèmes qui entravent son développement car il n'est pas très durable, l'humidité et la température le font se décomposer [30], la durée de vie des cellules est très courte par rapport aux cellules en silicium [31].



Figure I-12: Cellule solaire à pérovskite [32].

I.8 Perspective d'évolution des différentes technologies photovoltaïques

La grande diversité de technologies photovoltaïques est l'objet d'une intense activité de développement.

Certaines, telles celles du silicium cristallin, sont anciennes. D'autres, telles les cellules organiques à base de pérovskites ont été introduites ou découvertes récemment. Pour chaque technologie (Figure (13)) des progrès sont constants y compris pour les cellules les plus anciennes dont les rendements record obtenus en laboratoire continuent à s'élever. On peut le constater sur le graphique du site du laboratoire américain NREL.

On y constate que les progrès sont en général incrémentaux et que les nouvelles technologies, même si elles peuvent progresser assez rapidement, ne supplantent pas les plus anciennes.

Ces dernières technologies s'approchent de leur rendement théorique maximum (30% pour les cellules à une seule jonction). Seules les technologies multi-jonction, et uniquement celles à base de matériaux III-V, dépassent la barre des 30%. Leur exploitation industrielle dépend donc d'autres facteurs que le rendement comme la maturité des technologies de mise en œuvre, le coût de fabrication ou la stabilité des cellules dans le temps[33].

Chapitre I: Généralité sur les cellules photovoltaïques

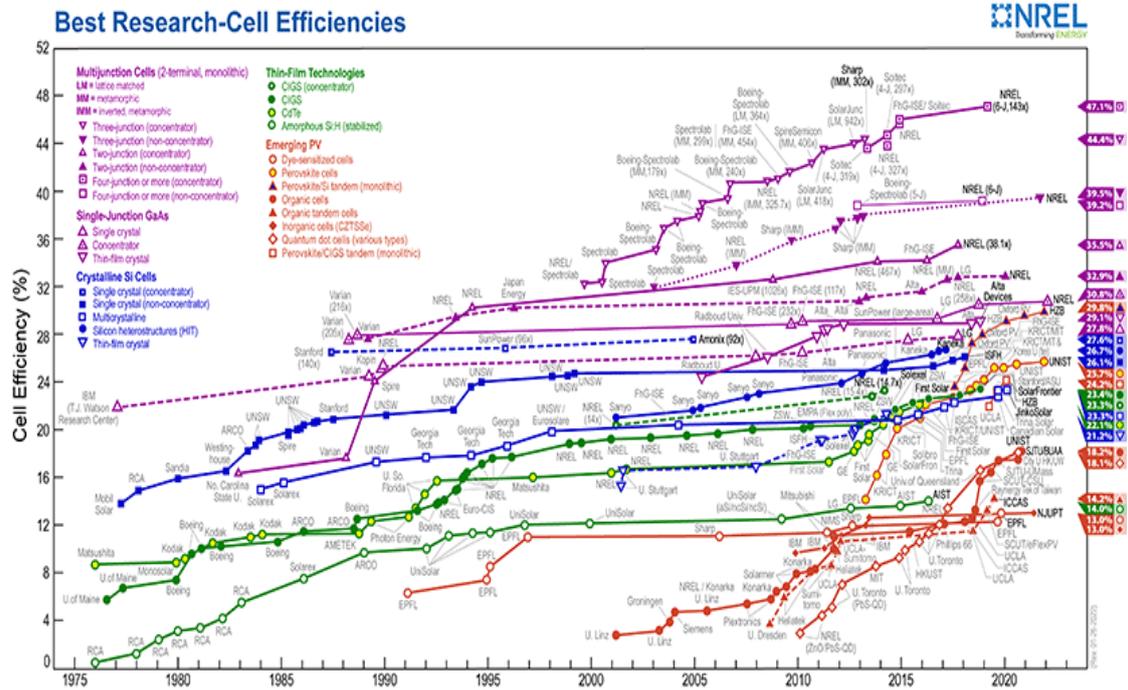


Figure I-13: L'Evolution historique des rendements record des cellules photovoltaïques selon leur type[33].

Du point de vue industriel et commercial, force est de constater l'extrême résilience du silicium cristallin (Figure(14)). Sur presque quatre décennies, sa part est restée très élevée (jamais en dessous de 70%) alors que le marché a progressé d'un facteur proche de 100 et continue d'augmenter. Ce constat révèle la difficulté de supplanter une technologie désormais mise en œuvre à très large échelle, à très bas coûts et à base de produits très durables.

La part du silicium multicristallin (polycristallin) a constamment augmenté en raison de son faible coût au Watt crête et de son rendement assez élevé. On assiste depuis peu à une progression du silicium monocristallin qui s'explique par la réduction de la part du coût des cellules dans le coût global des systèmes ce qui favorise les technologies ayant un meilleur rendement. À l'examen de l'évolution de la part de marché des couches minces, on constate la quasi-disparition du silicium amorphe hydrogéné et la montée en puissance du CIGS au détriment du CdTe. Là encore c'est le meilleur rendement de conversion du CIGS par rapport aux deux autres qui explique qu'il résiste mieux que le CdTe et le silicium amorphe dans leurs concurrences avec le silicium cristallin. On doit enfin signaler que la part des modules à base de matériaux organiques reste quasi négligeable à ce jour.

Chapitre I: Généralité sur les cellules photovoltaïques

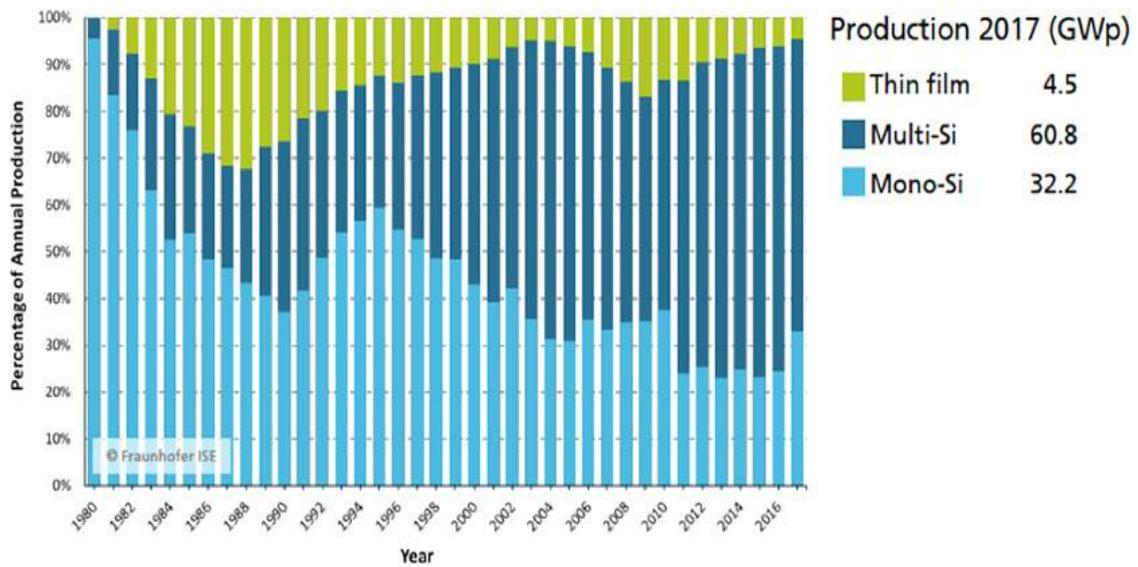


Figure I-14: Evolution des parts de marché des technologies photovoltaïques sur le marché

Npta : couches minces en vert,

Silicium multicristallin en bleu foncé

Et silicium monocristallin en bleu clair

I.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons défini les notions fondamentales sur l'effet photovoltaïque. Dans un premier temps, nous avons donné une description du fonctionnement de la cellule solaire en décrivant les différents paramètres de cette dernière. Enfin nous avons donné un aperçu sur l'évolution des cellules solaires en présentant ces différentes générations.

Chapitre II: Les cellules solaires à base de matériaux pérovskites

II.1 Introduction

Dans le but de développer des systèmes photovoltaïques économiques alternatifs aux cellules solaires en silicium, les cellules solaires à base de pérovskite ont suscité ces dernières années un intérêt considérable. Dans ces cellules solaires la couche de collecte de lumière est un matériau pérovskite présentant des propriétés optoélectroniques remarquables. Aujourd'hui l'efficacité de ces cellules solaires a atteint des niveaux élevés, dépassant les efficacités de nombreuses cellules photovoltaïques commerciales, telles que les cellules solaires à silicium organique et amorphe. Ce chapitre, est consacré aux cellules solaires pérovskites, nous présenterons d'abord les pérovskites hybrides, Propriétés structurales des pérovskites et les propriétés électrique et optique de la couche absorbante, puis nous allons présenter Architecture de ces cellules. Enfin, nous expliquerons les principes de fonctionnement des cellules solaires pérovskite.

II.2 Les pérovskites

Véritables stars des conférences d'optoélectronique depuis déjà 5 ans, les pérovskites hybrides apparaissent comme une nouvelle classe de semi-conducteurs qui montrent des performances exceptionnelles, donnant l'espoir de produire des dispositifs photoniques efficaces à faible coût et flexibles. Le matériau ayant émergé il y a peu, ses déclinaisons chimiques, sa qualité cristalline et ses propriétés photo-physiques représentent un grand champ d'investigation pour les physiciens et les chimistes.

2012 marque la naissance de la filière des pérovskites hybrides dans le monde du photovoltaïque, avec un premier point officiellement reporté dans le fameux diagramme NREL (National Renewable Energy Laboratory, USA) qui certifie les records de rendement de toutes les filières photovoltaïques en fonction du temps [34]. Des filières les plus anciennes est celle du silicium (fin des années 1970), matériau inorganique, la plus récente était jusqu'alors basée sur des matériaux organiques (début des années 2000).

L'avènement d'une nouvelle filière n'est donc pas chose fréquente. D'autant plus que le développement des pérovskites hybrides en tant que semi-conducteurs pour le photovoltaïque a été fulgurant : la toute première insertion d'une pérovskite hybride comme matériau absorbeur dans une cellule solaire a eu lieu en 2009, avec un

rendement de 3,9%; en 2016 les records de rendement atteignent 22%, frôlant en peu de temps les rendements record de la filière silicium. Une ascension aussi spectaculaire dans le domaine des matériaux est tout à fait inédite [35]. Les progrès réalisés dans le contexte du photovoltaïque, notamment les améliorations impressionnantes de la qualité cristalline des couches actives, ont eu des répercussions dans le domaine de l'émission de lumière. Dès 2014, il s'avère que ce même matériau présente aussi des propriétés d'émission particulièrement prometteuses pour la réalisation de sources de lumière telles que des diodes électroluminescentes et des lasers. Ce domaine est actuellement aussi en pleine explosion.

II.2.1 Propriétés structurales des pérovskites

Le terme « pérovskite » désigne à l'origine le minéral naturel CaTiO_3 (titanate de calcium) qui a été découvert pour la première fois en 1839 par le minéralogiste russe L.A. Perovski. Aujourd'hui la pérovskite est devenue le nom générique des cristaux ABX_3 possédant la même structure mère. La formule ABX_3 fait références à des structures tridimensionnelles (3D) de symétrie cubique figure 15. 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 [34]. Cette famille structurale est importante en termes de diversité.

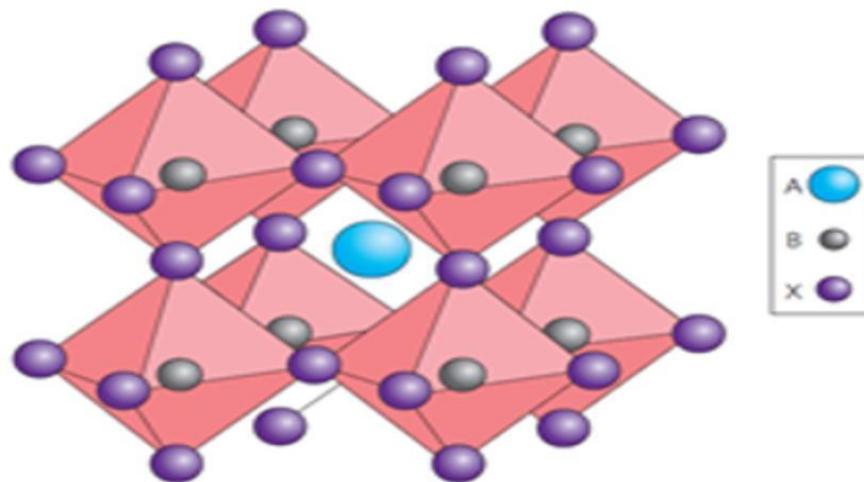


Figure II-1: Structure d'un cristal de pérovskite générique ABX_3 [34].

De composition et d'abondance. Les statistiques ont montré que plus de 50% du volume terrestre est composé de minéraux pérovskites.

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 représenté 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 ($CH_3NH_3I^+$ = MA) ou le Formamidinium ($HC[NH_2]^{2+}$ =FA) (cas des matériaux hybrides) [37], [38].

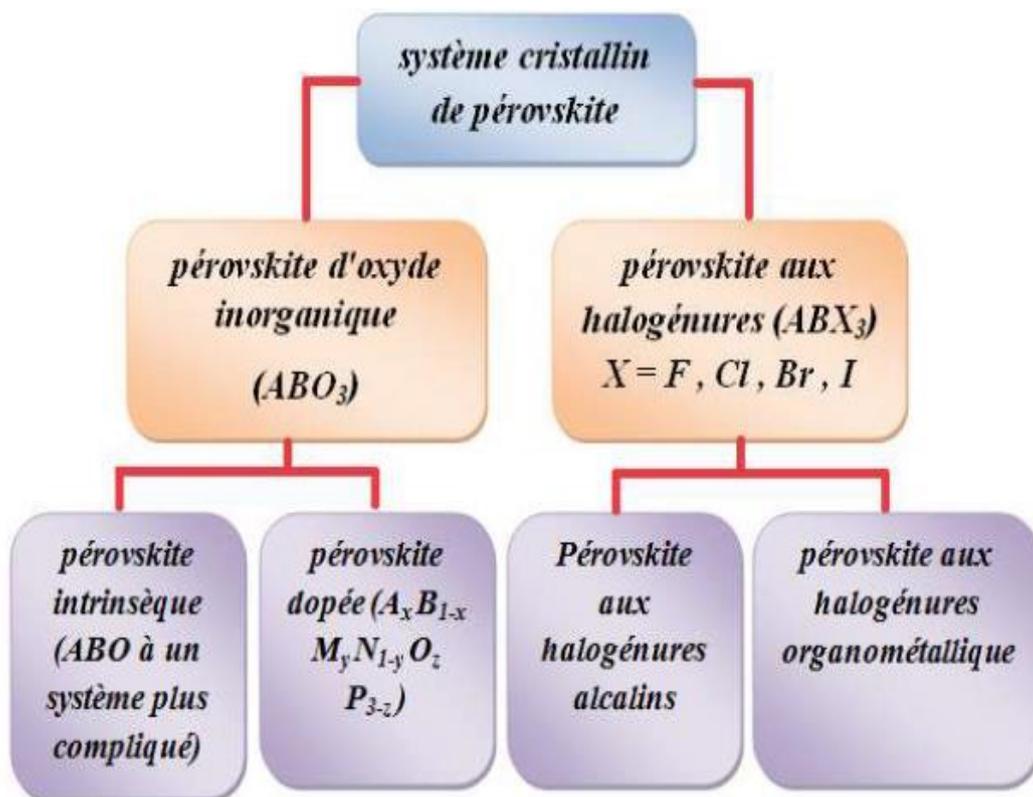


Figure II-2:classification du système de pérovskite [35].

Les pérovskites hybrides halogénées sont celles qui attirent la plus grande attention dans le domaine du photovoltaïque depuis quelques années étant donné les hautes performances en cellules qu'elles ont permis d'atteindre.

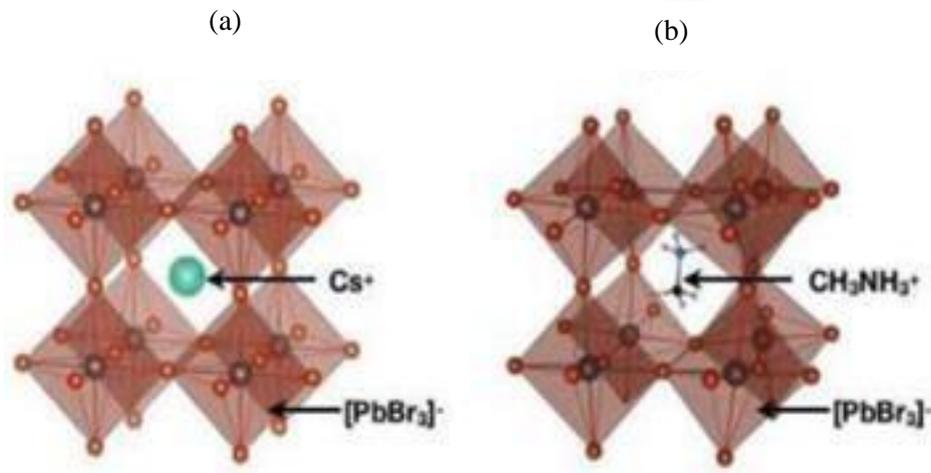


Figure II-3: Représentations schématiques des structures cristallines, (a) de la pérovskite halogénée inorganique CsPbBr_3 (b), de la pérovskite halogénée hybride MAPbBr_3 [38].

II.2.2 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 [39, 40]. 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 [41]. Les propriétés électroniques des pérovskites sont régies par la liaison B-X de la composante inorganique alors que la nature cation A ne contribue pas directement à la modification de ces propriétés [42, 43]. 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 [44].

II.2.3 Propriétés optiques

Les pérovskites hybrides sont caractérisées par un gap direct et un coefficient d'absorption élevé. Le coefficient d'absorption de la pérovskite iodée MAPbI_3 est estimé à $1.5 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-1}$ à 550 nm, valeur similaire à celle des matériaux habituellement

utilisés dans le photovoltaïque (GaAs, CdTe et CIGS) pour lesquels le coefficient d'absorption est compris entre 10^4 et 10^5 cm^{-1} [41]. La pérovskite MAPbI₃ est caractérisée par un gap compris entre 1.50 et 1.55 eV [41], bien placé dans le cadre d'applications photovoltaïques [40]. Le gap du matériau évolue avec sa composition, celui-ci décroît avec l'électronégativité des anions [45, 46] ainsi qu'avec la différence d'électronégativité entre le cation métallique et l'anion. L'ajout de l'halogène Br permet par exemple d'élever la bande conduction (BC) et d'abaisser la bande de valence (BV). Le gap pour CH₃NH₃PbBr₃ est alors estimé à 2.2 eV [45, 40]. Une structure de pérovskite mixte composée d'iode et de brome ou de brome et de chlore possède un gap qui peut varier de manière continue en ajustant le rapport des deux halogènes permettant ainsi une absorption sur tout le spectre solaire [45,46]. Néanmoins, dans le cas de la pérovskite mixte I-Cl, il est moins évident de moduler l'énergie de la bande interdite -du fait de la difficulté à incorporer le chlore Cl dans l'octaèdre formé par PbI₆ [45].

- Ce tableau suivant donne les propriétés de référence halogénure de pérovskite

Tableau II-1: Propriétés de différente avance halogénure pérovskites. [39]

Composition	E _g (eV)	Structure à temperature ambient	Longueur De diffusion	CBM (eV)	VBM(eV)
CH ₃ NH ₃ PbI ₃	1.5–1.61	Tetragonal	L _{D,e} > 0.1 μm L _{D,h} > 0.1 μm	-3.93	-5.3
CH ₃ NH ₃ PbBr ₃	2.32	Cubique	...	-3.36	-5.58
CH ₃ NH ₃ PbCl ₃	3.1	Cubique
CH ₃ NH ₃ PbI _{3-x} Cl _x	1.55–1.64	Tetragonal	L _{D,e} 1.9 μm L _{D,h} 1.2 μm	-3.75	-5.43
CH ₃ NH ₃ PbI _{3-x} Br _x	1.5–2.32	Tetragonal/cubique, rotation x ~ 0.2
HC(NH ₂) ₂ PbI ₃	1.47	Tetragonal	L _{D,e} 0.2 μm L _{D,h} 0.8 μm	-4.2	-5.7
HC(NH ₂) ₂ PbBr ₃	2.23	Cubique

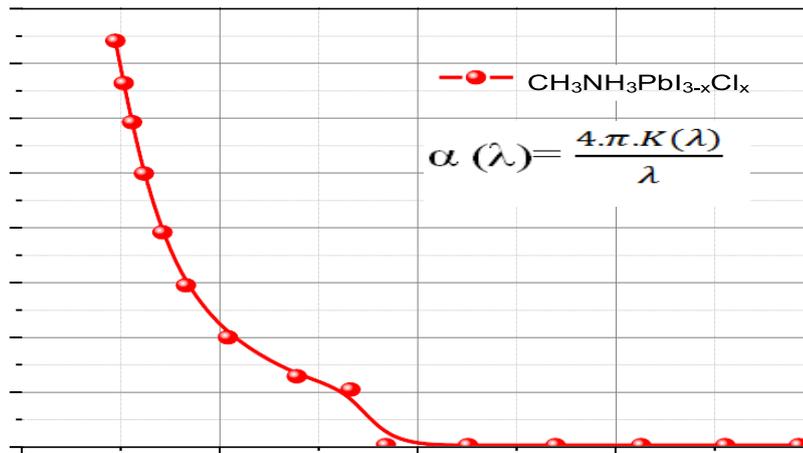


Figure II-4: Spectres d'absorption de $CH_3NH_3PbI_{3-x}Cl_x$ [40]

II.3 Architecture des cellules Pérovskites :

Il existe quatre architectures principales utilisées dans la conception et la fabrication de cellules solaires à base de pérovskite avec des performances différentes. Ces architectures sont appelées mésoporeux, couche de recouvrement, n-i-p planaire et p-i-n planaire, comme illustrée sur la Figure () Pour la modélisation et la simulation numérique, il sera préférable d'utiliser la configuration d'une cellule solaire à couche mince type p-i-n ou n-i-p planaire à hétérojonction [47].

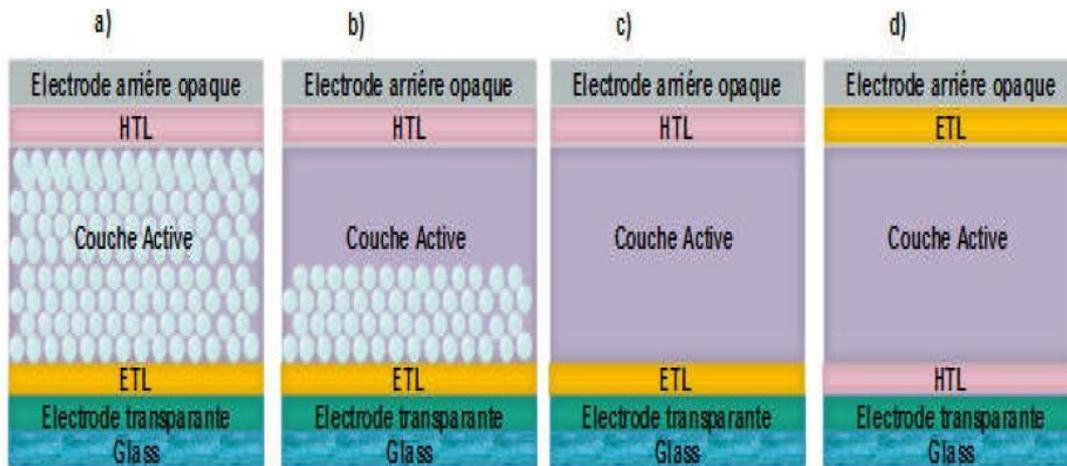


Figure II-5: Les quatre architectures les plus utilisées dans les cellules solaires à pérovskite, (a) mésoporeux, (b) couche de recouvrement, (c) n-i-p planaire et (d) p-i-n planaire. [47]

La Figure (a) présente une structure mésoporeuse, dans cette architecture une couche compacte de transport d'électrons (ETL) généralement du TiO_2 est déposée sur un substrat de verre et sur l'électrode transparente. Cette structure mésoscopique poreuse

est ensuite remplie de la couche active de pérovskite sur laquelle repose la couche de transport de trous solides (HTL), et un contact arrière opaque (généralement de l'or (Au)). Dans cette configuration, la pérovskite n'a pas besoin de l'interface ETL/pérovskite pour séparer les excitons photo-générés en charges libres. Le matériau à base de pérovskite est donc capable de transporter efficacement les charges ambipolaires. Pour l'architecture mésoporeuse à couche de recouvrement, l'épaisseur de la structure méso-scopique est réduite de manière significative et une couche de recouvrement (capping-layer) de pérovskite pure est créée sur le dessus Figure (b) .

En excluant complètement la structure mésoporeuse, une structure n-i-p planaire se forme sans nécessité d'étape de frittage à haute température (Figure (c)). L'architecture p-i-n planaire est réalisée en déposant la couche HTL sur le substrat en verre transparent recouvert par l'électrode. Ensuite, la couche de pérovskite est déposée, suivie du dépôt de l'ETL et d'un contact arrière opaque (de l'aluminium (Al) ou de l'argent (Ag)) (Figure (d)).

II.4 Principe de fonctionnement de la cellule solaire à base de pérovskite

Dans une cellule pérovskite la couche active est prise en sandwich entre une couche de type p, également appelée HTM (Hole Transport Material), et une couche de type n appelée ETL (Electron Transport Layer), créant ainsi une configuration p-i-n. Le succès de la pérovskite en tant qu'absorbeur solaire dépend en grande partie de la longue longueur de diffusion des charges et des mobilités élevées des porteurs dans le milieu.

Le principe de fonctionnement de la cellule solaire à base de pérovskite repose sur l'absorption de photons par la couche active de pérovskite. L'absorbeur de pérovskite a une faible énergie de liaison à l'exciton qui indique la génération de porteurs de charge libre lors de l'absorption de photons et se produit en quelques pico secondes. Ces porteurs de charge libres générés sont ensuite transportés vers les contacts d'interface. Pendant le processus de transfert (figure 6), le processus souhaité (flèche rouge) se déroule en trois étapes :

- Photo-excitation dans l'absorbeur de pérovskite (1).
- Transfert d'électrons dans l'ETL (2).
- Transfert de trous en HTL (ou transfert équivalent d'électrons de HTL en

pérovskite) (3).

Toutefois un grand nombre de processus indésirables peuvent survenir (flèche verte).

Ces processus consistent en :

- Une recombinaison des espèces photo-générées (4).
- Un transfert de charge arrière aux interfaces de HTL et de TiO₂ avec de la pérovskite (5, 6).
- Un contact direct entre HTL et TiO₂ (7).

Finalement, après avoir surmonté les barrières d'extraction au niveau des interfaces, les porteurs de charge restants peuvent être transférées via des interfaces de contact sélectives et peuvent être extraits par les électrodes respectives.

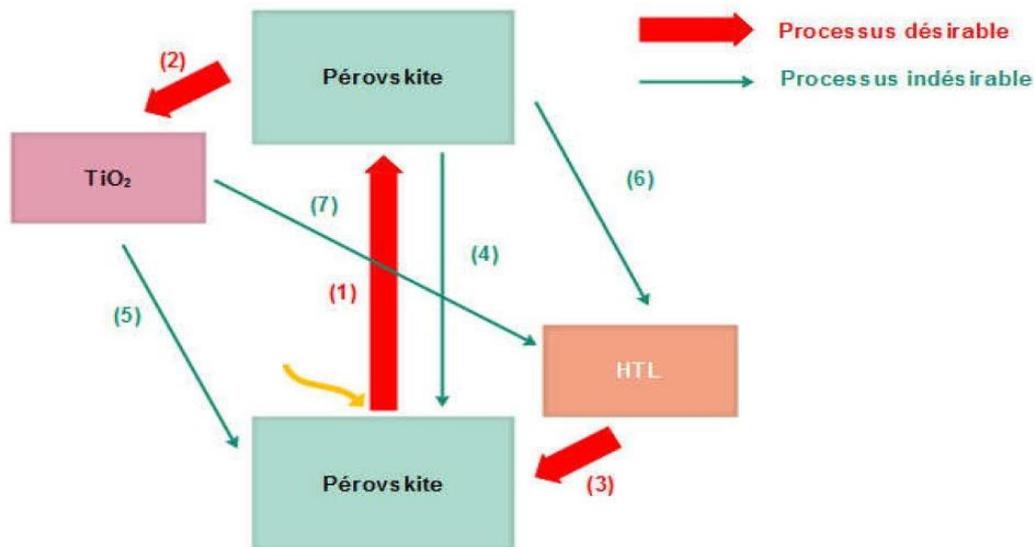


Figure II-6: Diagramme de transfert des électrons et les processus de recombinaison dans les cellules solaires à base de pérovskite.

II.5 Elaboration des cellules photovoltaïques pérovskites :

II.5.1 Electrode de collecte transparente :

La première couche de la cellule solaire est une électrode transparente, les deux matériaux les plus répandus sont le dioxyde d'étain dopé au fluor (FTO) et l'oxyde d'indium dopé à l'étain (ITO), Le FTO est plus stable thermiquement et le prix plus bas que ITO[48]. La première étape consiste à percer le substrat une bande de FTO est éliminée par l'acide chlorhydrique en présence de poudre de zinc, les substrats sont

protégés descotch ne laissant apparaitre que la bande de FTO à retirer[48].

II.5.2 Couche bloqueuse de trou :

La deuxième couche est un mince film de TiO_2 , il aide à transférer des électrons vers le FTO, le TiO_2 évite un contact direct entre le FTO et la pérovskite[48].

II.5.3 Transporteur d'électron (ETL) :

La couche médiane poreuse qui transfère l'électron est produite à partir des nanoparticules TiO_2 et $\text{TiO}_2/\text{graphène}$.

Un colle est préparé au la poudre de nanoparticule est dispersée dans l'éthanol absolu est ajoutée l'éthyle-cellule afin d'augmenter la viscosité de la solution et créer des pores tout en formant la fine couche, l'épaisseur de la couche dépend des paramètres de spin-coating et également la formation de solution[49].

L'échantillon est frittés pour éliminer les composés organiques de la solution de dépôt et créer un réseau de percolant entre les nanoparticules TiO_2 . Ceci se fait sous une certaine température afin que le graphène dans les couches ne se décompose pas, et cela se fait progressivement afin d'éviter l'apparition de pressions[48].

II.5.4 Absorbeur solaire (Pérovskite) :

Le dépôt de pérovskite sur la poreuse de TiO_2 est l'étape la plus sensible du dépôt dans l'élaboration des cellules. Il existe plusieurs types de pérovskite et plusieurs méthodes de dépôt ce qui conduisent à différentes propriétés et formes[50].

II.5.5 Transporteur de trou :

Le matériau transporteur de trous HTL doit être précipité peu de temps après la préparation de la pérovskite afin de le protéger de l'exposition de l'humidité qui est l'une des causes de la dégradation de pérovskite[51].

Exemple de matériau utilisé comme HTL :

Spiro-OMeTAD parmi ses caractéristiques :

- Mise en œuvre facile.
- Il peut être facilement précipité.
- Il offre des perspectives d'utilisation de technique bas cout sur de plus grande surfaces.

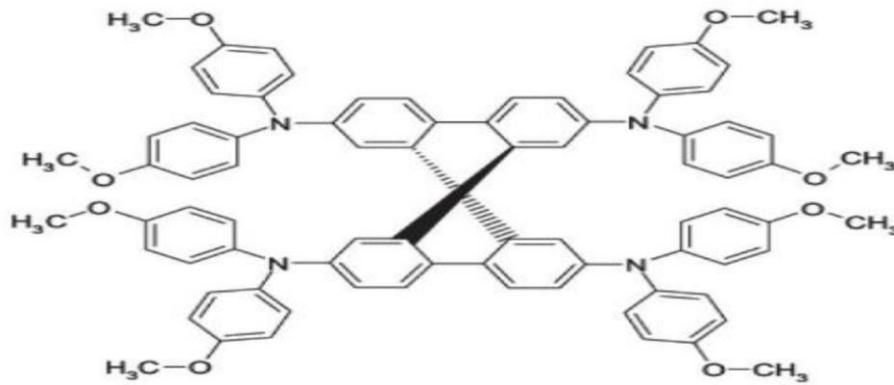


Figure II-7: Structure moléculaire du Spiro-OMeTAD .[51]

II.5.6 Contre-électrode :

La contre-électrode d'or est déposée par évaporation sous vide, c'est la dernière couche à former la cellule solaire. Le matériau est déposé, évaporé sous vide secondaire et il dépose sur toutes les surfaces disponibles [48].

II.6 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons mené une étude bibliographique approfondie sur les propriétés des matériaux pérovskite utilisés dans les cellules solaires. Ainsi, on a discuté sur les méthodes de l'élaboration des cellules photovoltaïques pérovskites. Puis une description de différentes architectures d'une cellule solaire à base de pérovskite.

La modélisation des dispositifs photovoltaïques est complexe car elle dépend extrêmement de plusieurs facteurs tels que les propriétés optoélectroniques du matériau qui regroupent la recombinaison, la durée de vie, la mobilité des porteurs de charge, la longueur de diffusion, la réflexion et le coefficient d'absorption. Cette diversité de paramètres complique la résolution des équations analytiques. Pour cela on opte souvent pour la résolution numérique qui apporte des solutions proches des caractéristiques expérimentales. D'après cette étude, on peut dire qu'il est souhaitable d'utiliser la configuration d'une couche mince type p-i-n ou n-i-p planaire à hétérojonction pour modéliser et simuler numériquement une cellule solaire à base de pérovskite.

Chapitre III: Simulation et résultats

III.1 Introduction :

Dans notre travail, on s'intéresse à l'étude de la cellule solaire à base de matériaux pérovskite hybride $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3-x\text{Cl}_x$. Le but visé est de faire maximiser le rendement de la cellule proposée, et on calcul à chaque fois les caractéristiques de densités du courant-tension (J-V). A partir des caractéristiques (J-V) fournies par SCAPS-1D, on peut déterminer les valeurs optimales des paramètres photovoltaïques tels que : la densité du courant de court-circuit (J_{cc}), la tension de circuit-ouvert (V_{co}), le facteur de forme (FF) et le rendement (η). Enfin, le logiciel SCAPS-1D donne comme résultats supplémentaires le rendement quantique externe (EQE), la densité de courant électrique $I(V)$, la puissance de tension $P(V)$ et les bands d'énergie. Notre travail prévoit d'étudier l'influence de plusieurs paramètres dans la couche de $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ sans Chlore (Cl) et avec Chlore (Cl).

III.2 Logiciels de simulation les plus utilisés :

La simulation numérique est une technique permettant d'étudier et d'analyser le comportement d'un dispositif réel. Au fil des années, La simulation s'est révélé un outil fiable et indispensable pour étudier et comprendre les propriétés des cellules solaires, telles que les propriétés optiques, électriques et mécaniques [4]. Elle contribue également à réduire les coûts de traitement et le temps consacré à la fabrication des cellules solaires en fournissant des informations utiles sur la manière de faire varier les paramètres de production pour améliorer les performances des cellules solaires .

Durant ces dernières années de nombreux simulateurs solaires ont été développés dans le but de modéliser et de simuler les cellules solaires. On peut citer comme logiciels des simulations les plus utilisées: AMPS, WXAMPS, PC1D, AFORS-HET, ASA, SILVACO, SCAPS.

III.2.1 Logiciel SCAPS :

SCAPS « Solar Cell Capacitance Simulator one Dimension » est un logiciel de simulation des cellules solaires unidimensionnelles développé à l'Université de Gent en Belgique pour simuler les caractéristiques électriques des dispositifs photoniques tels que les cellules solaires à couches minces.

En premier temps, SCAPS a été développé pour modéliser des systèmes photovoltaïques comprenant des semi-conducteurs tels que CuInSe_2 et CdTe . Par la suite, Ce logiciel a été élargi pour d'autres cellules telles que les cellules cristallines à base de Si et GaAs et les cellules amorphes. Ce logiciel permet de simuler des cellules solaires constituées au maximum de sept couches ayant chacune des propriétés différentes tel-que le profil de dopage, l'épaisseur, la distribution énergétique des niveaux donneurs ou accepteurs, l'absorption optique ... etc. Il calcule aussi, les bandes d'énergies, les concentrations, les courants, les caractéristiques I-V, les caractéristiques alternatives et la réponse spectrale (QE). Depuis la version 2.8, SCAPS a été adapté également pour les cellules solaires graduées.

III.2.1.1 Utilisation du SCAPS :

Le logiciel est organisé en plusieurs panneaux dans lesquels l'utilisateur peut définir les paramètres ou dans lesquels les résultats sont calculés. SCAPS analyse la physique du modèle en tenant compte des profils de recombinaison, de la distribution du champ électrique, des mécanismes de transports des porteurs et des densités de courant individuelles.

III.3 Optimisation de la cellule pérovskite à base de $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$:

III.3.1 Présentation de la cellule solaire à base de $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$:

Notre travail consiste à simuler une cellule solaire pérovskite à base de $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$. Nous allons optimiser ces paramètres électriques et géométriques afin de concevoir une cellule ayant un rendement électrique optimal. La structure étudiée est une structure planaire n-i-p où la couche d'absorbant $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ est insérée entre une couche ETM de type n constituée par l'oxyde conducteur transparent TCO et une couche HTM de type p. Dans une cellule solaire pérovskite, la couche HTM joue un rôle important dans l'amélioration des performances, elle permet de faciliter le transport des trous de la couche pérovskite au contact arrière. Pour déterminer le matériau HTM qui offre les meilleures performances de la cellule, On a choisi Spiro-OMeTAD Un contact arrière opaque (généralement de l'or (Au)).

III.3.2 Structure de la cellule :

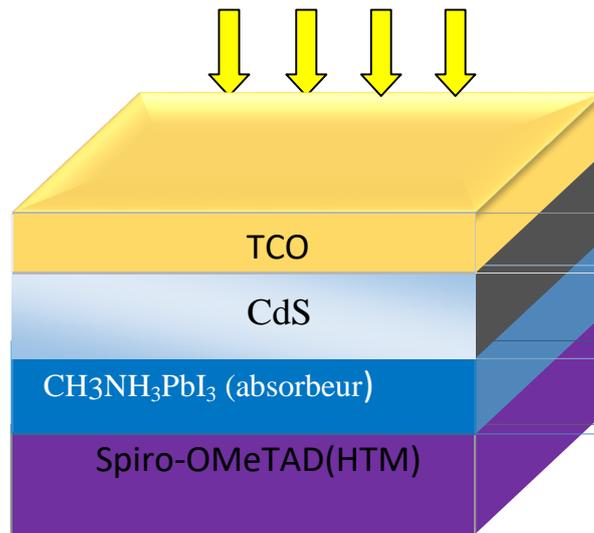


Figure III-1: Structure 3D de cellule solaire a bas de pérovskite mixte (CH₃NH₃PbI₃-xClx) [52]

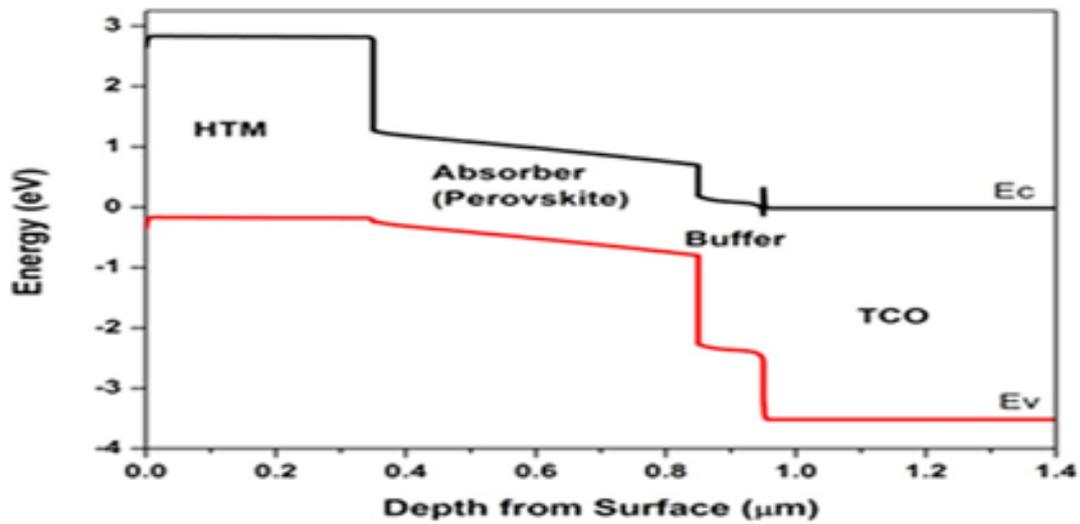


Figure III-2:schéma de diagramme de bande d'énergie [52]

Chapitre III: Simulation et résultats

- Le tableau ci-dessous donne les paramètres utilisés pour la simulation de cellules :

Tableau III-1: Montre les paramètres utilisés pour la simulation de cellule solaire en pérovskite mixte $CH_3NH_3PbI_3$ [53]

paramètre	SnO ₂ :F	Cds	Interface layer	CH ₃ NH ₃ PbI ₃	Spiro-OMeTAD
épaisseur (nm)	500	100	4	500	350
Band interdite (eV)	3.5	2.45	1.5	1.5	3
Affinité électronique (eV)	4	4.45	3.9 3	3.93	2.45
Constante diélectrique	9	10	30	30	3
électron/ trou mobilité (cm ² /V s)	20/10	72/2 5	50/ 50	50/50	$2 \times 10^{-4}/2$ $\times 10^{-4}$
Densité de dopage (cm ⁻³)	2×10^{19} (D)	10^{17} (D)	10^{15} (A)	10^{15} (A)	2×10^{18} (A)
Densité de défauts (cm ³)	10^{15}	5×10^{16}	10^{14}	3.76×10^{13}	10^{12}

- Le tableau suivant donne les résultats de simulation de la cellule pour: T=300K, d=0.5µm et E_g=1.5 eV.

Voc (V)	Jsc (mA/cm ²)	FF(%)	Eta(%)
1.1981	26.211781	82.23	25.82

Nous avons pris des valeurs du programme SCAPS-1D et on les dessinées sur le programme de Origine comme des graphes :

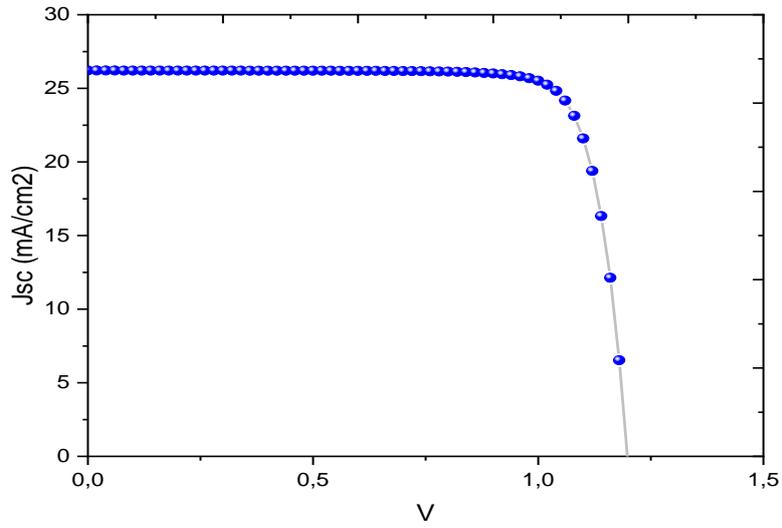


Figure III-3: Représentation de la variation de la densité de courant J en fonction de tension pour la couche $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ à $T=300\text{K}$ (27°C), $d=0.5\mu\text{m}$ et $E_g=1.5\text{ eV}$.

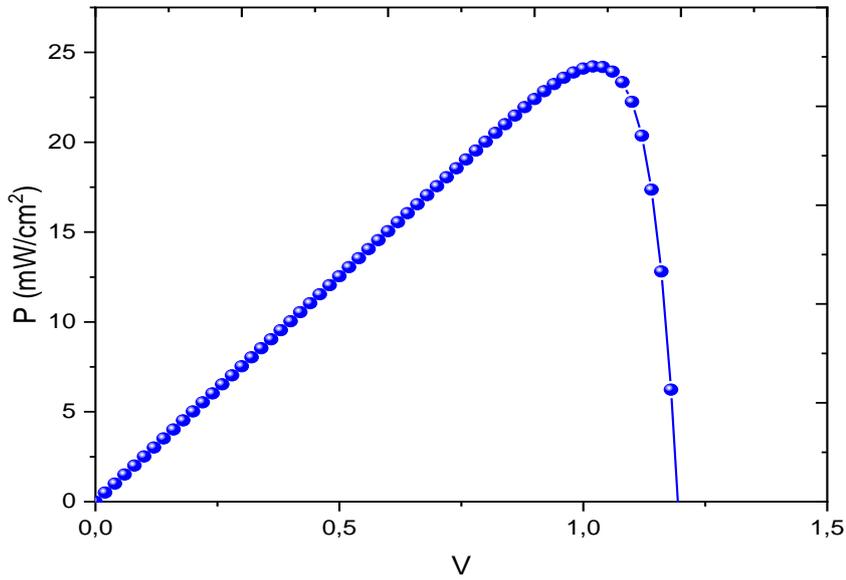


Figure III-4: Représentation de la variation de la puissance P en fonction de tension pour la couche $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ à $T=300\text{K}$ (27°C), $d=0.5\mu\text{m}$ et $E_g=1.5\text{ eV}$

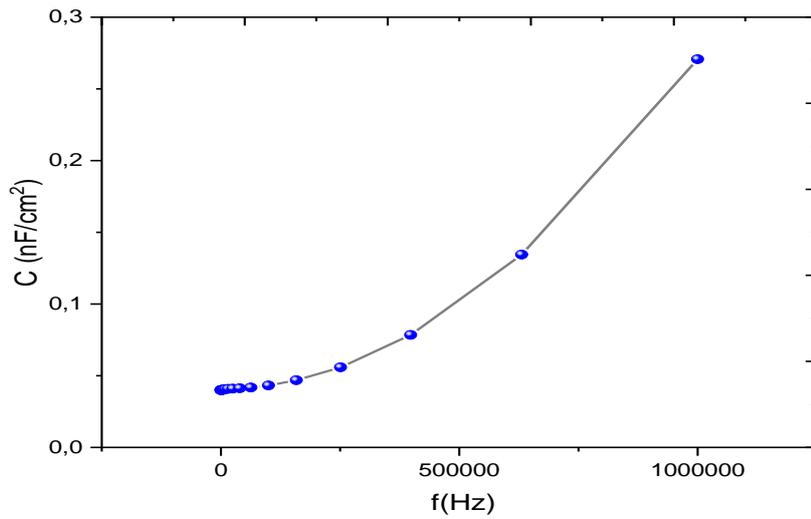


Figure III-5: Représentation de la variation de la Capacité en fonction de la fréquence pour la couche $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ à $T=300\text{K}$ (27°C), $d=0.5\mu\text{m}$ et $E_g=1.5\text{ eV}$.

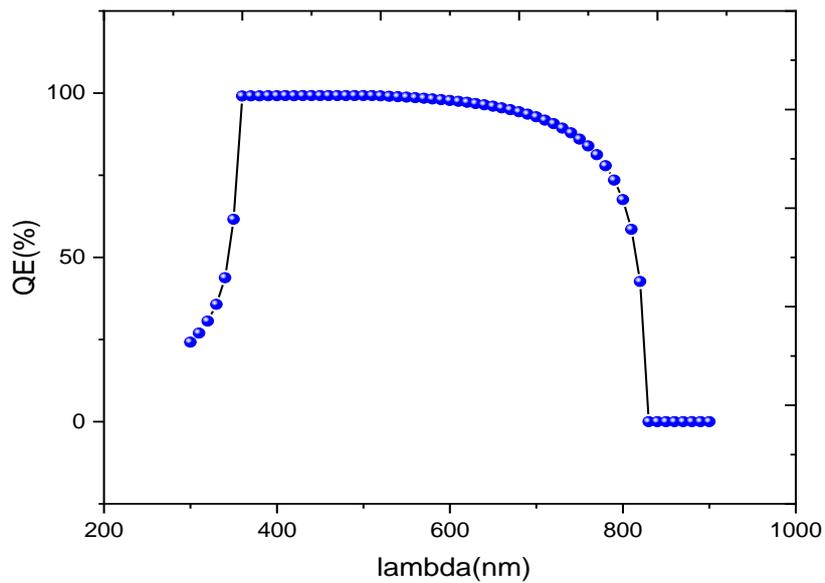


Figure III-6: Représentation de la variation du Rendement Quantique externe en fonction de Lambda pour de la couche $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ à $T=300\text{K}$ (27°C) et $d=0.5\mu\text{m}$ et $E_g=1.5\text{ eV}$.

III.4 Étude des performances de la cellule solaire à base de

$\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$:

III.4.1 Influence de l'épaisseur de la couche absorbante sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire à base de $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$:

L'épaisseur de la couche absorbante est un paramètre important qui joue un rôle essentiel dans l'optimisation des performances de la cellule solaire. Elle devrait être optimale afin d'augmenter la densité des trous-électrons photo-générés et de minimiser leur recombinaison. Pour notre travail, nous avons étudié l'influence de l'épaisseur de la couche absorbante sur les paramètres de performance de la cellule solaire pérovskite pour la couche $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$. On a varié l'épaisseur de cette couche de 0.3 à 0.8 μm à $T=300\text{K}$ (27°C).

- le Tableau suivant donne les résultats de simulation d'une cellule avec le changement d'épaisseur dans la couche absorbante :

Tableau III-2: Les résultats de simulation pour une variation de l'épaisseur entre 0.3 et 0.8 μm

Epaisseur (μm)	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm^2)	FF (%)	η (%)
0.3	1.2203	23.611733	82.64	23.81
0.4	1.2082	25.243167	82.43	25.14
0.5	1.1981	26.211781	82.23	25.82
0.6	1.1896	26.820351	81.92	26.14
0.7	1.1822	27.222398	81.66	26.28
0.8	1.1756	27.499381	81.30	26.28

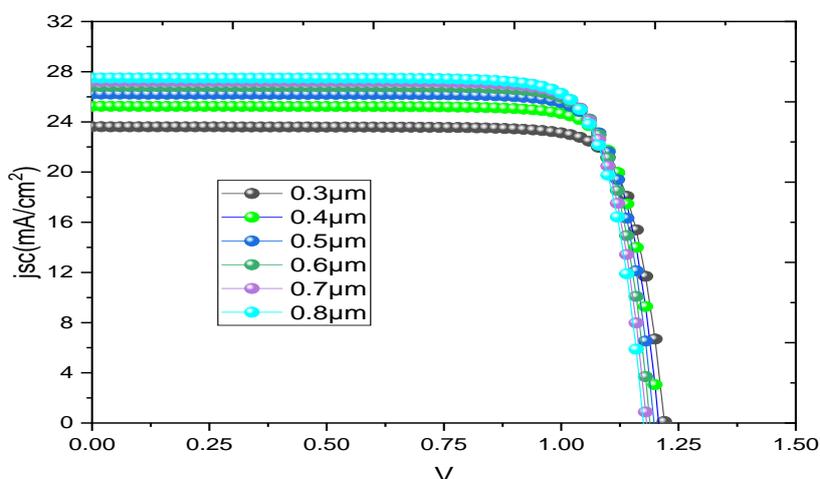


Figure III-7: Représentation de la variation de la densité de courant J en fonction de tension pour différentes épaisseurs de la couche $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ à $T=300\text{K}$ (27°C).

Chapitre III: Simulation et résultats

La figure (7) représente la variation de la densité de courant J en fonction de la tension pour différentes épaisseurs de la couche $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ à $T=300\text{K}$ (27°C). On observe que l'augmentation de l'épaisseur de la couche n'a pas un grand effet sur la tension de circuit ouvert V_{co} . En revanche, l'accroissement de l'épaisseur de la couche $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ induit une légère augmentation de la densité du courant de court-circuit J_{cc} .

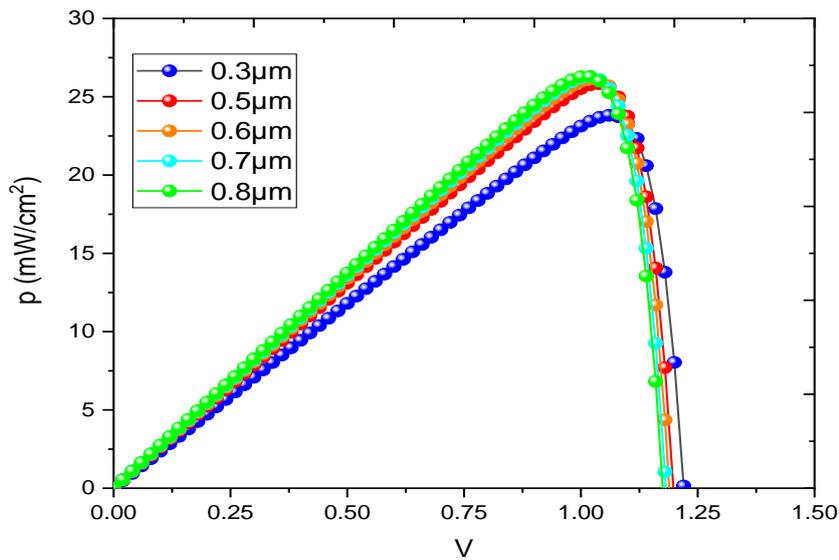


Figure III-8: Représentation de la variation de la puissance P en fonction de la tension pour différentes épaisseurs de la couche $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ à $T=300\text{K}$ (27°C).

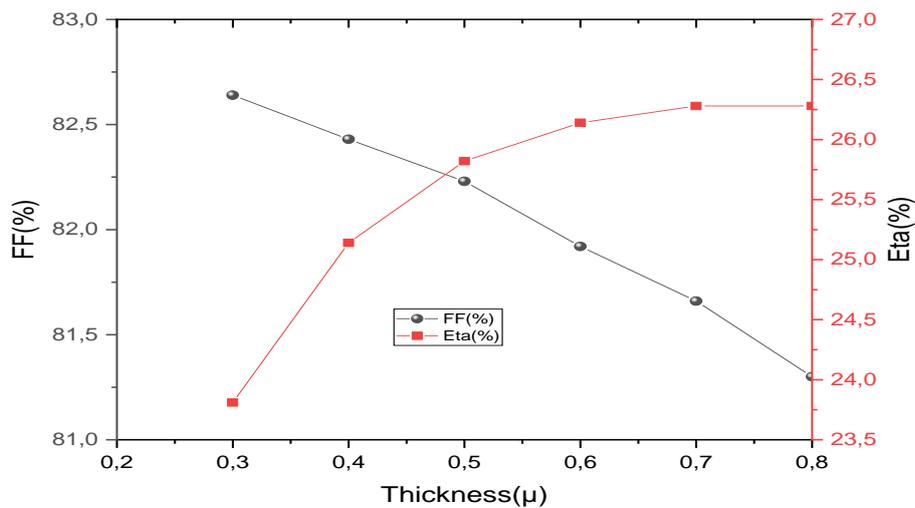


Figure III-9: Représentation de la variation du Facteur de forme (FF) et le rendement (η) en fonction de l'épaisseur de la couche $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$

Dans cette étude, on a présenté la variation des paramètres V_{co} , J_{cc} , FF et du rendement en fonction de l'épaisseur de la couche $CH_3NH_3PbI_3$ pour une température de 300K. On remarque que les meilleures performances de la cellule solaire sont obtenues pour une épaisseur d'absorbant de l'ordre de 500 nm.

Les résultats montrent aussi, que le rendement (η) augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche $CH_3NH_3PbI_3$ et atteint des valeurs maximales (26.28%) pour une épaisseur de 800 nm. Le même comportement est observé pour le courant de court-circuit J_{cc} , ce dernier augmente de manière significative en fonction de l'épaisseur jusqu'à atteindre une valeur maximale pour une épaisseur de l'ordre de 800 nm.

Dans une cellule solaire Pérovskite, plus la couche absorbante est épaisse plus l'absorption des photons est plus importante et plus la concentration des porteurs photo-générés est plus grande. En effet, une couche absorbante plus épaisse absorbe plus de photons, ce qui favorise la génération de paires électron-trou qui à son tour augmente l'efficacité de la cellule. Mais lorsque l'épaisseur augmente au-delà de 800 nm, l'efficacité diminue lentement en raison de l'augmentation du taux de recombinaison des paires électrons-trous. En effet, dans les cellules épaisses, le champ électrique est plus faible en raison de la grande distance entre les deux électrodes. Par conséquent, la recombinaison des porteurs est plus importante, ce qui entraîne une réduction de l'efficacité de la cellule.

En ce qui concerne la valeur de la tension de circuit ouvert V_{co} , cette dernière atteint une valeur maximale pour une épaisseur de 300 nm puis diminue avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche absorbante. Cette diminution peut s'expliquer par le fait que la tension V_{co} est dépendante du courant photo-généré I_{cc} et du courant de saturation I_s de la cellule. Ce dernier dépend de la recombinaison des porteurs dans la cellule solaire qui augmente lorsque l'épaisseur de la couche absorbeur est importante.

Pour la variation du facteur de forme FF en fonction de l'épaisseur de l'absorbant, on observe que le FF diminue (de 82.6 à 81.30 %) avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche $CH_3NH_3PbI_3$ (de 300 à 800 nm).

D'après ces résultats, nous constatons que les meilleures performances photovoltaïques sont obtenues pour une épaisseur de 500 nm de la couche $CH_3NH_3PbI_3$. Alors on prend cette épaisseur comme valeur optimale de l'épaisseur de l'absorbant.

Après avoir identifié les propriétés optimales de l'épaisseur de la couche

CH₃NH₃PbI₃, nous allons étudier l'effet de l'énergie de gap de la couche absorbante sur les caractéristiques de la cellule.

III.4.2 Influence de l'énergie de gap de la couche absorbante sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire à base de CH₃NH₃PbI₃ :

- Le tableau suivant donne les résultats de simulation avec le changement d'énergie de gap entre 1.3 et 1.7 eV:

Tableau III-3: Les résultats de simulation pour une variation de l'énergie de gap entre 1.3 et 1.7eV

Energie de gap (eV)	V _{oc} (V)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF(%)	Eta (%)
1.3	1.0129	32.991372	47.43	15.85
1.4	1.1071	29.849010	80.16	26.49
1.5	1.1981	26.211781	82.23	25.82
1.6	1.2866	23.100318	80.92	24.05
1.7	1.3740	20.387361	77.02	21.58

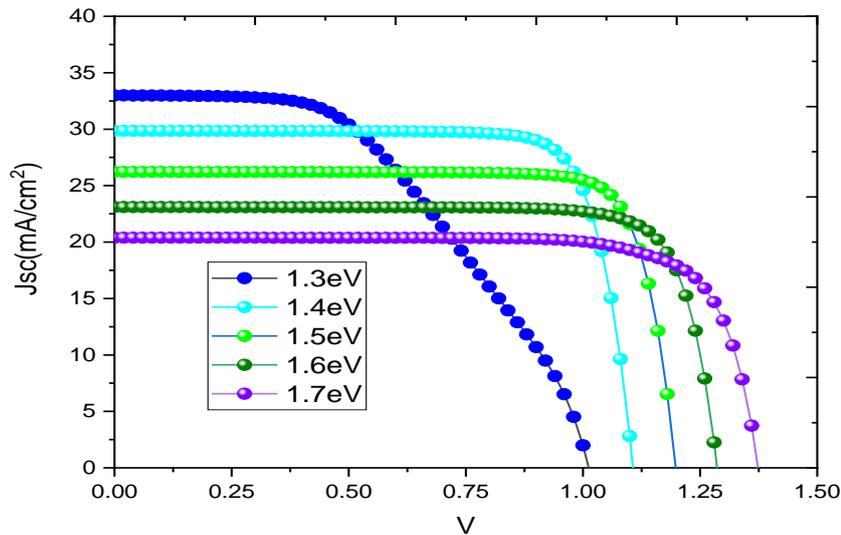


Figure III-10: Représentation de la variation de la densité de courant J en fonction de la tension pour différentes énergies de gap de la couche CH₃NH₃PbI₃ à $T=300K$ (27°C), $d_{CH_3NH_3PbI_3} = 0.5 \mu m$.

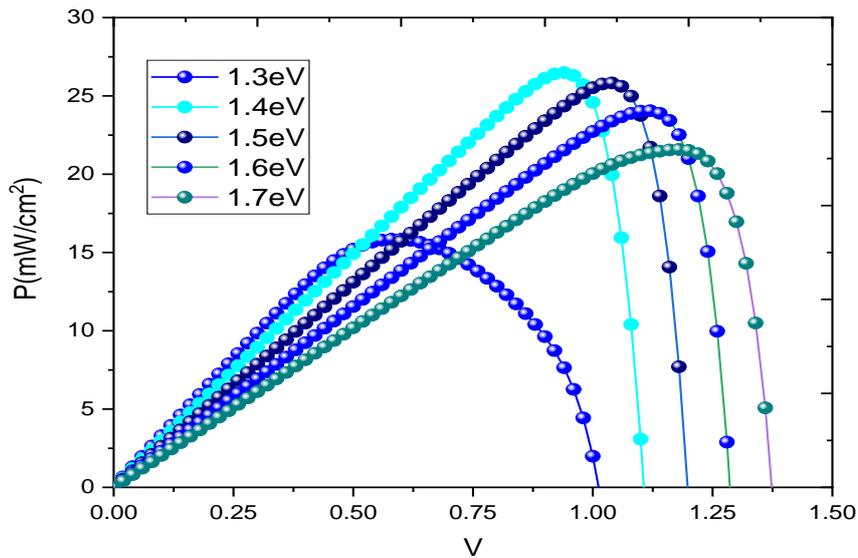


Figure III-11: Représentation de la variation de la puissance P en fonction de tension pour différentes énergies de gap de la couche $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ à $T=300\text{K}$ (27°C), $d_{\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3} = 0.5 \mu\text{m}$.

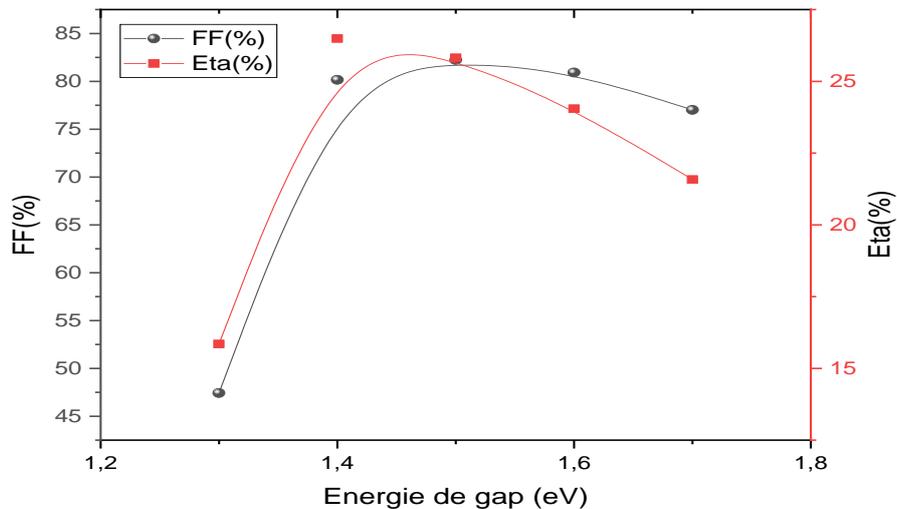


Figure III-12: Représentation de la Variation du Facteur de forme (FF) et Le rendement (η) en fonction de l'énergie de gap

Les figures(11III, 12 et 13) illustrent la variation des paramètres V_{co} , J_{cc} , FF et du rendement en fonction de l'énergie de gap de la couche $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ obtenue pour une température de 300K (27°C), et $d = 0.5 \mu\text{m}$. On remarque que les meilleures performances de la cellule solaire sont obtenues pour une énergie de gap d'absorbant de $E_g = 1.5 \text{ eV}$.

Les résultats montrent que le rendement η augmente avec l'augmentation de

l'énergie de gap de la couche $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ et atteint des valeurs maximales (26.49%) pour une énergie de gap $E_g = 1.4 \text{ eV}$, après cette valeur d'énergie de gap, le rendement diminue. Nous avons obtenu des rendements maximaux de (26.49%) à $E_g = 1.4 \text{ eV}$. La même tendance est observée pour le facteur de forme. On observe que le facteur de forme FF augmente avec l'augmentation de l'énergie de gap de la couche $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ et atteint des valeurs maximales (82.23 %) pour une énergie de gap $E_g = 1.5 \text{ eV}$, après cette valeur d'énergie de gap le facteur de forme diminue. Concernant la densité de courant J, on observe que la densité de courant de court-circuit J_{cc} diminue avec l'augmentation de l'énergie de gap de la couche $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$. Par contre, pour la valeur de la tension de circuit ouvert. La tension de circuit ouvert augmente avec l'augmentation de l'énergie de gap de la couche $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$.

D'après ces résultats, nous constatons que les meilleures performances photovoltaïques sont obtenues pour une énergie de gap $E_g = 1.5 \text{ eV}$ de la couche $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$. Alors on prend cette énergie de gap comme valeur optimale de l'énergie de gap de l'absorbant.

III.4.3 Influence de la température sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire à base de $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$:

- Le tableau ci-dessous donne les résultats de simulation avec le changement de température :

Tableau III-4: Les résultats de simulation des paramètres V_{oc} , J_{sc} , FF et Eta en fonction de la température

Température(K)	V_{oc} (V)	J_{sc} (ma/cm ²)	FF(%)	Eta(%)
250	1.2625	26.205975	79.75	26.38
275	1.2305	26.208837	81.55	26.30
300	1.1981	26.211753	82.23	25.82
325	1.1654	26.214016	82.14	25.09
350	1.1321	26.215806	81.55	24.20
375	1.0981	26.217981	80.68	23.23
400	1.0635	26.219785	79.66	22.21

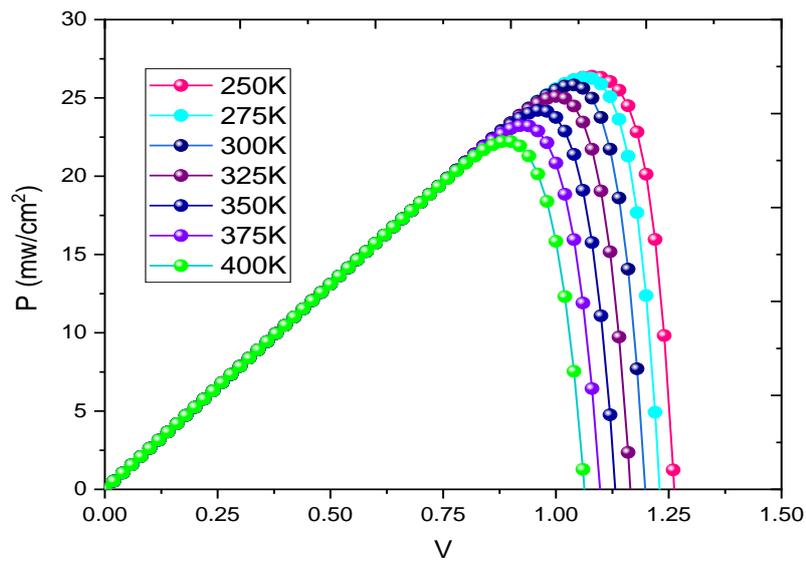


Figure III-13: Représentation de la variation de la puissance en fonction de la tension à différentes épaisseurs de la couche $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ avec $d_{\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3} = 0.5 \mu\text{m}$ et $E_g = 1.5 \text{ eV}$.

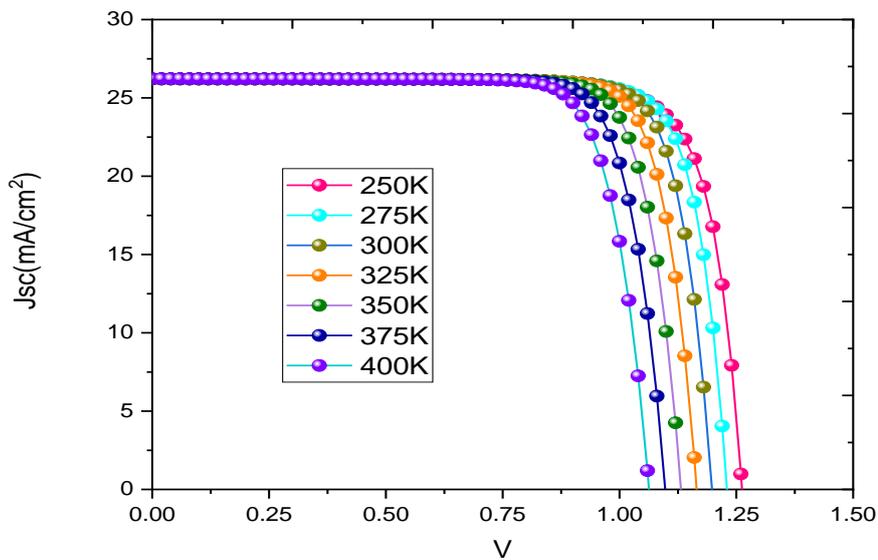


Figure III-14: Représentation de la variation de la densité de courant J en fonction de la tension à différentes épaisseurs de la couche $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$, avec $d_{\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3} = 0.5 \mu\text{m}$ et $E_g = 1.5 \text{ eV}$.

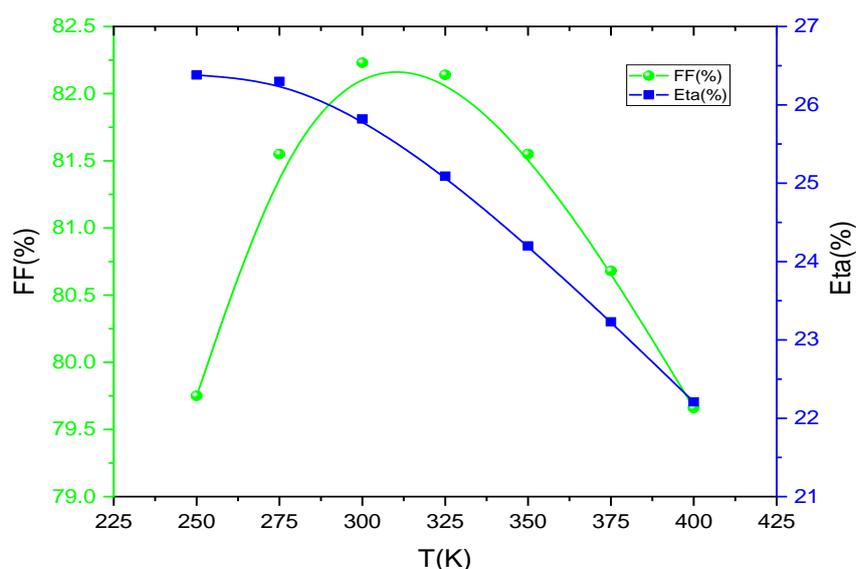


Figure III-15: La variation du Facteur de forme (FF) et du rendement (η) en fonction de la température

En tant que facteur clé affectant directement les performances de la cellule solaire, la température de fonctionnement joue un rôle important pour contrôler les performances des cellules solaires pérovskites. Les figures (15-16, et 17) représentent l'évolution des paramètres photovoltaïques de la cellule pérovskites à base de $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ en variant la température de 250 à 400 K. Cette simulation est réalisée pour la cellule en considérant la valeur optimale de l'épaisseur d'absorbeur de 500 nm et de l'énergie de gap $E_g = 1.5$ eV.

Les résultats de la simulation montrent une dépendance différente des paramètres photovoltaïques de la température. Comme le montre les figures (III:14) et)) la tension de circuit ouvert V_{co} et le rendement η de la cellule diminuent avec l'augmentation de la température. Le courant de court-circuit J_{cc} par contre augmente en fonction de la température. En ce qui concerne le facteur de forme (FF) de la cellule, on remarque qu'il augmente pour atteindre des valeurs maximales pour une température de l'ordre 300 K, puis diminue avec l'augmentation de la température.

D'après les résultats obtenus on remarque que l'augmentation de la température a un effet néfaste sur les performances de la cellule. Lorsque la température de fonctionnement augmente, la largeur de la bande interdite diminue ce qui favorise la génération de plus de porteurs (électron-trou) et augmente le courant. Toutefois le taux de recombinaison des porteurs est également affecté par la température, il augmente avec l'accroissement de la température. C'est pour cette raison que l'on

observe une réduction de l'efficacité et du rendement pour des températures élevées. Donc pour obtenir une bonne efficacité de la cellule, la température de fonctionnement optimale doit être fixée à des valeurs inférieures à $T = 300\text{K}$.

III.4.4 Influence de la résistance R_s et R_{sh} sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire à base de $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$:

III.4.4.1 Effet de la résistance série R_s :

Lorsque la résistance série R_s de la couche ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$) est modifiée de 0.2 à 1 ohm , a température $T=300\text{K}$ (27°C), $E_g = 1.5\text{ eV}$ et $d=0.5\mu\text{m}$ (avec $R_h = 10^3\text{ Ohm}$) :

- Le tableau suivant donne les résultats de simulation :

Tableau III-5: Les résultats de simulation des paramètres V_{oc} , J_{sc} , FF et Eta en pour une variation de resistance serie

R_s (Ohm)	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	Eta (%)
0.2	1.1951	26.206375	78.64	24.63
0.4	1.1951	26.200998	78.29	24.52
0.6	1.1951	26.195623	77.95	24.40
0.8	1.1951	26.190249	77.60	24.29
1	1.1951	26.184877	77.25	24.18

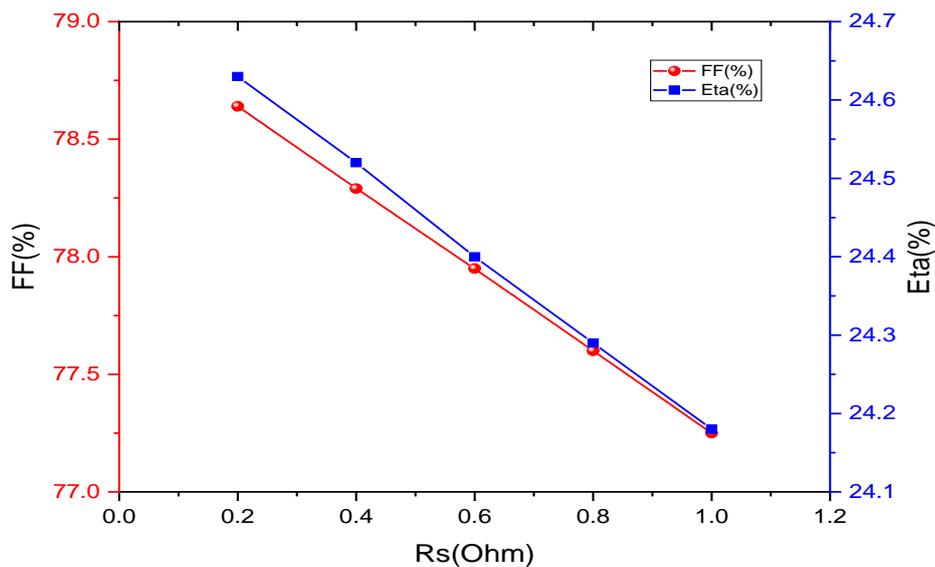


Figure III-16: Variation du Facteur de forme (FF) Le rendement (η) en fonction de R_s

III.4.4.2 Effet de la résistance shunt R_{sh} :

Lorsque la résistance shunt R_{sh} de la couche ($CH_3NH_3PbI_3$) est modifiée de 10^1 à 10^5 ohm pour température $T=300K$ ($27^\circ C$), $E_g = 1.5$ eV et $d=0.5\mu m$ (avec $R_s = 1$ Ohm):

- Le tableau suivant donne les résultats de simulation :

Tableau III-6: Les résultats de simulation des paramètres V_{oc} , J_{sc} , FF et η pour une variation de résistance shunt

R_{sh} (Ohm)	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
10^1	0.2620	23.828295	24.99	1.56
10^2	1.1621	25.951553	50.80	15.32
10^3	1.1951	26.184877	77.25	24.18
10^4	1.1979	26.208440	79.96	25.10
10^5	1.1981	26.210799	80.23	25.20

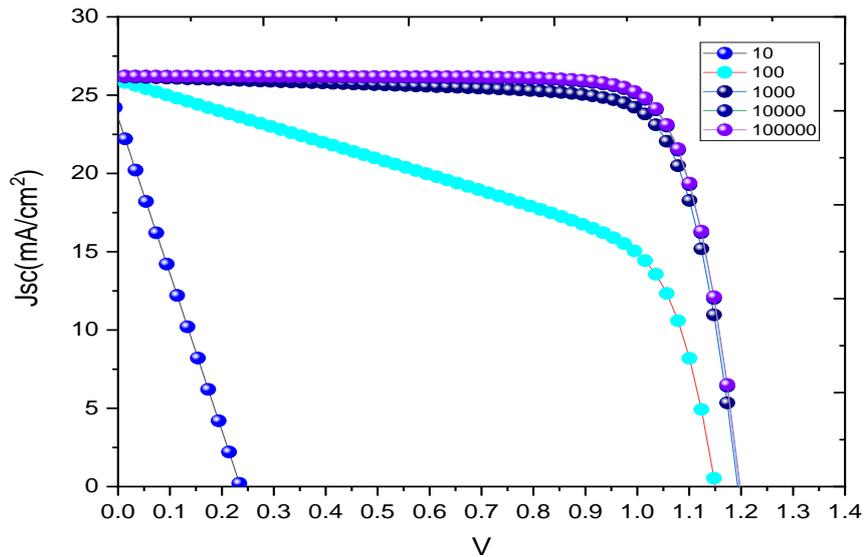


Figure III-17: Représentation de la variation de la densité de courant J en fonction de tension pour la couche $CH_3NH_3PbI_3$ pour différence R_{sh}

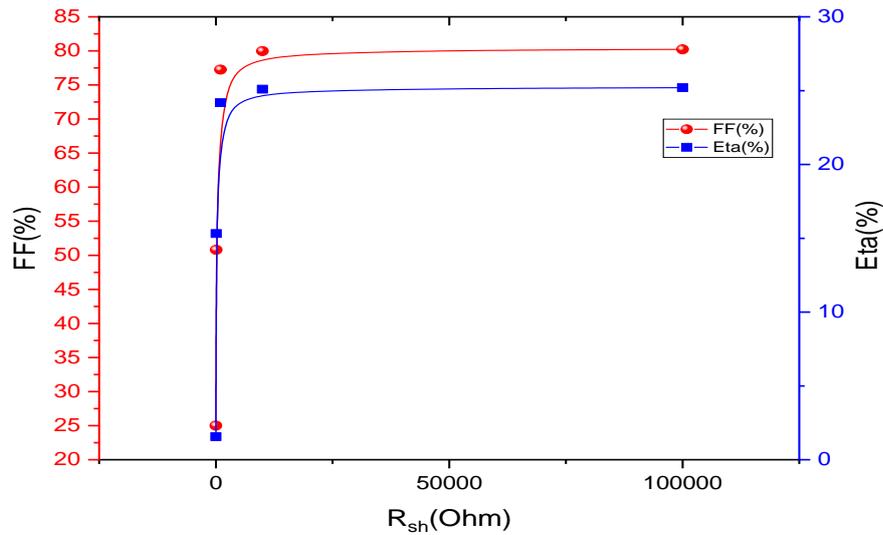


Figure III-18: La Variation du Facteur de forme (FF) et Le rendement (η) en fonction de R_{sh}

les résistance (série & shunt) jouent un rôle important pour contrôler les performances des cellules solaires pérovskites. Les figures(18), (19) et (20) représentent l'évolution des paramètres photovoltaïques (I-V , Eta, FF) de la cellule pérovskites à base de $CH_3NH_3PbI_3$ en variant en début la résistance série entre 0.2 et 1 ohm avec $R_{sh}=10^3$ Ohm . Cette simulation est réalisée pour la cellule et en considérant la valeur optimale de l'épaisseur d'absorbeur de 500 nm et l'énergie de gap $E_g = 1.5$ eV et température $T = 300$ K . Les résultats de la simulation montrent que la densité de courant de court-circuit, le rendement η et le facteur de forme de la cellule diminuent avec l'augmentation de la résistance série . En ce qui concerne la tension de circuit ouvert V_{co} de la cellule , on remarque qu'elle reste constant par rapport la variation de R_s .

Maintenant, en variant la résistance shunt entre 10^1 et 10^5 ohm avec $R_s = 1$ ohm. On remarque que le rendement η , Facteur de forme FF, la densité de courant de court-circuit J_{cc} et la tension de circuit ouvert V_{co} augmentent avec l'augmentation de la résistance shunt R_{sh} . Donc, en conclue que plus la résistance en shunt est grand , plus le rendement est élevé .

III.5 Optimisation un autre cellule pérovskite à base de $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$ avec un augmentation de concentration de Chlore (Cl) :

Dans notre travail, on s'intéresse à l'étude de la cellule solaire à base de matériaux pérovskite hybride $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$. Le but est l'étude de l'effet de l'augmentation de Chlore (Cl) dans la cellule proposée, et on calcule à chaque fois les caractéristiques densités du courant-tension (J-V). À partir des caractéristiques (J-V) fournies par SCAPS .

III.5.1 Structure de la cellule :

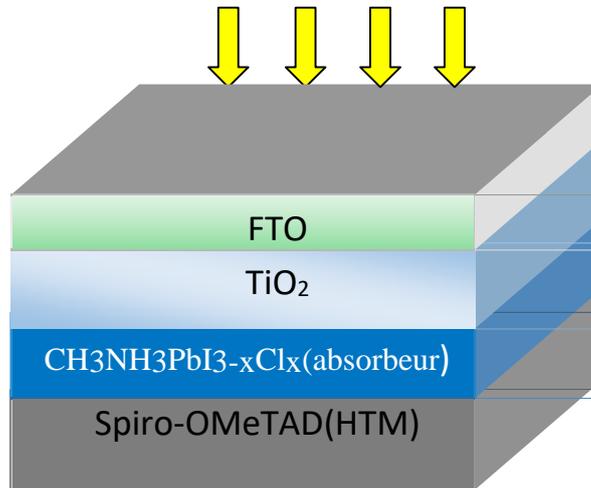


Figure III-19: Structure 3D de cellule solaire a bas de pérovskite mixte ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$) [54]

Tableau III-7: Montre les paramètres utilisés pour la simulation de cellule solaire en pérovskite mixte $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$ [54]

parameter	FTO	TiO2	$\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$	Spiro-OMeTAD
Bande interdite, E_g (eV)	3.6	3.26	1.55	3.0
Epaisseur, t (μm)	0.2 (varied)	0.05	0.6 (varied)	0.35
Affinité électronique, χ_e (eV)	4	4.26	3.9	2.45
permittivité, ϵ_r .	9	10	30	3
NC densité effective (cm^{-3})	$2:2 \times 10^{18}$	$2:2 \times 10^{18}$	$2:2 \times 10^{18}$	$2:2 \times 10^{18}$
ND densité effective (cm^{-3})	$1:8 \times 10^{19}$	$1:8 \times 10^{19}$	$1:8 \times 10^{19}$	$1:8 \times 10^{19}$
Vitesse thermique des électrons (cm/s)	$1:0 \times 10^7$	$1:0 \times 10^7$	$1:0 \times 10^7$	$1:0 \times 10^7$
Vitesse thermique	$1:0 \times 10^7$	$1:0 \times 10^7$	$1:0 \times 10^7$	$1:0 \times 10^7$

des trous (cm/s)				
Electron mobilité, μ_n (cm ² /Vs)	20	20	10	$2:0 \times 10^{-4}$
trou mobilité, μ_p (cm ² /Vs)	10	10	2	$2:0 \times 10^{-4}$
Densité de porteurs du donneur, ND (cm ⁻³)	$1:0 \times 10^{18}$	$5:0 \times 10^{17}$	$1:0 \times 10^{13}$	-----
densité de porteurs de l'accepteur, NA (cm ⁻³)	-----	----	$1:0 \times 10^{12}$	$2:0 \times 10^{18}$

III.5.2 Effet de l'augmentation de Chlore (Cl) :

Dans cette simulation on va étudier l'effet de la variation de Chlore (Cl) dans notre cellule :

Quand on a ajouté le Chlore (Cl) deux paramètres vont changer dans la couche absorbante $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$:

- Energie de gap :

L'augmentation des bandes interdites avec la fonction quadratique suivant :

$$E_g = 1.521 + 0.269x + 0.873x^2 \quad (III-1)$$

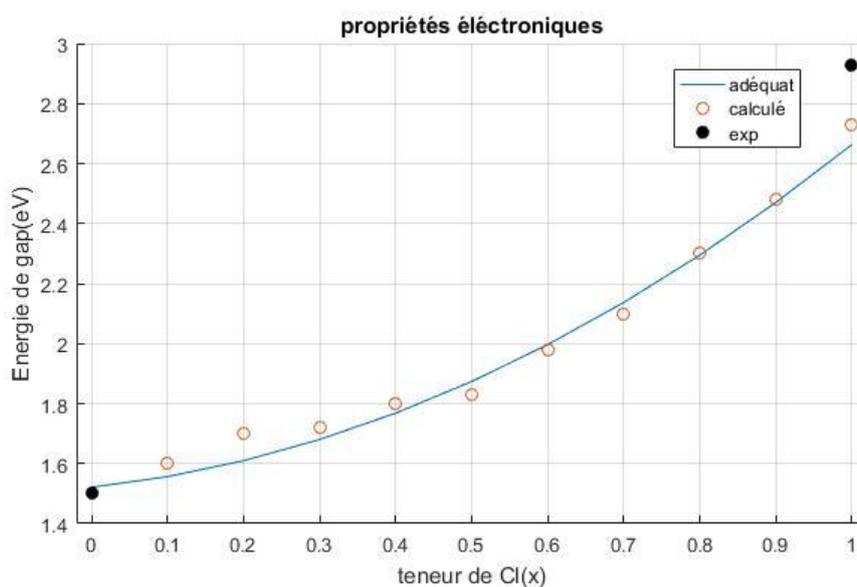


Figure III-20: La variation de énergie de gap en fonction de x [55]

- Permittivité :

La diminution de Permittivité avec l'équation suivant :

$$E_s = 5.698 - 2.593x \quad (III-2)$$

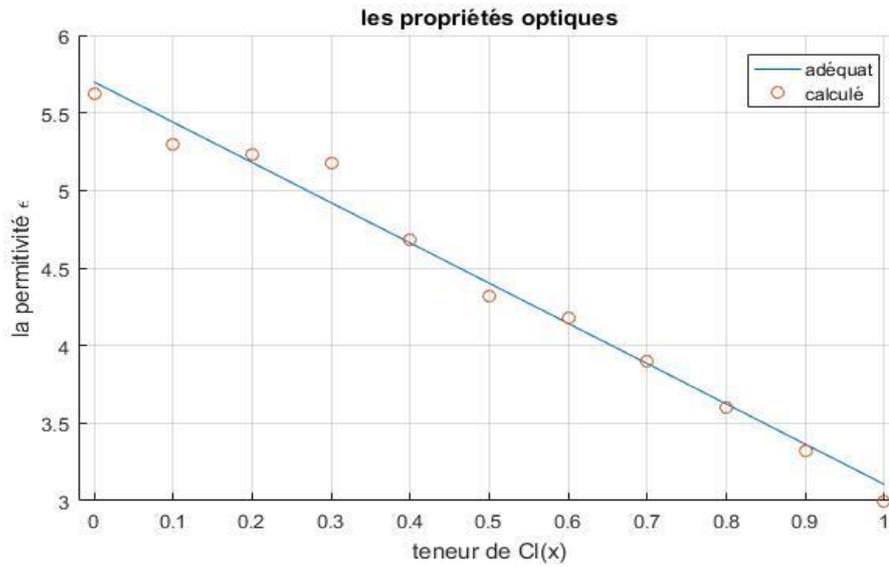


Figure III-21: La variation de permittivité en fonction de x [55]

- Le tableau suivant donne les résultats de simulation avec l'augmentation de concentration de Chlore (Cl) entre 10 et 40 % dans le martiaux :

Tableau III-8: les résultats de simulation avec l'augmentation de X

x	V _{oc} (V)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF(%)	Eta(%)
0.1	1.2348	23.766508	79.34	23.28
0.2	1.3449	20.314370	80.20	21.91
0.3	1.3731	19.288424	80.06	21.20
0.4	1.4207	18.006856	80.27	20.54

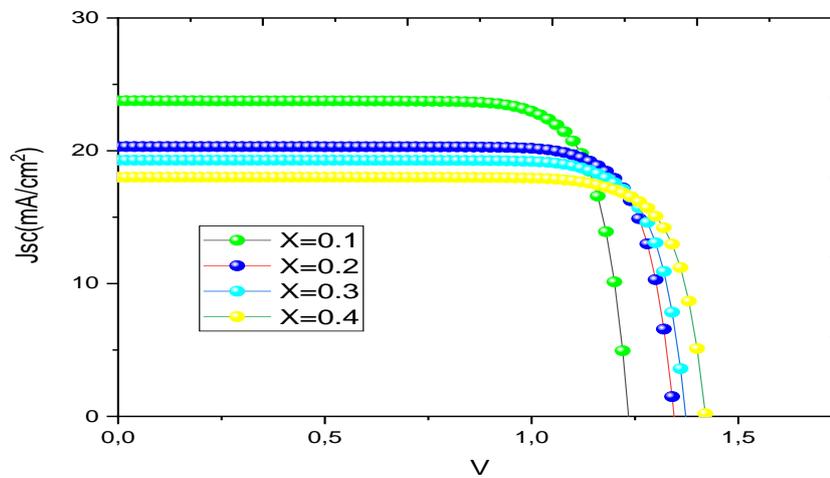


Figure III-22: La variation de la densité J en fonction de V pour plusieurs concentration x

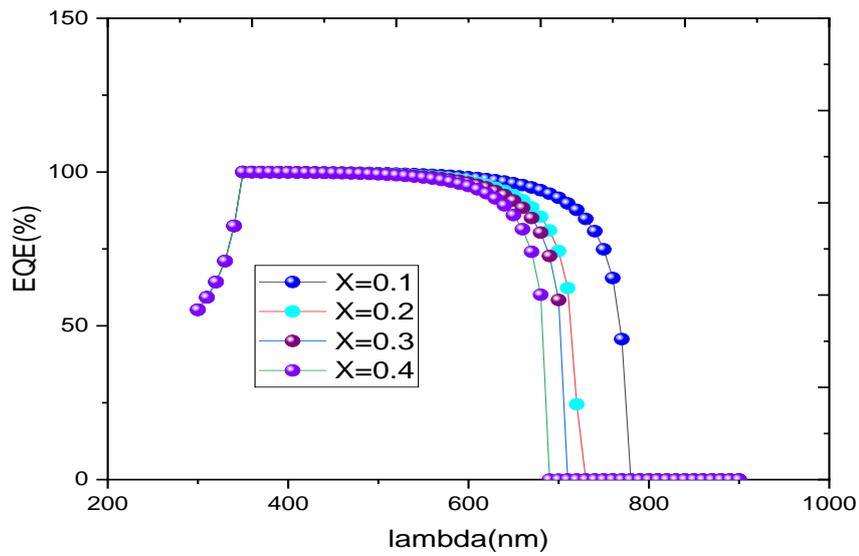


Figure III-23: La figure présente la variation du EQE en fonction de Lambda pour plusieurs concentration

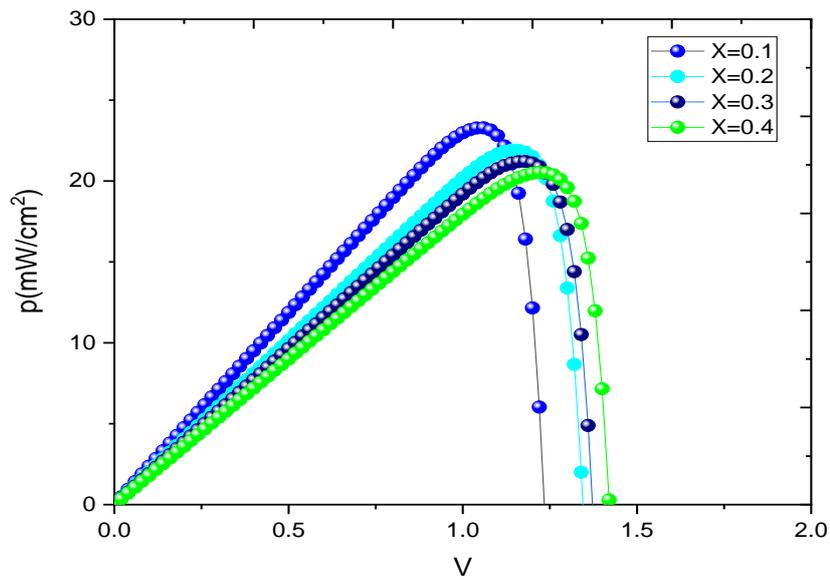


Figure III-24: Représente la variation du la puissance p en fonction de la tension pour différentes concentration x

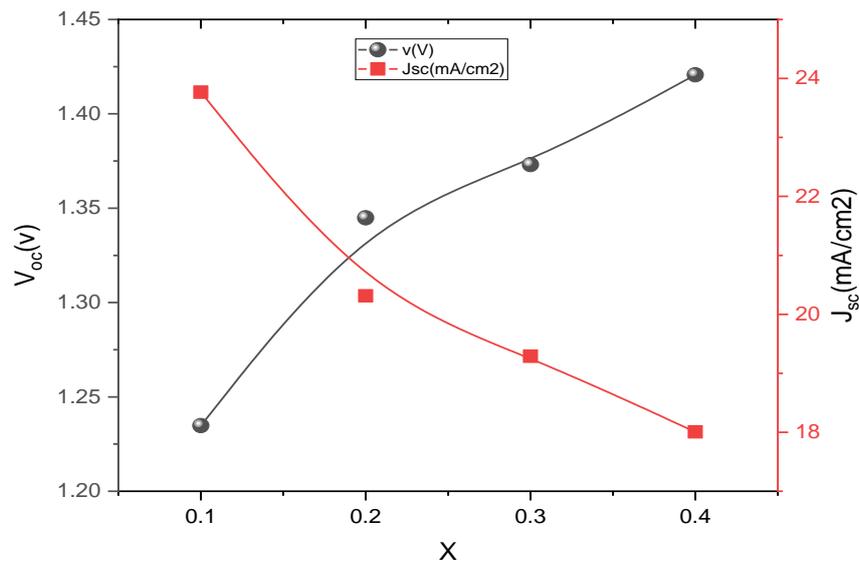


Figure III-25: La variation de V_{oc} et J_{sc} en fonction de x

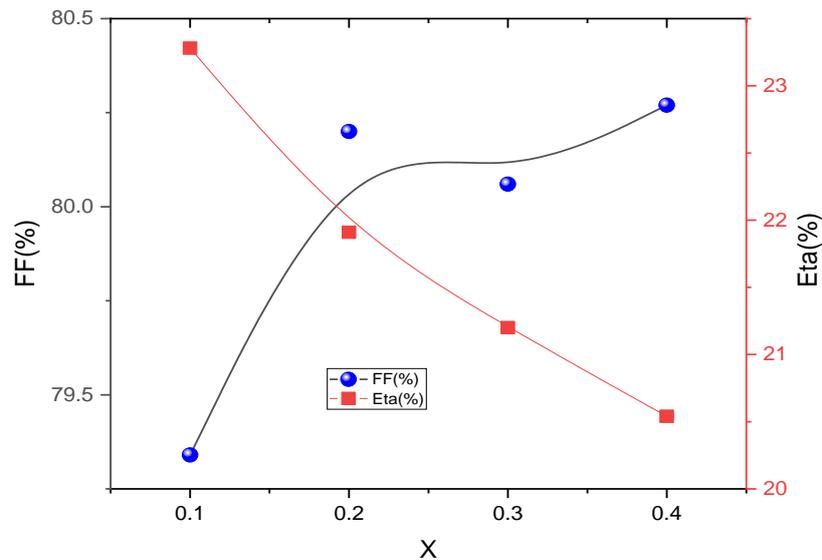


Figure III-26: La variation de FF et Eta en fonction de x

Les figures (25-27-28) représentent la variation des paramètres V_{co} , J_{cc} , FF et du rendement en fonction de déférence concertation X dans la couche absorbante. On remarque que les meilleures performancesde la cellule solaire sont obtenues pour faible (10%) concentration de Chlore (Cl).

Les résultats montrent que le rendement η diminue avec l'augmentation de l'énergie de gap de la couche $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$ et la diminution de la permittivité atteint des valeurs maximales (23.28 %) pour une concentration $x=0.1$. Par contre, on observe que le facteur de forme FF augmente avec l'augmentation de l'énergie de gap de la couche $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$ et atteint des valeurs maximales (80.27 %) pour une contraction de $x=0.4$, Concernant la densité de courant J, on observe que la densité de courant de court-circuit J_{cc} diminue avec l'augmentation de l'énergie de gap de la couche $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$. Par contre, pour la valeur de la tension de circuit ouvert. La tension de circuit ouvert augmente avec l'augmentation de l'énergie de gap de la couche $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$ et la diminution de permittivité.

D'après les résultats obtenus on remarque que les meilleures performances de la cellule solaire dans des faibles concentrations de Chlore (Cl).

III.6 Comparaison :

On va faire une comparaison entre la première cellule à base de $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ Sans Chlore (Cl) Et la deuxième cellule à base de $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$ Avec une concentration de Chlore (Cl) $x=0.1$.

- Ce tableau ci-dessous donne les résultats de simulation :

Tableau III-9: Comparaison entre les deux cellules

	V_{oc} (v)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF(%)	Eta(%)
Premier cellule $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$	1.1981	26.211781	82.23	25.82
Deuxième cellule $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$ Avec X=0.1	1.2348	23.766508	79.34	23.28

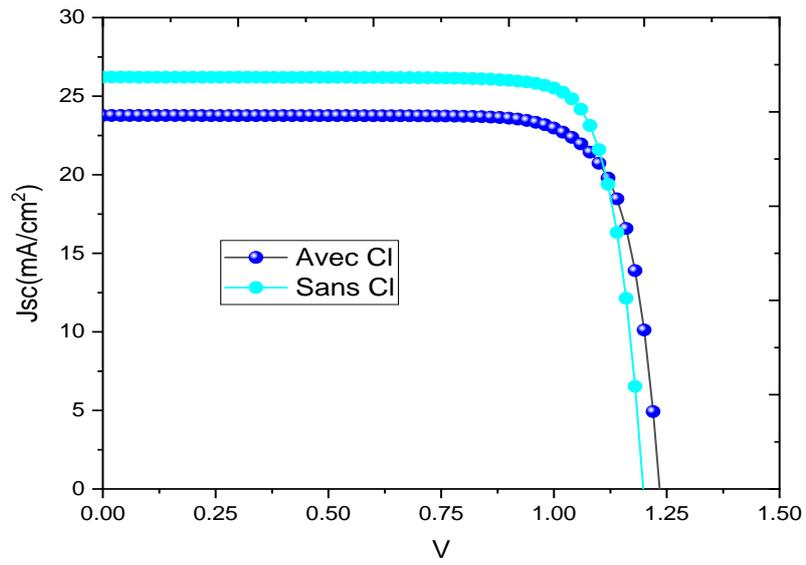


Figure III-27: La variation de la densité J en fonction de V avec et sans Cl

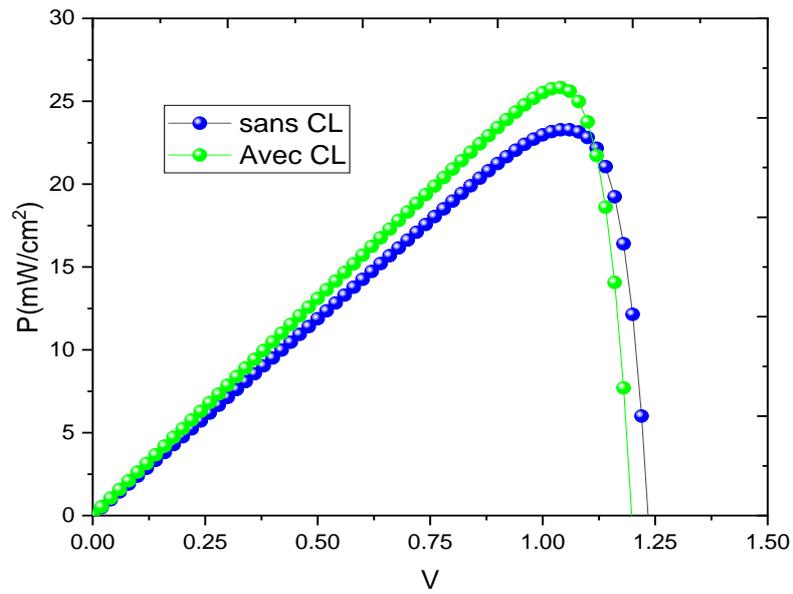


Figure III-28: La variation de P en fonction de V avec et sans Cl

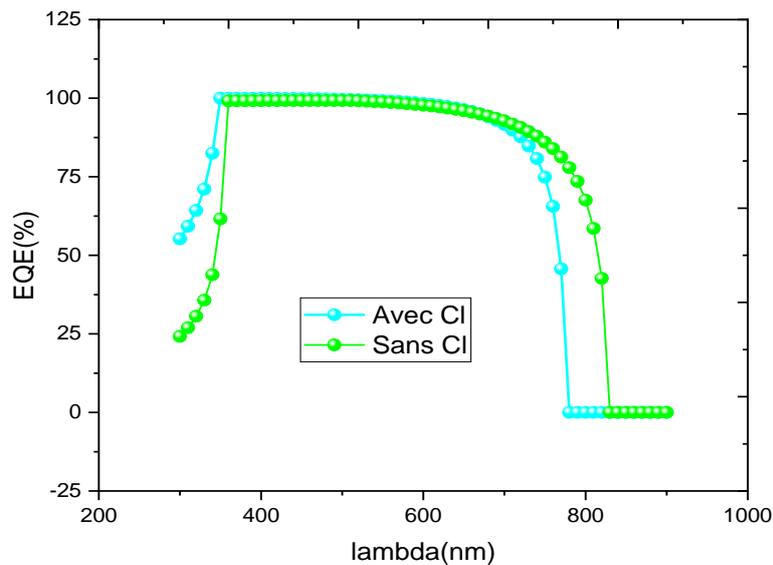


Figure III-29: La variation de rendement Externe Quantique en fonction de Lambda avec et sans Cl

Les figures (29-30-31) représentent la variation des paramètres V_{co} , J_{cc} , P et QE . On remarque que les meilleures performances de la cellule solaire sont obtenues en absence de Chlore (Cl).

D'après les résultats obtenus, on conclut que le Chlore (Cl) n'a aucune importance dans l'augmentation de rendement de la cellule.

III.7 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons simulé et analysé deux cellules pérovskite à base de $(CH_3NH_3PbI_3 - CH_3NH_3PbI_{3-x}Cl_x)$ par logiciel de SCAPS-1D.

Ce chapitre présente les résultats de la simulation des cellules solaire pérovskite à base de $(CH_3NH_3PbI_3 - CH_3NH_3PbI_{3-x}Cl_x)$ où nous avons étudié l'effet de l'épaisseur, énergie de gap, température, la résistance série et la résistance shunt de la couche absorbante à l'aide du logiciel de simulation SCAPS-1D.

L'effet de ces paramètres de l'absorbant sur les propriétés de la cellule montre qu'il existe une épaisseur optimal environ 500 nm, énergie de gap 1.5 eV et une température de 300K .De plus la meilleur performance dépassant 25.82 %.

Enfin, nous avons étudié l'effet du Chlore (Cl) sur la cellule solaire et on observe que ce dernier n'a aucune importance sur le rendement de cette cellule.

D'après ces résultats et le journal «Journal of Power Sources » on conclut qu'une

Chapitre III: Simulation et résultats

petite addition du Chlore (Cl) à MAPbI₃ améliore la stabilité du matériau ainsi que les propriétés de récupération de la lumière et de conduction des porteurs des pérovskites, Cependant, le mécanisme d'amélioration des performances de la pérovskite par l'ajoute de Chlore (Cl) n'est toujours pas clair.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur la modélisation des performances des cellules solaires en pérovskite. Ces études ont été réalisées dans des simulations à l'aide du logiciel SCAPS-1D. Pour ce faire, afin de faciliter le processus de simulation, nous avons d'abord présenté les différentes techniques de cellules PV, leurs principes de fonctionnement et leur structure. Ensuite, les caractéristiques structurales, optiques et électriques des cellules de pérovskite, ainsi que leurs principes de fonctionnement sont présentées.

Ensuite, nous avons étudié les performances des cellules pérovskites en fonction de l'épaisseur de couche des cellules pérovskites et nous avons fait des simulations, analyse et exploitation de deux structures de cellules solaires différentes ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$, $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$) dans le but d'étudier et d'optimiser les propriétés électriques de cellules solaires en matériau pérovskite. Les résultats de simulation dans la première partie sont clairement basés sur les changements d'épaisseur et d'énergie de gap de la couche absorbante de la cellule pérovskite ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$). Dans ce cas, cette optimisation affecte la forme de la cellule. Lors de la simulation d'une cellule solaire en pérovskite, de bons résultats ont été obtenus à ($T = 300 \text{ K}$, $E_g = 1,5 \text{ eV}$ et $d_{\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3} = 0,5 \mu\text{m}$). $V_{oc} = 1,1981 \text{ (V)}$; $J_{sc} = 26,211781 \text{ (mA/cm}^2\text{)}$; $FF = 82,23 \text{ (\%)}$; $\eta = 25,82 \text{ (\%)}$. Une fois la structure optimale de la cellule établie, l'effet de la température sur la couche d'absorption ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$) a été expliqué et étudié, et les résultats de la simulation concernant les performances du dispositif ont été observés. Température idéale ($T = 300\text{K}$) : $V_{co} = 1,1981 \text{ (V)}$; $J_{sc} = 26,211753 \text{ (mA/cm}^2\text{)}$; $FF = 82,23 \text{ (\%)}$; $\eta = 25,82 \text{ (\%)}$. Terminez la première partie de la simulation en examinant les effets de la résistance série et de la résistance shunt (R_s , R_{sh}). L'efficacité atteint son maximum à $R_s = 1 \text{ ohms}$ et $R_{sh} = 105 \text{ ohms}$. Dans la deuxième partie de cette simulation, nous avons étudié la fluctuation de la concentration de Cl dans la couche $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$. Ici, avec $X = 10\%$, nous avons obtenu la meilleure performance d'environ 23,28%.

La partie trois a comparé les résultats optimaux de la deuxième partie de simulation de la couche $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$ avec la première cellule à base de $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$. Cependant, pour les cellules solaires à pérovskite à base de $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$, nous constatons que les premières cellules solaires à base $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ présentent une efficacité élevée à des concentrations plus élevées que celles obtenues avec les cellules solaires à base de $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$.

Bibliographies

Bibliographies:

- [1] « S. Chu and A. Majumdar, "Opportunities and challenges for a sustainable energy future," nature, vol. 488, no. 7411, p. 294, 2012. »
- [2] «P. C. Alonso, "Recherches d'optimums d'énergies pour charge/décharge d'une batterie à technologie avancée dédiée à des applications photovoltaïques ", p. 243,2011. »
- [3] «A. Husainat, W. Ali, P. Cofie, J. Attia, et J. Fuller, "Simulation and Analysis of Methylammonium Lead Iodide Perovskite Solar Cell with Au Contact Using SCAPS 1D Simulator ", Am. J. Opt. Photonics, vol. 7, no 2, p. 33, 2019».
- [4] « Johann BOUCLÉ "Pérovskites Halogénées pour l'électronique" N° 596 2019».
- [5] R. Castagné et all, Circuits Intégrés en arséniure de Gallium., Physique, technologie et règles de conception. Masson et Cimet ENST Paris, (1989).>
- [6] F. Chekired, « Etude et implémentation d'une commande MPPT neuro-floue sur FPGA», mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2008.
- [7] Ballo Djibril Bettarcha, Nesrine Manel, "étude expérimentale d'un retro-concentrateursolaire parabolique", mémoire master, université Mostaganem, 2019.
- [8] Abdelkader Belhadj, communique scientifique, université Tlemcen.
- [9] « K.A. Khan & M. Abu Salek " Solar Photovoltaic (SPV) Conversion: A Brief Study" Vol-5 Issue-5 2019 »
- [10] «B. Amor, " Etude et simulations numériques des contraintes thermo mécaniques dans le silicium photovoltaïque , p. 123. 2010»
- [11] « Le panneau solaire polycristallin disponible sur<https://www.jadetechnologie.com> consulté le 3 mars 2021 ».
- [12] « Les principes de l'énergie solaire photovoltaïque disponible sur "www.editionsdumonde.com"COMPLÉMENT TECHNIQUE > Mars/Avril 2008 ».
- [13] « NAIM_Houcine"Etude de gestion d'une mini-centrale solaire et mise au point d'un dispositif automatique de mesures, contrôles et régulation de l'énergie électrique" page 151,2016».
- [14] « Le panneau solaire polycristallin disponible sur<https://www.jadetechnologie.com>

Bibliographies

consulté le 3 mars 2021 ».

[15] « P. Rappaport, "The photovoltaic effect and its utilization," Sol. Energy, vol. 3, no. 4, pp. 8–18, 1959. » .

[16] « Les différents types de cellules photovoltaïques - disponible sur <https://www.ecosources.info/dossiers/> consulté le 22 juin 2017 ».

[17] « "www.futurasciences.com/magazines/environnement/infos/dossiers/d/developpementdurablecellules-photovoltaïques-coeur-panneaux-solaires-1688/." ».

[18] «A. Bouraiou, "Élaboration et Caractérisation des Couches Minces CuInSe₂ par Électrodéposition" , p. 165,2009. »

[19] «V. V. Tyagi, N. A. A. Rahim, N. A. Rahim, et J. A. /L. Selvaraj," Progress in solar PV technology: Research and achievement ", vol. 20, p. 443-461, avr. 2013»

[20] « Pv Magazine. First Solar raises bar for CdTe with 21.5% efficiency record. <http://www.pv-magazine.com/news/details/beitrag/first-solar-raises-bar-forcdte-with215-efficiency-record100018069/>, 2015 ». .

[21] « KANOUN Ahmed-Ali "Etude théorique et prédictive des nouveaux matériaux pour conception des cellules solaires et applications photovoltaïques" ,p238,2019 »

[22] « Z. El Jouad, "Réalisation et caractérisation des cellules photovoltaïques organiques," PhDThesis, Université d'Angers, p108,2016 ».

[23] « Le photovoltaïque organique disponible sur <https://mrmondialisation.org/lephotovoltaïque-organique-fait-un-bon-de-geant-grace-a-une-decouverte/le-10-mars-2016> ».

[24] « Des cellules photovoltaïques organiques atteignent un rendement de conversion de 25 % – disponible sur <https://www.pv-magazine.fr> consulté le /2020/03/23/ ».

[25] « C. B. Jurca"Synthèse et caractérisation de pérovskites doubles magnétorésistives dérivées de Sr₂FeMoO₆ "2004 ,p. 148 »

[26] « Omar Ben Mya "Synthèse et Caractérisation de la pérovskite La_{1-x}Sr_xFe_{0.7}Ni_{0.3}O₃",p136 ,2015».

[27] « O. Ourahmoun "Les cellules solaires à base de matériaux" , Vol. 21 N°4, p. 6, 2018. »

[28] « Cellule solaire à pérovskite disponible sur <https://www.lechodusolaire.fr/cellule-solaire-a-perovskite-solliance-atteint-rendement-de-135-substratsouple/>consulté le

Bibliographies

22/ 11 /2017 ». .

- [29] « P. G. V. Sampaio et M. O. A. González, "Photovoltaic solar energy: Conceptual framework" .vol. 74, p. 590-601. 2017».
- [30] « L'EPFL allonge la durée de vie des cellules solaires à pérovskites -disponible sur <https://www.heidi.news/sciences/> consulté le 13 octobre 2020 ». .
- [31] « <https://www.enerzine.com/nouveau-procede-de-production-de-cellulesphotovoltaiques-a-perovskites/31041-2020-04> ». .
- [32] « <https://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/physique-cellulesphotovoltaiques-dopees> consulté le 11/11/2016 ».
- [33] « <https://onlinelibrary.com/doi/full/10.1002/pip.3228> 2022
- [34] pérovskite disponible sur “<https://www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency-chart.png>” consulté 2017
- [35] « Turning up the light », Science 342, 794-797 (2013)
- [36] Zouhair El Jouad. Réalisation et caractérisation des cellules photovoltaïques organiques. Physique[physics]. Université d'Angers, 2016. Français. NNT : 2016ANGE0022. tel-01443621.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] Global Market outlook for photovoltaics until 2019. Solar Power Europe.
- [42] P. Umari, E. Mosconi & Filippo De Angelis. (2014). Relativistic GW calculations on CH₃NH₃PbI₃ and CH₃NH₃SnI₃ Perovskites for Solar Cell Applications. Scientific Reports, 4, 4467.
- [43] 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

Bibliographies

- and CsPbX₃ (X=Cl, Brn I). J. of the Korean Phys. Soc., 44(4), 889-893.
- [44] "Solar Generation V" Greenspace-European. Photovoltaic Industry Association.2009
- [45] M. I. Ahmed, A. Habib & S. S. Javid. (2015). Perovskite Solar Cells: Potentials, Challenges, and Opportunities. Hindawi.
- [46] E. Knittle & R. Teanloz. (1987). Synthesis and Equation of State of (Mg,Fe)SiO₃ Perovskite to Over 100 Gigapascals. Science, 235, 668-670.
- [47] M. M. Lee, J. Teuscher, T. Miyasaka, T. N. Murakami et H. J. Snaith, « Cellules solaires hybrides efficaces basées sur des pérovskites aux halogénures organométalliques méso-superstructurés », Science, vol. 338, non. 6107, p. 643-647, 2012.
- [48]«R. Belchi, " Architectures à base de nanostructures de carbone et TiO₂ pour le photovoltaïque "2019, p. 297.»
- [49] «S. Ito *et al* " Fabrication of thin film dye sensitized solar cells with solar to electric power conversion efficiency over 10% ", vol. 516, n° 14, p. 4613-4619,2008.»
- [50] « J.-W. Lee et N.-G. Park, "Two-step deposition method for high-efficiency perovskite solar cells "vol. 40, n° 8, p. 654-659,2015. »
- [51] «D. Wang, M. Wright, N. K. Elumalai, et A. Uddin," Stability of perovskite solar cells "vol. 147, p. 255-275, avr. 2016.»
- [52] Numerical simulations of perovskite thin-film solar cells using a CdS hole blockinglayer Journal of Vacuum Science & Technology B **36**, 04G105 (2018)
- [53] Numerical simulations of perovskite thin-film solar cells using a CdS hole blockinglayer Journal of Vacuum Science & Technology B **36**, 04G105 (2018)
- [54] Thickness Dependence of Window Layer on CH₃NH₃PbI₃-XClX Perovskite Solar Cell 28 July 2020
- [55] Journal of Power Sources 2017