



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID - TLEMCCEN

MEMOIRE

Présenté à :

FACULTE DES SCIENCES – DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

MASTER EN PHYSIQUE

Spécialité : Physique Energétique et Energies Renouvelables

Par :

Melle. Chahid Fatima Zahra

Sur le thème

Modélisation d'une cellule photovoltaïque à pérovskite par le logiciel GPVDM

Soutenu publiquement le 12 / 06 / 2024 à Tlemcen devant le jury composé de :

Dr BOUCHAOUR Mama	MCA	Université de Tlemcen	Présidente
Mme DAHMANI Nadia	MCA	Université de Tlemcen	Encadrante
Dr BABA AHMED Nassim	MCA	Université de Tlemcen	Examinateur
Mme OTMANI Fatima Zohra	MAA	Université de Tlemcen	Co-encadrant

Année Universitaire : 2023 ~ 2024



Dédicace :

Je dédie cette réussite et ce travail à la femme forte qui m'a donné Naissance, à celle qui m'a soutenu avec tout ce qu'elle avait et plus encore, à celle qui m'a aidée et encouragée à y parvenir malgré les difficultés que j'ai rencontrées tout au long de ces années. Je dédie mon succès à maman ♥ J'espère que Dieu t'accordera la santé et le bonheur et prolongera ta vie. Merci, maman, je t'aime

Je dédie mon travail à mon père ♥ Autant de phrases et d'expressions aussi éloquentes soient -elle ne sauraient exprimer ma gratitude et ma reconnaissance. Je te dois ce que je suis Je suis aujourd'hui et ce que sera demain et je ferai toujours de mon mieux pour rester votre fierté. Que Dieu ne vous décevra jamais. Que Dieu vous accorde la santé et le bonheur.

*A mes frères, Mohamed Tahar ♥ Abdelhak ♥ et ma sœur Hanane ♥
Vous mon côté ferme et inflexible, Je le dédie à la petite Rayhane ♥
et
Abderahmane ♥ et Abdeljalil ♥*

A mon grand-père ♥ que Dieu lui fasse miséricorde, je te dédie ce travail et à ma Grand-Mère ♥

Je vous aime tous

Fatima Zahra



Remerciements :

Tout d'abord, je remercie ALLAH de m'avoir donné la force et la patience pour aboutir à cette fin heureuse et réussie, alhamdelillah



Je tiens particulièrement à remercier mon encadrante, Madame BACHIR Nadia maitre de conférences A, pour son grand aide et ses conseils précieux, et pour son encouragement et sa gentillesse. Bien évidemment je voudrais remercier Madame OTMANI Fatima Zohra Maître-Assistante A, pour leurs encouragements et aides.

Mes remerciements s'adressent également aux membres de jury :
Madame BOUCHAOUR Mama Maître de conférences A, à l'université de Tlemcen, de vouloir présider le jury de ce master,
Monsieur NASSIM Baba Ahmed maitre de conférences A, à l'université de Tlemcen, d'avoir accepté d'examiner ce mémoire.

Chahid Fatima Zahra

Table de matière :

Dédicace.....	I
Remerciements.....	II
Table de matière.....	III
Listes des figures.....	VII
Listes des tableaux.....	XI
Listes des abréviations.....	XII
Chapitre1 : Evolution des cellules solaires.....	5
1.1 Introduction.....	5
1.2 Le soleil.....	5
1.3 Energie solaire photovoltaïque.....	5
1.4 Principe de l'effet photovoltaïque.....	5
1.5 Histoire des cellules photovoltaïques.....	6
1.6 Définition de la cellule solaire.....	7
1.7 Principe de fonctionnement.....	8
1.8 Caractéristiques électriques de la cellule photovoltaïques.....	9
1.8.1 Le courant de court-circuit I_{cc}	9
1.8.2 La tension de circuit ouvert V_{co}	9
1.8.3 La puissance maximale p_m	10
1.8.4 Le facteur de forme EF.....	10
1.8.5 Le rendement.....	11
1.9 Les générations des cellules photovoltaïques.....	11
1.9.1 Première génération.....	12
1.9.1.a Monocristallin.....	13
1.9.1.b Polycristallin.....	14
1.9.1.1 Avantages de la 1ère génération.....	14
1.9.1.2 Inconvénients de 1ère génération.....	14
1.9.2 Deuxième génération : Couches minces.....	15
1.9.2.a Silicium amorphe.....	15
1.9.2.b Tellure de cadmium (CdTe).....	16
1.9.2.c Le sélénure de cuivre et indium (CIS ou CIGS).....	16
1.9.2.1 Avantages de 2eme génération.....	16
1.9.2.2 Inconvénients de 2ème génération.....	17

1.9.3	La troisième génération : Photovoltaïque émergent.....	17
1.9.3.a	La filière organique	17
1.9.3.b	La filière des pérovskites	18
1.9.3.1	Avantages de 3 ^{ème} génération.....	19
1.9.3.2	Inconvénients de 3 ^{ème} génération	19
1.10	Conclusion	19
Chapitre2	: Propriétés des matériaux pérovskites.....	24
2.1	Introduction	24
2.2	Historique	24
2.3	Structure cristallographique de pérovskite	25
2.4	Structure morphologique de la pérovskite.....	25
2.5	Propriétés structurales des pérovskites hybrides	26
2.6	Conditions de stabilité d'une structure pérovskite	27
2.6.1	Facteur de tolérance t	27
2.6.2	L'ionicité des liaisons anions-cations	27
2.7	Type des pérovskites.....	27
2.7.1	Structure pérovskite tétragonale.....	28
2.7.2	Structure pérovskite orthorhombique	28
2.7.3	Structure pérovskite rhomboédrique	29
2.7.4	Structure pérovskite monoclinique et triclinique	30
2.7.5	Polymorphisme.....	30
2.8	Propriétés électriques.....	30
2.8.1	La structure électronique	31
2.8.2	Absorption optique.....	32
2.8.3	Densité optique.....	33
2.8.4	Photoluminescence (PL)	33
2.9	Principe de fonctionnement de la cellule solaire à base de pérovskite.....	35
2.10	Techniques de fabrications des couches en pérovskite	36
2.11	Architecture des cellules Pérovskites	37
2.12	Cellules tandem	38
2.12.1	Configuration 2T (deux terminaux)	40
2.12.2	Configuration 4T (quatre terminaux)	40
2.13	Cellules organiques.....	41
2.13.1	Principe de fonctionnement de cellule organique	41
2.14	Conclusion	42

Chapitre3	: Présentation du fonctionnement du logiciel GPVDM	49
3.1	Introduction	49
3.2	Historique de GPVDM	49
3.3	Définition de GPVDM	49
3.4	Etapas à suivre pour faire une simulation de cellules avec le GPVDM	50
3.5	Types de couches de GPVDM	54
3.6	Théorie de la modélisation de la diffusion de dérive	54
3.6.1	Transport par transporteur de charges	54
3.6.1.a	Equation de continuité électronique	55
3.6.1.b	Equation de continuité de trou	55
3.6.2	Potentiel électrostatique	56
3.6.3	Piégeage et recombinaison de porteurs hors équilibre à l'aide des états de piège Shockley-Read-Hall :	56
3.6.4	Recombinaison d'équilibre Shockley-Read-Hall :	57
3.7	Le modèle optique	57
3.8	Les avantages de GPVDM	57
3.9	Conclusion	58
Chapitre4	: Etude des propriétés d'une cellule pérovskite par le logiciel GPVDM	61
4.1	Introduction	61
4.2	Simulation de la pérovskite hybride	61
4.3	Les paramètres de la cellule étudiée	61
4.4	Résultats de la simulation	62
4.4.1	Effet de la variation de l'épaisseur des différentes couches sur Les caractéristiques de la cellule pérovskite	62
4.4.1.1	La couche FTO	62
4.4.1.2	La couche ETL	65
4.4.1.3	La couche Pérovskite	66
4.4.1.4	La couche HTL	68
4.4.1.5	La couche Au	69
4.4.2	Les caractéristiques de la cellule pérovskite hybride optimisée	71
4.4.2.1	Caractéristique iv de la cellule pérovskite hybride	72
4.4.3	Effet de température sur les caractéristiques de la cellule pérovskite hybride	73
4.4.4	Effet de la mobilité des porteurs de charges sur les caractéristiques de la cellule hybride à base de pérovskite	77

4.4.5	Propriétés optiques de la cellule pérovskite hybride	79
4.4.6	Simulation de la cellule Tandem -Si -Pérovskite	81
4.4.6.1	Les matériaux utilisés dans les couches de la cellule avec leurs épaisseurs.....	81
4.4.6.2	Les paramètres de la cellule tandem -Si -Pérovskite étudiée.....	82
4.4.6.3	Caractéristique <i>iv</i> de la cellule tandem -Si -Pérovskite	83
4.4.7	Simulation de la cellule Organique	84
4.4.7.1	Les matériaux utilisés dans les couches de la cellule organique avec leurs épaisseurs.....	85
4.4.7.2	Les paramètres de la cellule organique étudiée	85
4.4.7.3	Caractéristique <i>iv</i> de la cellule organique	86
4.5	Comparaison entre les résultats obtenus pour les trois types de pérovskite ..	87
4.6	Conclusion	89

Liste des figures :

Figure 1.1 : Principe de fonctionnement de l'effet photovoltaïque	6
Figure 1.2 : Histoire de la cellule photovoltaïque	7
Figure 1.3 : Principe du fonctionnement de la cellule photovoltaïque.....	9
Figure 1.4 : Caractéristiques courant tension d'une cellule solaire éclairée	10
Figure 1.5 : Les Génération des cellules solaires	11
Figure 1.6 : NREL Chart-Evolution des rendements records pour chaque type de cellules photovoltaïques au cours du temps-cellules certifiées	12
Figure 1.7 : La première génération des cellules solaires	12
Figure 1.8 : Exemple de chaîne de production cellules photovoltaïques en Silicium .	13
Figure 1.9 : Cellule solaire à base de Silicium monocristallin	13
Figure 1.10 : Cellule solaire à base de Silicium polycristallin	14
Figure 1.11 : La deuxième génération des cellules solaires	15
Figure 1.12 : Cellule solaire à base de Silicium amorphe	15
Figure 1.13 : Cellule solaire au tellure Cadmium	16
Figure 1.14 : Cellule solaire au tellure de CdS	16
Figure 1.15 : La troisième génération des cellules solaires.....	17
Figure 1.16 : Cellule solaire organique	18
Figure 1.17 : Cellule solaire à pérovskite.....	19
Figure 2.1 : L'évolution des recherches faites sur les cellules solaires à base de pérovskite entre 2012 et 2017, selon une recherche sur Web of Science.....	25
Figure 2.2 : Structure pérovskite ABX_3	25
Figure 2.3 : Structure cristalline de la pérovskite hybride	27
Figure 2.4 : Le rapport entre les maille cubique, orthorhombique et rhomboédrique de pérovskites.....	28
Figure 2.5 : Illustration des symétries cubique, tétragonale et orthorhombique de la pérovskite : (a) et (b) représentation des rotations octaédriques (octaèdre BO_6 en bleu et oxygène en rouge). (c) Maille élémentaire des trois symétries.....	29
Figure 2.6 : a-Structure pérovskite rhomboédrique de LaAlO_3 obtenu par la distorsion de la structure cubique idéale ABO_3 le long de la diagonale du cube, b- Structure rhomboédrique de la pérovskite.....	29

Figure 2.7 : Modifications dans la structure cristallographique de l'oxyde $BaTiO_3$...	30
Figure 2.8 : Structures de bandes de $[MAPbI]_3$ (a) sans couplage spin-orbite (SOC) Et (b) avec le couplage spin-orbite (SOC)	31
Figure 2.9 : Réévaluation des capacités d'absorption de matériaux clés en Photovoltaïque.....	32
Figure 2.10 : Spectres d'absorption de $MA_{1-x}Sn_xPb_{1-x}I_3$ sur une couche de TiO_2 pour Différentes valeurs de x.....	33
Figure 2.11 : Structure cristalline du $CH_3NH_3SnI_3$ avec une conformation tétraгонаle de la maille de la pérovskite.....	34
Figure 2.12: Courbe d'absorption du matériau $CH_3NH_3SnI_3$	35
Figure 2.13 : Le schéma de transfert d'électrons et les processus de recombinaison dans les cellules solaires utilisant la pérovskite comme matériau de base sont présentés dans la référence.....	36
Figure 2.14 : Diverses techniques pour fabriquer des films de pérovskites.....	37
Figure 2.15 : Les quatre configurations les plus couramment employées dans les Cellules solaires à pérovskite : (a) mésoporeuse, (b) avec couche de recouvrement (Capping-layer), (c) n-i-p planaire, et (d) p-i-n planaire.....	37
Figure 2.16 : Représentation d'une structure en tandem.....	39
Figure 2.17 : Cellules solaires en tandem reliées a) par deux bornes et b) Quatre bornes.....	39
Figure 2.18 : La variation l'efficacité de la cellule en tandem en fonction de l'énergie de la bande interdite de la pérovskite.....	40
Figure 2.19 : Structure de la cellule organique.....	41
Figure 2.20 : Principe de fonctionnement de la cellule organique.....	42
Figure 3.1 : Interface GPVDM.....	50
Figure 3.2 : Création d'une nouvelle simulation.....	50
Figure 3.3 : Simulation de pérovskite.	51
Figure 3.4 : Enregistrement de la simulation et les résultats de simulation	51
Figure 3.5 : Changement des épaisseurs et des matériaux formant la cellule étudiée.	52
Figure 3.6 : Changement des paramètres électriques	52

Figure 3.7 : Exécution de la simulation.....	53
Figure 3.8 : Les résultats de simulation.....	53
Figure 4.1 : Variation de la tension du circuit ouvert V_{oc} en fonction de l'épaisseur de la couche FTO	63
Figure 4.2 : Variation de la puissance de conversion d'énergie PCE en fonction de l'épaisseur de la couche FTO.....	64
Figure 4.3 : Variation de V_{oc} en fonction de l'épaisseur de la couche de transport d'électrons ETL (TiO_2).....	65
Figure 4.4 : Variation de la puissance de conversion de l'énergie en fonction de l'épaisseur de la couche de transport d'électrons ETL	66
Figure 4.5 : Variation de V_{oc} de la couche pérovskite en fonction de l'épaisseur	67
Figure 4.6 : Variation de la puissance de conversion d'énergie en fonction de l'épaisseur de la couche pérovskite.....	67
Figure 4.7 : Variation de V_{oc} en fonction de l'épaisseur de la couche de transport de trous HTL	68
Figure 4.8 : Variation la puissance de conversion d'énergie en fonction de l'épaisseur de la couche de transport des trous HTL	69
Figure 4.9 : Variation de la tension de circuit ouvert V_{oc} en fonction de l'épaisseur de la couche arrière	70
Figure 4.10 : Variation de la puissance de conversion de l'énergie PCE en fonction de l'épaisseur de la couche arrière	71
Figure 4.11 : Variation de la densité du courant électrique en fonction de la tension de la cellule pérovskite hybride initiale et optimisée.....	73
Figure 4.12: Variation de l'efficacité de conversion d'énergie PCE en fonction de la température.....	74
Figure 4.13 : Variation de facteur de remplissage FF en fonction de la température...	75
Figure 4.14 : Variation de V_{oc} en fonction de la température	75
Figure 4.15 : Variation de la densité de courant de court-circuit J_{sc} en fonction de la Température.....	76
Figure 4.16 : Variation du facteur de forme en fonction de la mobilité des porteurs de Charges.....	77
Figure 4.17 : Variation du rendement PCE en fonction de la mobilité des porteurs de Charges	78
Figure 4.18 : Variation du facteur du potentiel au circuit ouvert V_{co} e en fonction de la mobilité des porteurs de charges.....	78

Figure 4.19 : Variation du JSC en fonction de la mobilité des porteurs de charges.....	79
Figure 4.20 : Densité de photons à travers la cellule solaire à base de pérovskite.....	80
Figure 4.21 : Rendement quantique de la pérovskite hybride après l'optimisation.....	80
Figure 4.22 : Caractéristique $j\nu$ de la cellule tandem -Si -Pérovskite.....	83
Figure 4.23 : Caractéristiques $j\nu$ pour la cellule organique.....	86
Figure 4.24 : Caractéristique $j\nu$ des trois types de cellules : Tandem, hybride et organique.....	88

Listes des tableaux :

Tableau 3-1 : Types de couches dans GPVDM	54
Tableau 4-1 : Matériaux utilisés dans les couches de la cellule pérovskite hybride avec leurs épaisseurs avant l'optimisation.	61
Tableau 4-2 : Paramètre électrique de la cellule pérovskite hybride étudiée	62
Tableau 4-3 : Variation des caractéristiques (FF, PCE, V_{co} , JSC) de la cellule solaire n fonction de la température	74
Tableau 4-4 : Variation des caractéristiques (FF, PCE, V_{co} , JSC) de la cellule solaire en fonction de la mobilité des porteurs	77
Tableau 4-5 : Matériaux utilisés dans les couches de la cellule tandem -Si -Pérovskite avec leurs épaisseurs.	81
Tableau 4-6 : Paramètre électrique de la cellule tandem -Si -Pérovskite étudiée	82
Tableau 4-7 : Matériaux utilisés dans les couches de la cellule organique avec leurs épaisseurs.	85
Tableau 4-8 : Paramètre électrique de la cellule organique étudiée	85
Tableau 4-9 : Les caractéristiques des trois types de cellules tandem ; organique et hybride à base de pérovskite	87

Listes des abréviations :

PV : Photovoltaïque

NREL : National *Renewable Energy Laborato*Ry (Laboratoire *natoinal* des énergies renouvelables)

MAPI : Iodure de plomb de *méthylammonium*

Isc : Le courant de court-circuit

Vco : La tension en circuit ouvert

Pmax : Puissance maximale

Pi : Puissance lumineuse incidente

Nu : Le rendement de conversion

SRH : Equation de *Schokley* -Read

PCE : Puissance de conversion d'énergie ou « **RENDEMENT DE LA CELLULE** »

EF : Facteur de forme

ITO : Tin-*doped* Indium Oxide (Oxyde d'indium dopé à l'étain)

ETL : Electron transport layer (Matériau transporteur d'électrons)

HTL : Hole transport layer (Matériau transporteur de trous)

ZnO : Oxide de zinc

GPVDM : "GPVDM *Generalized Photovoltaic Device Model*" (Modèle Généralisé de Dispositif Photovoltaïque en français)

Al : Aluminium

Au : Or

CdTe : tellure de cadmium

CIGS : Cuivre-Indium-Gallium-Sélénium

Introduction Générale

Introduction Générale :

Introduction Générale :

En raison des problèmes provoqués par le réchauffement climatique, il est devenu nécessaire de chercher des solutions pour atténuer ou limiter ce phénomène. Les énergies renouvelables sont l'une des stratégies les plus importantes à adopter pour faire face à ce phénomène mondial. L'énergie solaire est l'une des énergies renouvelables respectueuse de notre environnement. Elle provient du soleil et elle est basée sur la conversion de la lumière en énergie électrique utilisable à l'aide de cellules solaires grâce au phénomène de l'effet photovoltaïque.

Parmi les paramètres pris en compte dans la production de l'énergie électrique figure le coût et le rendement, c'est pourquoi la génération de silicium a été remplacée par les cellules pérovskites qui possèdent un coefficient d'absorption plus élevé et un coût de production plus faible.

Dans ce travail, nous étudions les propriétés électriques et optiques de la cellule pérovskite pour comprendre les mécanismes de cette cellule. Pour cela, nous varions les épaisseurs des couches actives et même les autres couches afin d'obtenir une meilleure rentabilité en employant le logiciel GPVDM, Nous passons ensuite à l'effet de la température sur le rendement de la cellule solaire.

Nous présentons aussi les caractéristiques I-V et J-V pour les cellules pérovskite et même pour les cellules Tandem à base de Silicium et pérovskite et la cellule organique à base de pérovskite.

Pour les propriétés optiques, nous représentons le rendement quantique de la cellule en fonction de la longueur d'onde, nous donnons aussi le spectre des niveaux d'énergie de la cellule ainsi que la distribution de la densité de photons dans les hétérojonctions des couches de la cellule en fonction de la longueur d'onde.

Notre travail est organisé comme suit :

Dans le premier chapitre, nous présentons l'évolution des cellules solaires au cours du temps, nous apprendrons à connaître c'est quoi l'effet photovoltaïque, et les générations des cellules solaires.

Dans le deuxième chapitre, nous allons entrer dans notre thème, en mettant en évidence, les propriétés structurales, électriques et optiques des cellules à base de pérovskite en donnant la structure cristalline et la technique de fabrication ainsi que l'architecture de la cellule utilisée

Dans le troisième chapitre, nous présentons le modèle de simulation utilisé en récurrence GPVDM "Global Photovoltaic Device Model" utilisé pour étudier et analyser le comportement des cellules solaires photovoltaïques. Ce modèle permet de prédire les performances des cellules solaires en fonction de différents paramètres et conditions.

Introduction Générale :

Dans le quatrième chapitre nous présentons les résultats de la simulation en particulier l'effet des épaisseurs et de la température et même la mobilité des électrons sur les caractéristiques des cellules pérovskites en particulier le rendement PCE, V_{co} , I-V et J-V et nous étudions aussi les propriétés optiques tels que le rendement optique EQE.

Nous terminons ce travail avec une conclusion générale.

Chapitre 1 : Evolution des cellules solaires

Chapitre1 : Evolution des cellules solaires

Chapitre1 : Evolution des cellules solaires

1.1 Introduction :

Les énergies renouvelables où les énergies vertes sont considérées comme les plus utilisées par l'homme. Ce sont des énergies inépuisables et non polluantes au contraire des énergies non renouvelables qui provoquent : la pollution de l'air, la terre et la mer et le changement climatique.

L'énergie solaire est l'une des types de ces énergies propres, elle a deux axes principaux :

- **Energie solaire thermique** : donne la chaleur.
- **Energie solaire photovoltaïque** : donne l'électricité.

1.2 Le soleil :

Le soleil est une étoile centrale du système solaire, magnétiquement active. Il est essentiellement constitué de gaz et du plasma ; il est quasiment sphérique son diamètre est à peu près 1 392 684 kilomètres correspondant à 109 fois le diamètre de la terre avec une masse de 2×10^{30} kg. En effet, le soleil constitue approximativement 99.98% de la masse du système solaire , il présente 330 000 fois la masse de la Terre.[1],[2]

1.3 Energie solaire photovoltaïque :

La conversion directe d'une fraction de la lumière en électricité crée l'énergie solaire photovoltaïque, le procédé repose sur l'usage de cellules photovoltaïques (PV) qui exploitent l'effet photovoltaïque. L'exposition de la cellule à la lumière entraîne une tension électromotrice due à ce phénomène physique, cette tension peut fluctuer selon les matériaux utilisés pour construire la cellule.[3],[4]

1.4 Principe de l'effet photovoltaïque :

La conversion effectuée par les cellules photovoltaïques est fondée sur les trois mécanismes suivants [5]:

- Le matériau composant le dispositif absorbe les photons (son énergie est plus grande que l'énergie de gap) .[5]
- L'énergie photonique est convertie en énergie électrique, convenable à la génération de paires électron/trou dans un semi-conducteur.[5]
- Collecter les particules entraînées dans la configuration.[5] ,[6]

Chapitre1: Evolution des cellules solaires

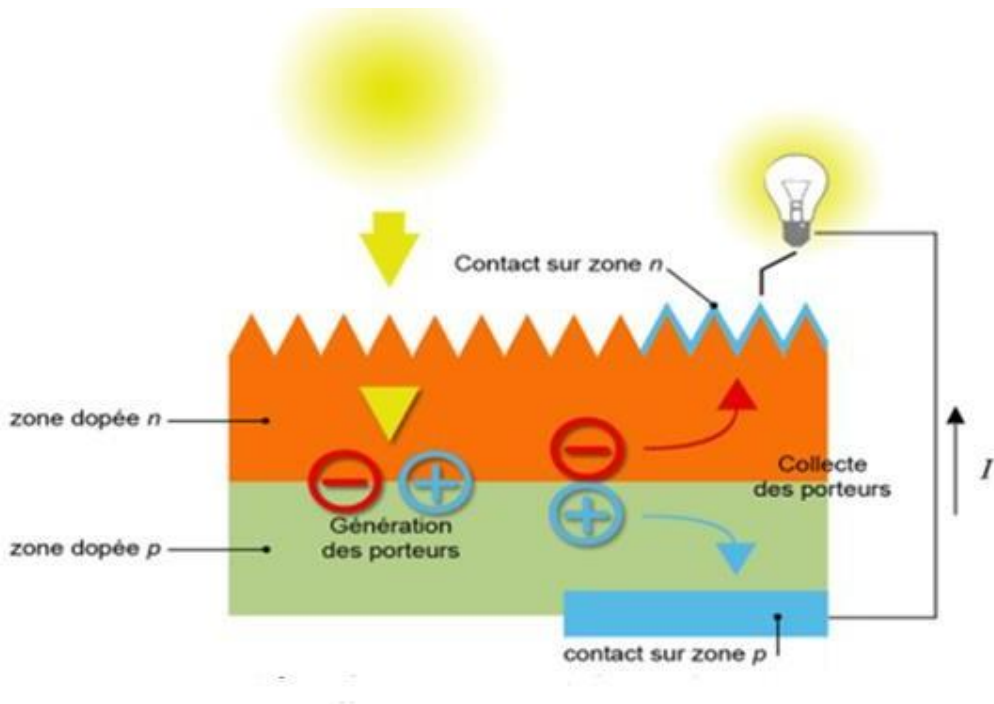


Figure 1.1 : Principe de fonctionnement de l'effet photovoltaïque [7],[8]

1.5 Historique des cellules photovoltaïques :

Les cellules photovoltaïques ont évolué dans le temps comme suit :

- En 1839, le chercheur français, Alexandre Becquerel, a découvert l'effet photovoltaïque. [7],[8]
- En 1875, un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs a été annoncé par l'ingénieur allemand Ernst Werner Von Siemens. [8] , [9]
- En 1876, l'effet photovoltaïque dans la solidification du sélénium a été constaté par Adam et son élève Richard. [8], [10], [12]
- En 1883, l'inventeur américain, Charles Frittes, a créé la première cellule solaire à base de sélénure d'or avec une performance de 1 %.[11],[12]
- En 1939, l'ingénieur américain Russell OHL découvre la jonction P et développe la première cellule solaire au silicium .[7],[8]
- En 1945, les chercheurs américains Gerald Pearson, Daryl Chapin et Calvin Fuller du laboratoire Bell ont réussi à améliorer un panneau solaire avec une rentabilité de 6 % . [13]
- En 1954, les laboratoires Bell toujours (D.M.Chapin,Fuller et G.L.Pearson) ont réalisé la première photopile avec une rentabilité de conversion de 6 % pour l'usage spatiale. [12], [14], [15] ,[16]

Chapitre1 : Evolution des cellules solaires

- En 1958, des cellules solaires ont été envoyées dans l'espace, montées à l'extérieur du satellite vanguard1. En effet, ce satellite était équipé de 6 cellules photovoltaïques et ont fonctionné pendant 8 ans jusqu'en 1967, avec une rentabilité de 9%. [13],[16]
- En 1982, la réalisation mondiale de modules photovoltaïques n'était que de 5 MWc, mais elle a atteint plus de 18 GWc en 2013 [15],[18]
- En 1995, Au Japon et en Allemagne, des projets de toits photovoltaïques connectés au réseau ont été initiés, et ils ont commencé à se généraliser depuis 2001.[16], [17]
- À la fin de 2017, l'agence internationale de l'énergie (l'AIE) a évalué que les capacités photovoltaïques mondiales atteindraient 400 GW électriques.[15] [19]

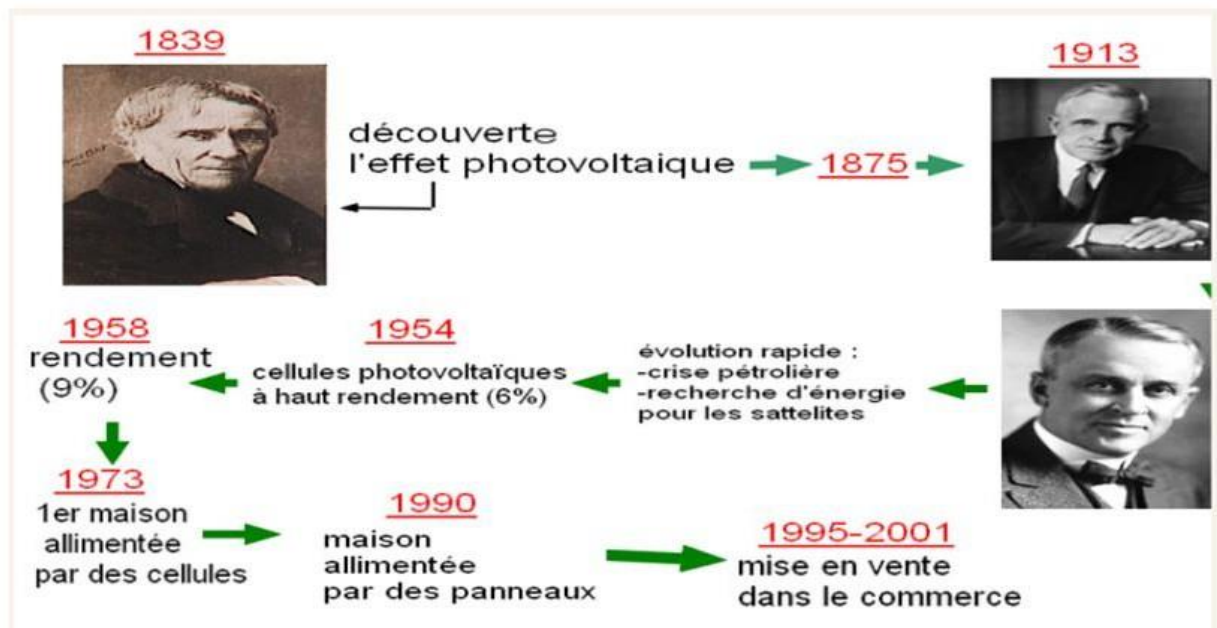


Figure 1.2 : Histoire de la cellule photovoltaïque [17]

1.6 Définition de la cellule solaire :

Diverses couches de matériaux constituent une cellule solaire, chacune remplissant un objectif scientifique. [20]

- La couche la plus considérable est la couche semi-conductrice spécialement traitée. Elle est composée de deux couches différentes (Type « p » et type « n ») et elle est responsable de la transformation de l'énergie solaire en énergie électrique utile grâce à l'effet photovoltaïque.[20]
- Les semi-conducteurs possèdent une couche de matériau conducteur sur chaque face qui récolte l'électricité fournie. [20]

Chapitre1 : Evolution des cellules solaires

- La face avant doit utiliser les conducteurs avec modération afin de ne pas bloquer les grandes quantités du rayonnement solaire d'atteindre le semi-conducteur.[20]
- La face arrière peut-être entièrement recouverte par le conducteur.
- La couche antireflet est la dernière couche. [20] , [21]

Exemple d'une cellule solaire basique

Une cellule solaire basique est composée de différents types de couches.[22]

Le côté exposé au soleil (la couche N) est en phosphore, ce qui admet à la cellule solaire d'élaborer un flux d'électrons lorsque la cellule est percutée par le rayonnement solaire. [22]

Le côté inverse réglé vers le bas (la couche P) est en bore ce qui accorde à la cellule de capter les électrons qui sont dégagés par la couche supérieure à travers le matériau conducteur.[22]

Les panneaux solaires sont des constituants du système solaire, ils sont formés à partir de montages en série ou en parallèle des cellules solaires.[22]

1.7 Principe de fonctionnement :

Le champ électrique est obtenu par la superposition de deux couches dopées du silicium.

L'une des couches de silicium est ainsi dopé en atome de phosphore, le phosphore est un atome qui possède plus d'électrons sur sa couche périphérique que le silicium, ces électrons ne participent pas aux liaisons et ils sont libres de se déplacer. Le dopage dans cette couche est de type N car la charge est négative. [2] , [22]

L'autre couche de semi-conducteur est dopé par le bore, Le bore est un atome qui possède moins d'électrons dans sa couche périphérique que le silicium, Il lui manque un électron pour la réalisation des liaisons. Le bord va donc capter un électron. Cet électron laisse derrière lui un trou de charge positive. Le dopage est ainsi de type P car la charge mobile est positive.[2], [22]

Les électrons et les trous se déplacent par diffusion dans ces deux couches. Au voisinage de leur interface, la diffusion entraîne une recombinaison entre les trous et les électrons, ce phénomène produit une zone neutre électriquement d'atome du phosphore chargé positivement et d'atome de bore chargé négativement. On obtient ainsi un champ électrique au sein du semi-conducteur. Cette région est appelée jonction PN, ce champ électrique s'accompagne de l'apparition d'une divergence du potentiel électrique entre la zone N et la zone P.[2], [22]

Lorsque les rayons de soleil frappent une cellule photovoltaïque sur laquelle on a déposé des bornes. Les photons de la lumière transmettent leur énergie aux électrons qui sont arrachés des atomes et ils laissent des trous. Les électrons et les trous ainsi formés vont avoir tendance à se recombiner parce que le phénomène a lieu au voisinage

Chapitre1 : Evolution des cellules solaires

de la jonction PN. Le champ électrique ainsi formé va contribuer à séparer les charges positives et négatives, les électrons sont repoussés vers la couche N et les trous vers la couche P. Les électrons cherchent à se recombiner avec les trous et ils sont alors obligés de passer par un cercle extérieur pour rejoindre les trous élaborant ainsi un courant électrique continue quand l'appel le **photo courant**. [2], [23]

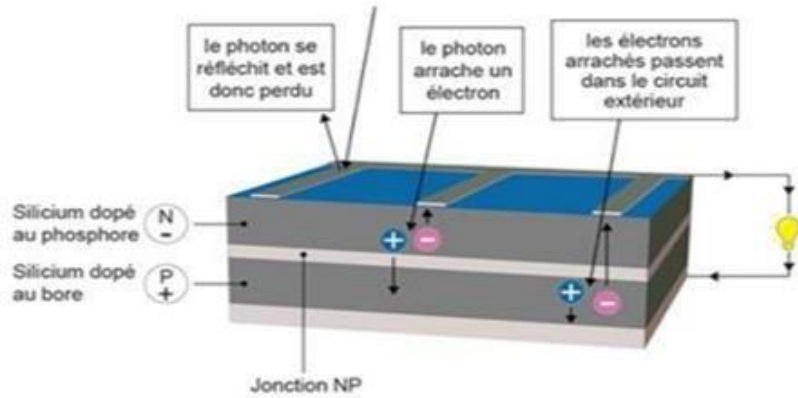


Figure 1.3 : Principe du fonctionnement de la cellule photovoltaïque [23],[24]

1.8 Caractéristiques électriques de la cellule photovoltaïques :

1.8.1 Le courant de court-circuit I_{cc} :

C'est le courant qui correspond au courant maximale fournie quand il est placé en courant court-circuit c'est à dire quand la tension à ces bornes est nulle $I_{cc}=I (V=0)$. [2]

1.8.2 La tension de circuit ouvert V_{co} :

C'est la tension en circuit ouvert, elle correspond à la tension maximale générée quand le courant débit est nul $V_{co}=V(I=0)$. [2]

$$V_{co} = \left(\frac{KT}{q}\right) \ln \left(\frac{I_{cc}}{I_s} + 1\right) \quad (I.1)$$

V_{co} : La tension de circuit ouvert mesurée aux bornes de la cellule photovoltaïque

I_{cc} : L'intensité de court-circuit débitée par la cellule photovoltaïque

I_s : Courant de saturation diode

K : Constant de Boltzmann

T : La température

q : Charge élémentaire

Chapitre1 : Evolution des cellules solaires

1.8.3 La puissance maximale p_m :

Lorsque le produit (V.I) est maximum. Si V_m I_m est la tension et le courant auxquels nous obtenons la valeur maximale, alors la puissance maximale est la surface du plus grand rectangle pouvant être inscrit dans la courbe I(V) (Figure 1.4) de côtés I_m et de longueur V_m . [24]

$$P_{max} = V_{co} \times I_{cc} \quad (I.2)$$

$P_{max}(W)$: La puissance fournie par la cellule photovoltaïque

$V_{co}(V)$: La tension de circuit ouvert mesurée aux bornes de la cellule photovoltaïque

$I_{cc}(A)$: L'intensité de court-circuit débitée par la cellule photovoltaïque

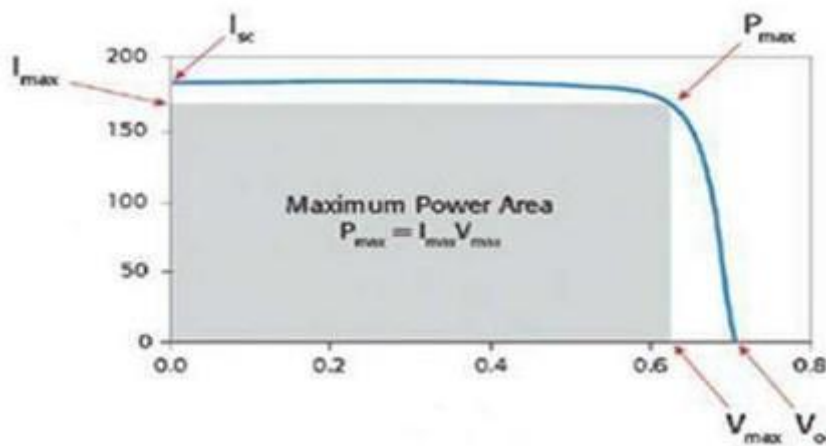


Figure 1.4 : Caractéristiques courant tension d'une cellule solaire éclairée. [25]

1.8.4 Le facteur de forme EF :

Nous appelons le rapport entre la puissance maximale et le produit des I_{CC} et V_{OC} le facteur de forme. Il indique la qualité de la batterie et reflète les effets de deux pertes résistives parasites R_{set} R_{sh} . [24]

$$EF = \frac{V_m \times I_m}{I_{cc} \times V_{oc}} \quad (I.3)$$

Où I_{max} et V_{max} représentent respectivement le courant et la tension du point de fonctionnement qui permet d'extraire le maximum de puissance (P_{max}) de la cellule photovoltaïque.

EF : Le facteur de forme

I_{cc} : L'intensité de court-circuit débitée par la cellule photovoltaïque

V_{co} : La tension de circuit ouvert mesurée aux bornes de la cellule photovoltaïque

R_s : La résistance en série

Chapitre1: Evolution des cellules solaires

R_{sh} : La résistance parallèle

1.8.5 Le rendement :

L'efficacité de transformation d'une cellule solaire est le rapport entre la puissance maximale pouvant être extraite et la puissance rayonnante incidente.[24]

$$Nu = \frac{P_m}{P_i} \quad (I.4)$$

Nu : Le rendement

P_m : La puissance maximale fournie par la cellule photovoltaïque

P_i : La puissance lumineuse incidente

1.9 Les générations des cellules photovoltaïques :

Le domaine des cellules solaires a connu un grand développement afin d'atteindre une rentabilité élevée et une efficacité maximale et un prix approprié pour sa production ce qui a rendu les types de cellules solaires nombreux et variés. Les plus importantes sont divisées en trois générations selon leur développement, les matériaux et les technologies utilisées.

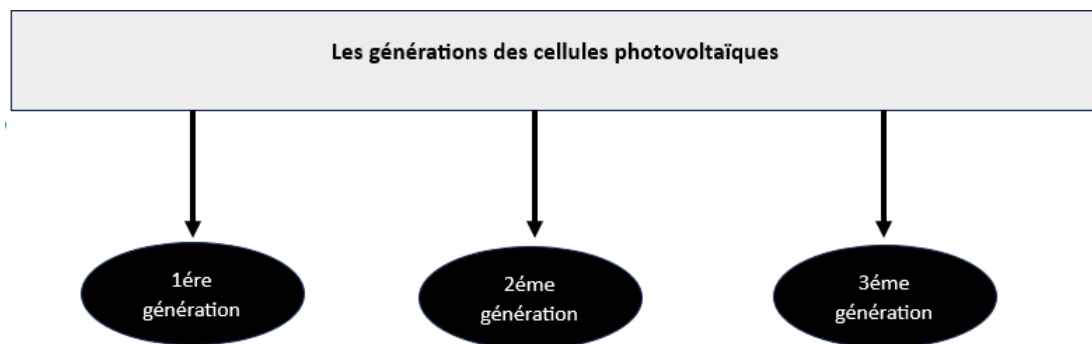


Figure 1.5 : Les Génération des cellules solaires

Chapitre 1 : Evolution des cellules solaires

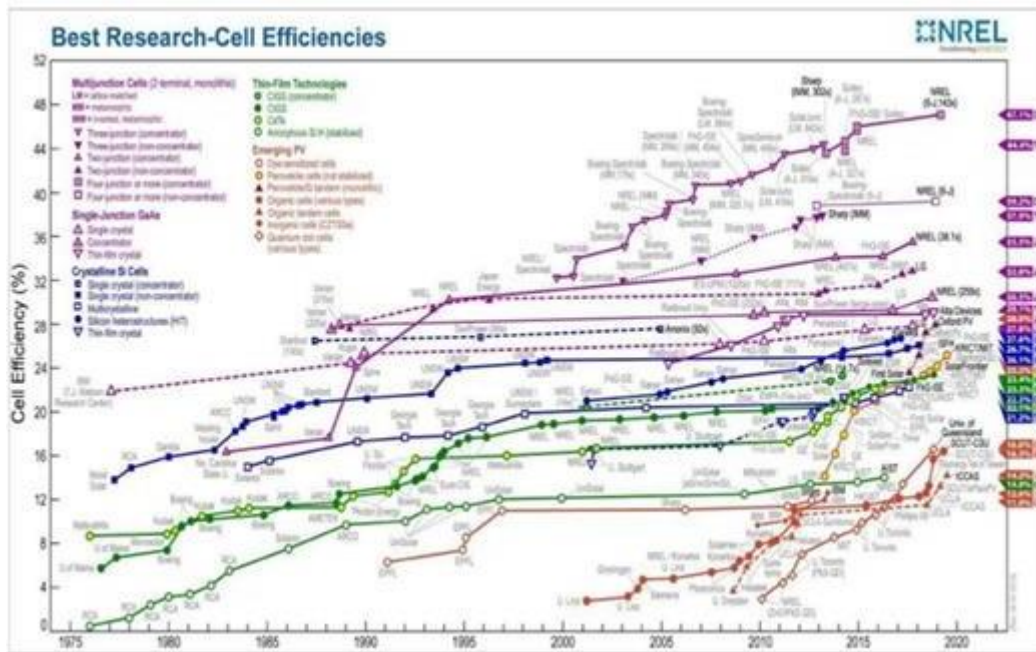


Figure 1.6 : NREL Chart-Evolution des rendements recors pour chaque type de cellules photovoltaïques au cours du temps-cellules certifiées [17],[26]

1.9.1 Première génération :

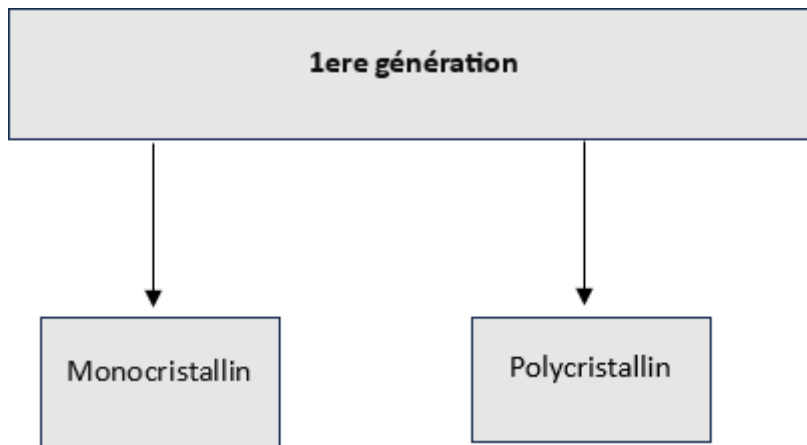


Figure 1.7 : La première génération des cellules solaires

Chapitre1 : Evolution des cellules solaires

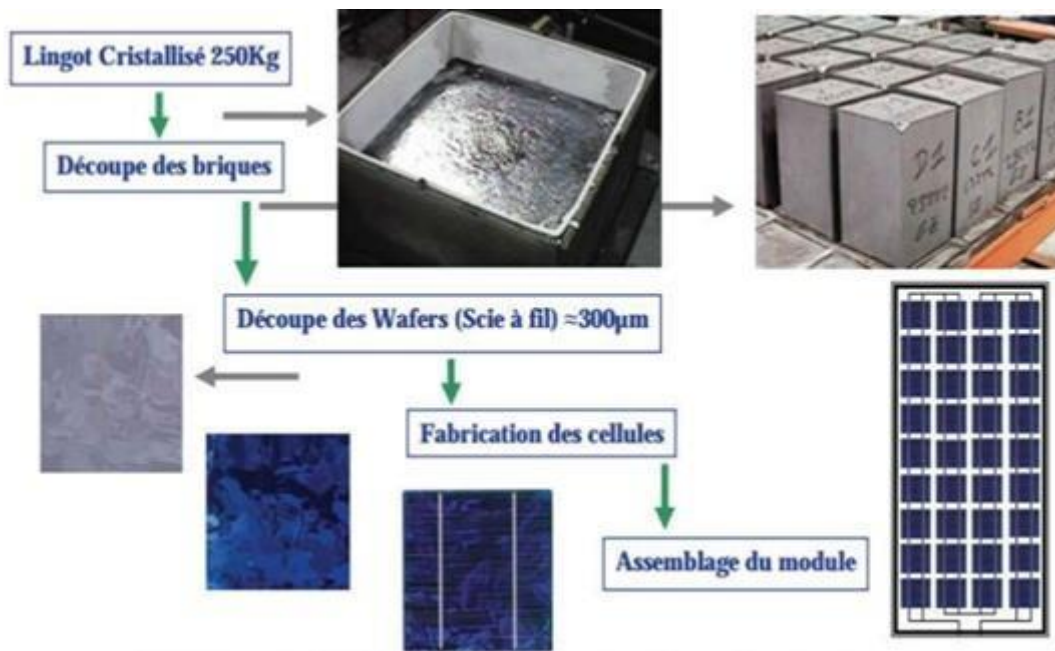


Figure 1.8 : Exemple de chaîne de production cellules photovoltaïques en Silicium [27]

1.9.1.a Monocristallin :

Le monocristallin se structure d'un monocristal, ayant une apparence homogène qui varie entre le gris bleuâtre et parfois le noir. On réalise le monocristallin à partir d'un segment de silicium très pur qui forme un monocristal. Bien que les fabricants utilisent un processus industriel compliqué et coûteux pour le produire, il permet d'atteindre une rentabilité d'environ 20 % pour les cellules solaires.[2]



Figure 1.9 : Cellule solaire à base de Silicium monocristallin [1],[28]

Chapitre1 : Evolution des cellules solaires

1.9.1.b Polycristallin :

Le silicium polycristallin, est une forme spécialisée de silicium différente du silicium monocristallin. Contrairement au silicium monocristallin, qui est constitué d'un seul cristal, le silicium polycristallin est charpenté de plusieurs petits cristaux de tailles et de structure diverses, ce qui lui confère des propriétés différentes.[25],[26]



Figure 1.10 : Cellule solaire à base de Silicium polycristallin [28], [31]

1.9.1.1 Avantages de la 1ère génération

Les cellules photovoltaïques dans cette génération ont plusieurs avantages parmi lesquels :

- Cette technologie est très mature car elle est liée à l'industrie du semi-conducteur.[2]
- Ils ont des performances intéressantes.[2]
- Une durée de vie qui pourrait être prolongée jusqu'à 40 ans.[2]

1.9.1.2 Inconvénients de 1ère génération :

Malgré les multiples avantages de cette génération, il y a quelques inconvénients

- Plus la cellule est exposée au soleil plus elle se chauffe et le rendement diminue.[27]
- Au niveau du coût le contact se fait en Argent (Ag) et cela représente 5 % du coût du module car l'Argent est rare et cher.[27]
- L'émission de gaz à effet de serre quand on fabrique la cellule.[27]

Chapitre1 : Evolution des cellules solaires

1.9.2 Deuxième génération : Couches minces :

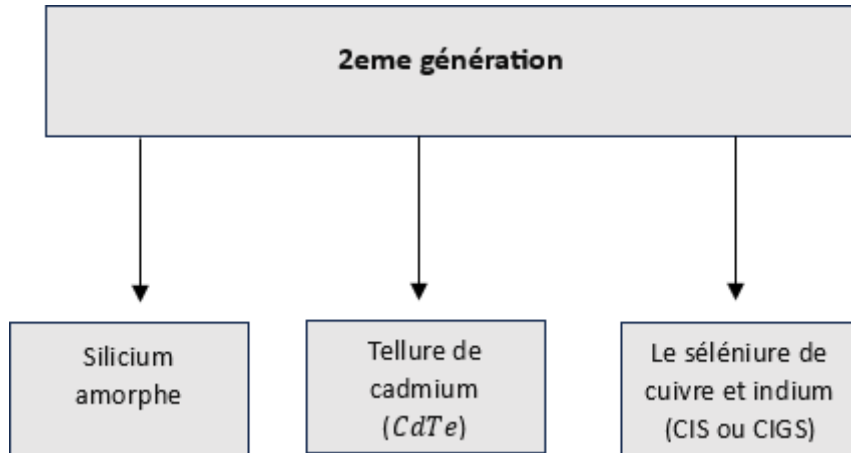


Figure 1.11 : La deuxième génération des cellules solaires

1.9.2.a Silicium amorphe :

Le premier type de la deuxième génération est le silicium amorphe, Le silicium amorphe a été découvert en 1976. Son arrangement atomique est chaotique et non cristallin, mais il a une capacité d'absorption plus importante que le silicium cristallin. Néanmoins, bien qu'il ait un avantage en termes d'absorption, il souffre d'une baisse de la mobilité des charges électriques, ce qui se traduit par une faible rentabilité de conversion.[2]



Figure 1.12 : Cellule solaire à base de Silicium amorphe [2],[33]

Chapitre1: Evolution des cellules solaires

1.9.2.b Tellure de cadmium (CdTe) :

Le tellure de cadmium est un semi-conducteur de type P qui nécessite un autre matériau de type N (Cds, SnO₂, etc.) pour créer une jonction p-n [28], il a été étudié en 1960 et développé en 1972.[29]

Les cellules solaires Cds/Cdte sont réalisées en évaporant une fine couche de Cds sur une couche de verre conducteur, puis en évaporant une épaisse couche de CdTe. Les cellules sont ensuite traitées à une température de 450°C pendant une courte période. [30].



Figure 1.13 : Cellule solaire au tellure Cadmium [2],[37]

1.9.2.c Le sélénium de cuivre et indium (CIS ou CIGS) :

CIGS est un semi-conducteur accompagné par un matériau de type N pour créer une jonction p-n. Les cellules CIGS à hétérojonction, qui comportent des absorbeurs en cuivre, gallium, indium et sélénium, ont été réalisées par « S. Wagner et al. de Bell Telephone Company » en 1975 .[31]



Figure 1.14 : Cellule solaire au tellure de *CiGS* [2],[37]

1.9.2.1 Avantages de 2eme génération :

Parmi les avantages des cellules solaires deuxième génération [2]

- Leurs faibles couts.[2]

Chapitre1 : Evolution des cellules solaires

- Flexible (substrats flexibles, grandes surfaces).[2]
- Intégration dans l'habitat (verre).[2]

1.9.2.2 Inconvénients de 2ème génération :

- Rendement de conversion limitée.[27]
- Ressources en terre rare limitée.[27]
- Toxicité de cadmium.[27]

1.9.3 La troisième génération : Photovoltaïque émergent

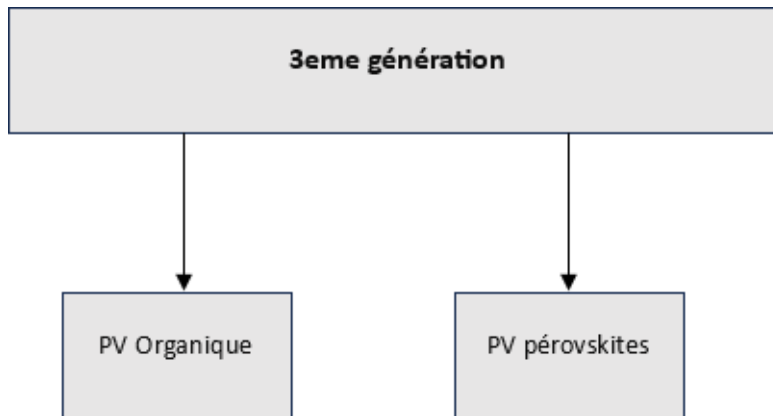


Figure 1.15 : La troisième génération des cellules solaires

1.9.3.a La filière organique :

Les batteries organiques sont fabriquées à partir de semi-conducteurs organiques. Ils ont été développés en 1970 pour réduire le coût de la production d'énergie photovoltaïque,[32]. Ces cellules se composent d'une couche active, qui est placée entre deux couches conductrices, habituellement l'une de ces couches est d'une épaisseur inférieure à 10 nm. Ces cellules sont encore en phase de recherche avec une rentabilité moindre à 5%.[2]

Chapitre1 : Evolution des cellules solaires



Figure 1.16 : Cellule solaire organique [2],[37]

1.9.3.b La filière des pérovskites :

La première cellule pérovskite a été décrite par Gustave Rose en 1830 [33]. Son nom vient du minéralogiste russe Alexeyevich von Perovsky. Il est composé de calcium et de titane et répond à la formule chimique CaTiO_3 . [34],[35]

Les pérovskites se distinguent en deux catégories principales : d'une part, les pérovskites constituées d'oxydes, qui sont de nature inorganique, et d'autre part, les pérovskites halogénées, pouvant être soit inorganiques soit hybrides, c'est-à-dire combinant des composés inorganiques avec des composés organiques. [36],

Pour les pérovskites oxydes, la composition générale est définie comme suit : X représente un atome d'oxygène (O), B est un cation métallique tétravalent tel que Ti^{4+} , Si^{4+} ou Sn^{4+} et A désigne un cation divalent tel que Mg^{2+} , Ca^{2+} , Sr^{2+} , Ba^{2+} etc. [35]

Dans le contexte des pérovskites halogénées, la composition varie comme suit : X représente un atome d'halogène tel que Cl^- , Br^- , ou I^- , tandis que B désigne un métal ionique divalent tel que Pb^{2+} , Sn^{2+} ou Ge^{2+} . L'élément A peut être un métal alcalin monovalent tel que Li^+ , Na^+ , K^+ , Rb^+ ou Cs^+ , lorsqu'il s'agit d'une pérovskite organique halogénée. Dans le cas des matériaux hybrides, l'élément A peut aussi être une petite molécule organique telle que le méthyl ammonium ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}^+ = \text{MA}$) ou le formamidinium ($\text{HC}[\text{NH}_2]^{2+} = \text{FA}$). [35]

Chapitre1 : Evolution des cellules solaires



Figure 1.17 : Cellule solaire à pérovskite [14]

1.9.3.1 Avantages de 3ème génération :

Très bas coût.[2]

Technologie non polluante.[2]

Il n'y a pas de matériaux rares dans cette technologie.[2]

1.9.3.2 Inconvénients de 3eme génération :

La rentabilité de conversion est très faible.[27]

Problème de stabilité particulier quand les exposés à la lumière UV.[27]

Faible durée de vie.[27]

1.10 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons abordé la définition de l'énergie solaire photovoltaïque, ainsi que les cellules solaires et le principe de l'effet photovoltaïque. Nous avons expliqué la structure de cellule photovoltaïque. En fin de chapitre nous avons aussi présenté les diverses générations de cellule solaire.

Chapitre1: Evolution des cellules solaires

Références :

- [1]Z. El Jouad, « Réalisation et caractérisation des cellules photovoltaïques organiques », L'université Bretagne Loire, 2016.
- [2]I. Fodil et A. Herous, « Etude et simulation d'une cellule solaire $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnI}_3$ », Université Mohamed Khider de Biskra, 2021.
- [3]M. BOUZEGANE et F. GAOUAOU, « Alimentation d'un moteur à courant continu par une source photovoltaïque », Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, 2018.
- [4]A. HAOUECHE et B. MECHRI, « Etude et simulation d'une cellule solaire à pérovskite hybride a base de germanium par le simulateur SCAPS1-D », Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj, 2020.
- [5]R. Chettouh et B. Dou, « Effet de l'épaisseur de la couche absorbante sur une cellule solaire InGaP/GaAs », Université Echahid Hamma Lakhdar El-Oued, 2018.
- [6]« Connaissance des énergies : infos pétrole,énergierenouvelable,photovoltaïque ». Disponible sur: <https://www.connaissancedesenergies.org/>
- [7]« Connaissance des énergies : infos pétrole,énergierenouvelable,photovoltaïque ». Disponible sur: <https://www.connaissancedesenergies.org/>
- [8]B. Youcef et B. Noura, « Évaluation expérimentale des performances de la centrale solaire photovoltaïque de 53 MW installée dans la région de Djelfa », UNIVERSITE AHMED DRAIA-ADRAR-, 2021.
- [9]E. B, « Mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires », *C.R. Acad. Sci*, vol. 9, 1839.
- [10]T. Berrouba et N. Kaddouri, « Optimisation des parametresgéométrique et physique de cellules photovoltaïques a contacts arriereinterdigites », université Abou - bakrBelkaid -Tlemcen, 2014.
- [11]D. Djicknoum, « Cellules photovoltaïques silicium à hétérojonctions et à structures interdigitée en face arrière », L'université paris-sud 1 1 faculté des science d'oersay, 2010.
- [12]A. W.G et D. RE, « On the Action of Light on Selenium », *Proc. R. Soc. London*, vol. 25, 1876.
- [13]F. C.E, *J. Frankl. Inst.*, vol. 119, p. 221.
- [14]C. Bouchikhi, « Évaluation et simulation des performances d'une cellule solaire pérovskite pour des différents matériaux en couches de transport d'électrons et de trous », UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID – TLEMCCEN, 2021.
- [15]M. Q, « Les cellules photovoltaïques, cœur des panneaux solaires ».

Chapitre1: Evolution des cellules solaires

[16]C. D.M, F. C.S, et P. G.L, « A New Silicon P-N Junction Photocell for Converting Solar Radiation intoElectrical Power », *J. Appl. Phys*, vol. 25, 1954.

[17]N. TALHI, « Étude et prédiction de structures cristallines de cellules pérovskites », UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID - TLEMCEM, 2021.

[18]R. A, *Photopiles Solaires*. Paris: Presses Polytechniques et Universitaires romandes, 1996.

[19]S. BelaidLalouni, « Cours Energie Solaire Photovoltaïque ». Université A.MIRA de BEJAIA, 2015 2014.

[20]« Qu'est-ce que l'énergie solaire: exploitation thermique, photovoltaïque, thermodynamique » Disponible sur: <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie-solaire>

[21]A. Touahria et Y. Djendel, « Modélisation VHDL-AMS d'une cellule photovoltaïque », Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj, 2021.

[22]J. C. C, *Physics of Solar Energy*, 1st ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley& Sons Inc, 2011.

[23]F. Rahmani, H. Saoud, et faycelBouchaala, « Etude et simulation d'une cellule solaire bi-faciale », UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, 2021.

[24]« La cellule photovoltaïque: comment ça marche? ». Disponible sur: <https://www.planete-energies.com/fr/media/article/cellule-photovoltaique-comment-ca-marche>

[25]H. Ben cherif, « Etude et modélisation analytique d'une cellule solaire à base de SiGe », Université Hadj lakhdarBatna,Faculté De Technologie.

[26]M. GOUFI et B. HAMDOUNI, « Etude et Simulation D'une Cellule Photovoltaïque à Pérovskite », Université Larbi Bun M'Hidi O.E.B, 2020.

[27]P. S, « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », L'Université de Toulouse III - Paul Sabatier, 2009.

[28]abd el hakim Ahmahaet ali Silla, « Étude et modélisation des paramètres électriques d'une cellule photovoltaïque », UNIVERSITE KASDI MER BAH OUARGLA, 2019.

[29]Yumpu.com, « Les principes de l'énergie solaire photovoltaïque - 123 Solaire », yumpu.com. Disponible sur: <https://www.yumpu.com/fr/document/view/4084959/les-principes-de-lenergie-solaire-photovoltaique-123-solaire>

[30]H. NAIM, « 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 », 2016.

Chapitre1 : Evolution des cellules solaires

[31]« Le panneau solaire polycristallin », JADE Technologie. Disponible sur: <https://www.jade-technologie.com/panneau-solaire-polycristallin-2/>

[32]I. eddine CHAMEKHI, « Comparaison par Simulation Numérique entre une Cellule Solaire à Base du Silicium Cristallin de type P en Couches Minces et une Cellule solaire à Base du Silicium Cristallin de type N en Couches Minces », Université Ibn Khaldoun – Tiaret, 2017.

[33]R. G. Lavillat Théo, « Les différents types de cellules photovoltaïques », Ecosources. Disponible sur: <https://www.ecosources.org/types-de-cellules-photovoltaïques>

[34]Q. M. Futura, « Les cellules au CdTe : minces, rentables... mais toxiques ? », Futura. Disponible sur: <https://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/developpement-durable-cellules-photovoltaïques-coeur-panneaux-solaires-1688/page/10/>

[35]A. Bouraioui, « Élaboration et Caractérisation des Couches Minces CuInSe₂ par Électrodéposition », 2009.

[36]T. V.V, R. Nurul A.A, et S. Jeyraj A./L, « Progress in solar PV technology: Research and achievement », p. 443-461, avril 2013.

[37] B. S. Z. laabidine BEN SAOUCHA et D. B. DJEHICHE, « Simulation numérique de la cellule solaire Tandem Pérovskite/CIGS », UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 2019.

[38]A. A. Kanoun, « Etude théorique et prédictive des nouveaux matériaux pour conception des cellules solaires et applications photovoltaïques », Université ABOU-BEKR BELKAID-TLEMCEN, 2019.

[39]D. P.C et B. W.J, « How the West was Won? A History of Organic Photovoltaics », p. 99-110, novembre 2019.

[40]J. C.B, « Synthèse et caractérisation de pérovskites doubles magnéto-résistives dérivées de Sr₂FeMoO₆ ».

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

[42]O. O, « Les cellules solaires à base de matériaux pérovskites - Structures et performances », p. 515-520, 2018.

Chapitre 2 : Propriétés des matériaux pérovskites

Chapitre2 : Propriétés des matériaux pérovskites

Chapitre 2: Propriétés des matériaux pérovskites

2.1 Introduction :

La pérovskite est l'un des matériaux prometteurs actuels. Il peut remplacer le silicium dans le domaine de panneaux solaires. En plus, le coût de l'installation des pérovskites est réduit par rapport aux technologies existantes utilisant le silicium et les matériaux organiques. [37]

2.2 Historique :

La pérovskite fut identifiée par le minéralogiste russe Lev Alexeïevitch Perovski (1792–1856) [37] et après des années, elle a fait l'objet de plusieurs études parmi lesquels on peut citer :

- En 1958, les premiers articles ont été proclamés sur la famille CsPbX_3 , qui cristallise dans une structure pérovskite et présente des caractéristiques photoconductrices avec les premiers exemples de pérovskites aux halogénures dans le siècle dernier.[2]
- En 1978, il y a eu l'élaboration de la première pérovskite halogénure hybride portante cation organique méthyl Ammonium, ou MA (CH_3NH_3^+).[37]
- En 2009, des matériaux hybrides inorganiques-organiques de type pérovskite ont été employé pour la première fois dans des cellules solaires à colorant liquide.[38]
- En 2012, en remplaçant des électrolytes liquides par des électrolytes solides, un progrès primordial a été accompli, et cela a provoqué l'acquisition d'une rentabilité de 9%. [38]
- En 2013, le taux de réussite de la conversion de puissance atteint un niveau satisfaisant de 15%. [2]
- En 2017, la rentabilité certifiée la plus élevée était de 22,1 %, tandis que les rendements proclamés atteignaient même 27,3 %. [38]

Chapitre 2 : Propriétés des matériaux pérovskites

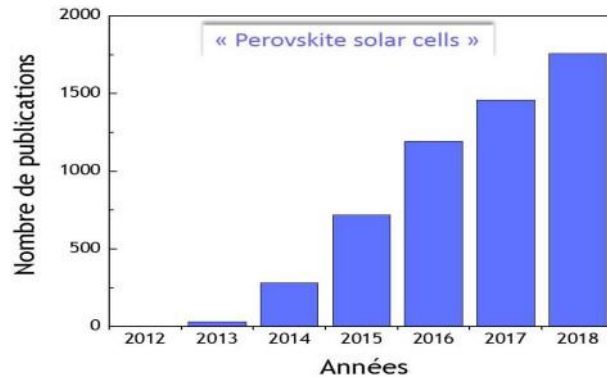


Figure 2.1 : L'évolution des recherches faites sur les cellules solaires à base de pérovskite entre 2012 et 2017, selon une recherche sur Web of Science[1],[4]

2.3 Structure cristallographique de pérovskite :

Le titanate de calcium (CaTiO_3), baptisé en l'honneur du minéralogiste russe Lev Perovski est un exemple de minéral de type pérovskite. Sa découverte initiale remonte à 1839, lorsque le minéralogiste allemand Gustav Rose l'a identifié pour la première fois [39],[2]. Une variété de combinaisons élémentaires différentes peut être accommodée par cette structure cristalline. Elle représente la classe de minéraux la plus répandue sur Terre [39],[2]. Cette configuration, caractérisée par la formule chimique générale ABX_3 illustré dans la figure 2.2, où le cation A est positionné aux huit sommets d'un cube, entouré par douze anions X. Pendant ce temps, le cation B réside au centre d'un octaèdre, qui est constitué de six anions X [BX_6] situés aux centres des faces du cube.[39],[2]

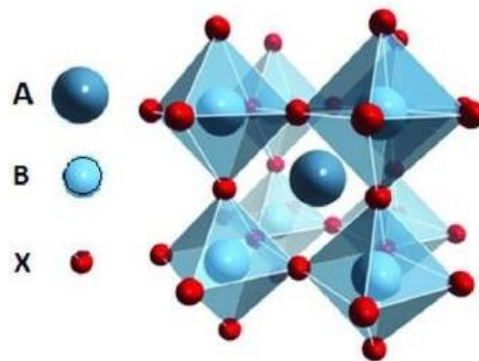


Figure 2.2 : Structure pérovskite ABX_3 . [2]

2.4 Structure morphologique de la pérovskite :

Les pérovskites 3D se présentent sous forme de microcristaux au cours du protocole de cristallisation, mais pas sous forme de monocristaux, inversement aux semi-conducteurs inorganiques dans les emplois classiques [40]. En règle habituel, lors du dépôt par centrifugation de MAPI (Pérovskite d'iodure de plomb de méthyl ammonium) à partir d'une solution liquide, la dimension des grains remportés varie entre 200 nm à

Chapitre2 : Propriétés des matériaux pérovskites

un certain nombre de microns. Lors de la formation des cristaux, ces derniers ne présentent pas immédiatement une structure organisée claire et prennent différentes formes [40]. Les conditions de fabrication contrôlent fortement les dimensions et la configuration des grains, notamment des précurseurs utilisés et des méthodes employées [40]. Par exemple, l'ajout de chlore à une solution de pérovskite peut accroître la cristallinité et entraîner une croissance significative de la taille des grains.[40]

2.5 Propriétés structurales des pérovskites hybrides :

À la fin du XIXe siècle, une nouvelle pérovskite de formule moléculaire ABX_3 a été élaborée, où X représente un halogénure, tel que Cl^- , Br^- ou I^- . L'ion A est Cs^+ et l'ion B est Pb^{2+} . Il faudra attendre l'observation de leurs propriétés photoconductrices par Christian Moller en 1957 pour que la structure cristalline de ces pérovskites soit traitée, et les classant ainsi parmi les semi-conducteurs[2],[41]. En 1978, D. Weber a démontré la faisabilité de substituer les ions césium par de gros cations organiques tels que le méthyl ammonium pour l'acquisition des pérovskites hybrides organiques-inorganiques (PH) tridimensionnelles (3D) [2],[41], qui sont utilisées dans les cellules solaires.

Dans les pérovskites, Le cation Cs^+ ou petite molécule organique (typiquement le méthylammonium (MA), mais aussi la (FA) ou l'acide 5-aminovalérique (5-AVA)) comble le centre du cube, Le $Pb(II)$ ou le $Sn(II)$ occupe les sommets [2],[41]. Les ions halogénures tels que I^- , Cl^- ou Br^- composent l'octaèdre (BX_6) au centre duquel sont positionnés les cations eux-mêmes. La structure pérovskite avec la symétrie la plus élevée est cubique et appartient au groupe spatial $Pm\bar{3}m$. Les pérovskites $MAPbBr_3$ restent stables à température ambiante, tandis que les $MAPbI_3$ requièrent des températures supérieures à 327 K pour maintenir leur intégrité. En dessous de cette température, cette dernière adopte une structure tétragonale.[2],[41]

Ceci est le résultat d'une légère rotation de l'octaèdre PbX_6 le long de son axe tout en étant toujours relié par ses sommets [2],[42]. Une transition vers une phase tétragonale est constatée dans la pérovskite $MAPbBr_3$ à 236 K. Cette pérovskite est décrite comme plus stable à température ambiante que $MAPbI_3$ car elle a une structure cubique (moins tordue) et est plus dense en raison de la taille de l'anion Br^- Par rapport à I^- . [2],[42]

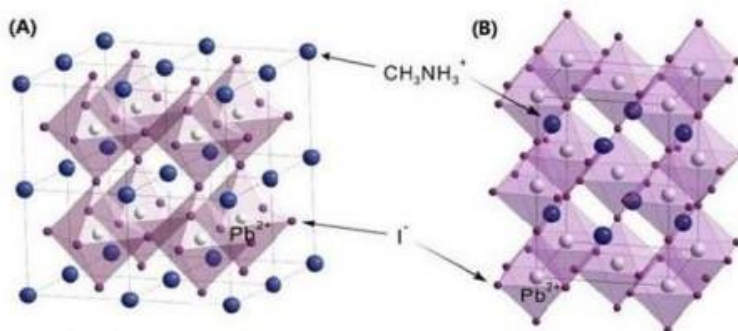


Figure 2.3 : Structure cristalline de la pérovskite [2]

Chapitre2 : Propriétés des matériaux pérovskites

2.6 Conditions de stabilité d'une structure pérovskite :

La solidité de la structure pérovskite découle majoritairement de deux points clés : le facteur de tolérance t et l'iconicité des liaisons anioniques et cationiques[37] :

2.6.1 Facteur de tolérance t :

Puisque la dimension des cations A et B joue un rôle vital dans la solidité et l'éventuelle distorsion de la structure cristalline de la pérovskite, Ce paramètre est très primordial pour la majorité des pérovskites.[37],[43]

$$t = \frac{R_A + R_O}{\sqrt{2}(R_B + R_O)} \quad (\text{II.1})$$

Selon la définition du facteur de tolérance t donnée par Shannon et al. [1], où R_A et R_B , R_O indiquent chacun dans son ordre les rayons ioniques des cations A, B et de l'oxygène, $d(A-O)$ et $d(B-O)$ sont les distances du cation de l'oxygène, pour la configuration cubique t est très voisin de 1. La plage stable de la phase pérovskite (Plus ou moins défigurée) est donc définie par t , qui a une valeur comprise entre 0,75 et 1,06. [37],[43]

2.6.2 L'iconicité des liaisons anions-cations :

La nature ionique de la liaison entre l'anion et le cation est déterminée par le deuxième critère qui définit la stabilité. Les divergences d'électronégativité selon l'échelle de Pauling mesurent les propriétés ioniques des compositions ABO_3 . En particulier, nous considérons les divergences d'électronégativité entre l'élément A et l'oxygène et entre l'élément B et l'oxygène. La structure pérovskite devient plus stable lorsque les liaisons intégrées sont des ions forts. En revanche, les pérovskites covalentes à base de plomb sont moins stables que les pérovskites plasmoniques $BaTiO_3$. [37]

2.7 Type des pérovskites :

Les structures idéales sont quelque fois constatées. Le plus souvent, on rencontre des formes torsadées où la symétrie est altérée par la rotation de l'octaèdre BO_6 . Ces déformations se traduisent par de légères déformations de type quadratique, orthorhombique ou rhomboédriques, résultant de très faible changement des paramètres du maillage cubique. La figure 2.4, illustre les diverses symétries décrivant les pérovskites.[44]

Chapitre 2 : Propriétés des matériaux pérovskites

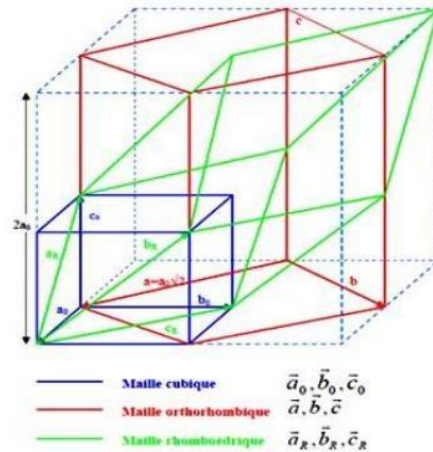


Figure 2.4 : Le rapport entre les mailles cubique, orthorhombique et rhomboédrique de pérovskites. [10]

2.7.1 Structure pérovskite tétragonale :

La forme ferroélectrique du BaTiO_3 est considérée comme le cas le plus célèbre d'une pérovskite tétragonale, à température ambiante avec des dimensions $a = 3,994 \text{ \AA}$, $c = 4,038 \text{ \AA}$ et un paramètre de réseau $Z = 1$. Dans cette configuration, l'octaèdre TiO_6 présente une légère distorsion, avec une liaison Ti-O ayant une longueur de $1,86 \text{ \AA}$, quatre liaisons oxygène ayant une longueur de $2,00 \text{ \AA}$ et une liaison plus longue ayant une longueur de $2,17 \text{ \AA}$. Le baryum est entouré de quatre atomes d'oxygène à $2,80 \text{ \AA}$, de quatre autres atomes d'oxygène à $2,83 \text{ \AA}$ et de quatre autres atomes d'oxygène à $2,88 \text{ \AA}$. [44]

2.7.2 Structure pérovskite orthorhombique :

Dans le cas d'une structure cubique idéale déformée en une structure orthorhombique le long des diagonales des faces du cube cela donne une maille unitaire comprend quatre unités constitutives ABO_3 . La grille peut être illustrée dans le groupe d'espace Pbnm comme un parallélépipède de dimensions $a=b=\sqrt{2}ac$ et $c \approx 2ac$, où ac représente les paramètres de la grille cubique. [44],[45]

La structure de GdFeO_3 représente éventuellement l'exemple le plus caractéristique de toutes les pérovskites orthorhombiques torsadées. Il appartient au groupe spatial Pbnm avec les paramètres de grille mesurant $a = 5,346 \text{ \AA}$, $b = 5,616 \text{ \AA}$ et $c = 7,666 \text{ \AA}$ [14], et un certain nombre d'éléments de formule $Z = 4$. Dans cette configuration, les octaèdres FeO_6 présentent des distorsions et des inclinaisons. De plus, les polyèdres GdO_12 sont gravement déformés. D'autres matériaux utilisant cette structure rhombique torsadée incluent NaUO_3 , NaMgF_3 et LaYbO_3 . [44]

Chapitre 2 : Propriétés des matériaux pérovskites

Sur la figure (2.5), les trois symétries des structures pérovskites sont assemblées : cubique, tétragonale et orthorhombique.[44],[46]

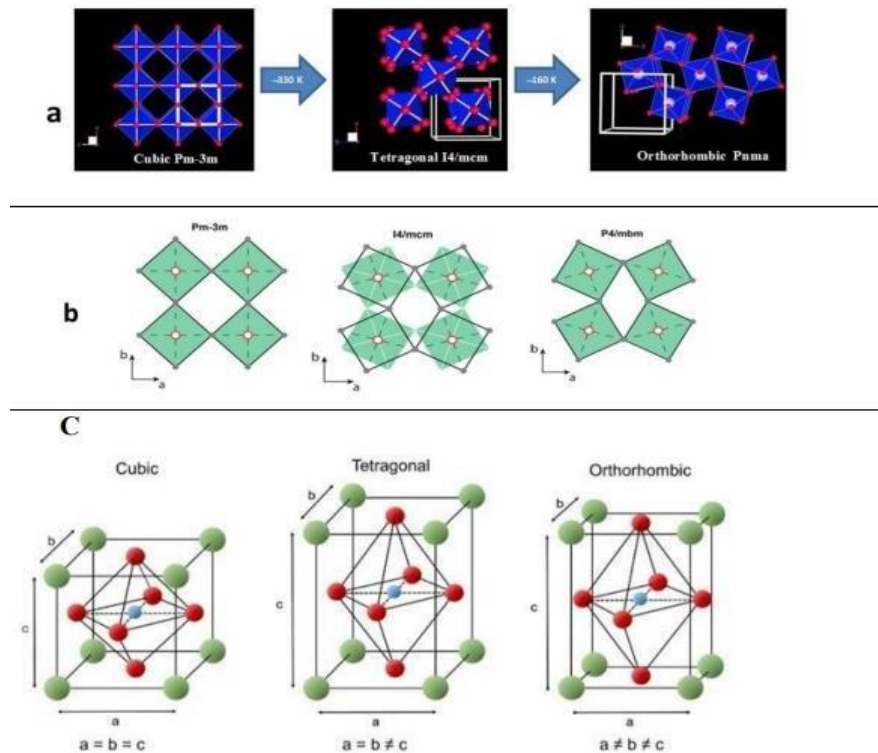


Figure 2.5 : Illustration des symétries cubique, tétragonale et orthorhombique de la pérovskite : (a) et (b) représentation des rotations octaédriques (octaèdre BO_6 en bleu et oxygène en rouge). (c) Maille élémentaire des trois symétries. [10]

2.7.3 Structure pérovskite rhomboédrique :

La déformation de la structure cubique idéale ABO_3 le long de sa diagonale entraîne la formation de la structure rhomboédrique (voir Figure 2.6.a). Son composant principal est constitué de deux unités de composition ABO_3 [26]. Cette configuration se distingue par la présence de trois paramètres de longueur équivalents, $a = b = c$, ainsi que de trois angles égaux : α , β et γ , mais divergent de (90°) et (120°). La figure 2.6b montre une illustration de la structure rhomboédrique. On retrouve différentes pérovskites rhomboédriques telles que $LaAlO_3$, $PrAlO_3$, $LaNiO_3$ et $LaCoO_3$. [44]

Chapitre 2 : Propriétés des matériaux pérovskites

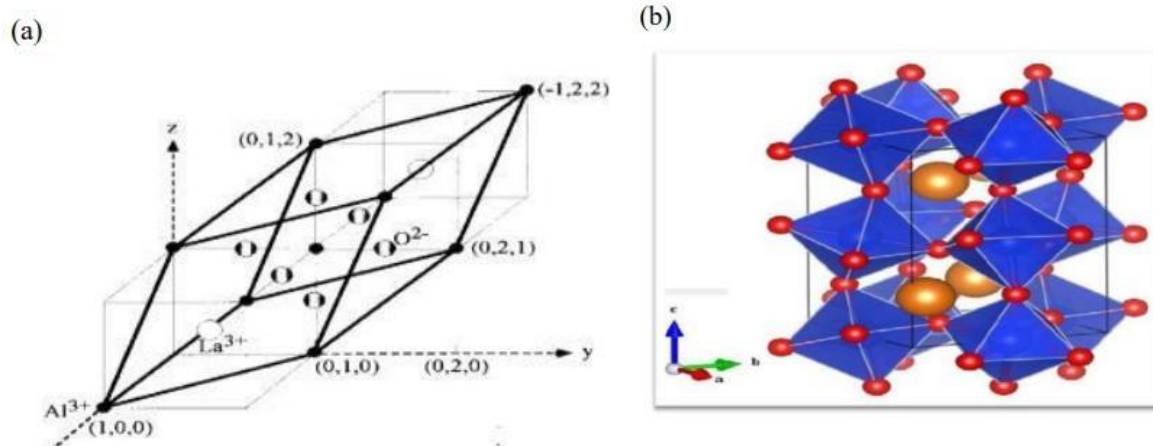


Figure 2.6 : a-Structure pérovskite rhomboédrique de $LaAlO_3$ obtenu par la distorsion de la structure cubique idéale ABO_3 le long de la diagonale du cube, b-Structure rhomboédrique de la pérovskite. [10],[13]

2.7.4 Structure pérovskite monoclinique et triclinique :

Dans de nombreuse instance, on a observé des mailles unitaires monocliniques (telles que $BiMnO_3$ et $BiScO_3$) ou tricliniques (telles que $AgCuF_3$, $CsPbI_3$, $PbSnO_3$, $BiCrO_3$, etc.). Toutefois, dans de nombreuses situations, ces mailles ont été identifiées comme des mailles fictives ou dérivées d'une maille véritable multiple.[44]

2.7.5 Polymorphisme :

Comme précédemment indiqué, diverses formes polymorphes sont possédées par de multiples matériaux de la famille des pérovskites. Certains de ces changements présentent une grande influence en ce qui concerne leurs caractéristiques physiques et leurs utilisations.[44]

On peut constater les modifications suivantes lorsque la température croie dans $BaTiO_3$ (Fig. 2.7) et $KNbO_3$:

Rhomboédrique ↔ orthorhombique ↔ tétragonale ↔ cubique

Les transitions de phase évoquées sont réversibles, et chaque variante polymorphe possède une maille unitaire pseudo cubique d'environ 4 Å.

Il convient de souligner que la ferroélectricité est manifestée par toutes les trois formes à des faibles températures.[44],[47]

Chapitre 2 : Propriétés des matériaux pérovskites

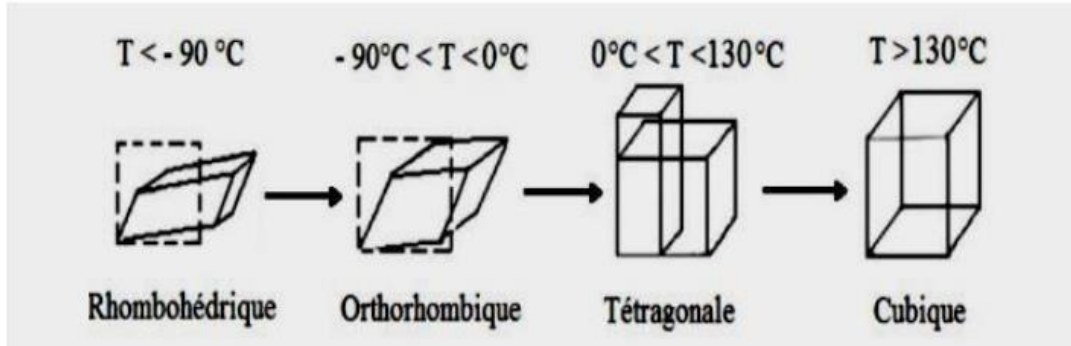


Figure 2.7 : Modifications dans la structure cristallographique de l'oxyde $BaTiO_3$. [10]

2.8 Propriétés électriques :

Les propriétés optiques et électriques de la pérovskite $CH_3NH_3PbI_3$ sont prometteuses pour le photovoltaïque et ont été l'objet d'une recherche active au cours des vingt dernières années, pour explorer d'autres usages. Ce matériau expose d'excellentes propriétés optoélectroniques, ce qui en fait un absorbant exceptionnel [2],[42]. À l'inverse aux oxydes métalliques, Le dopage extrinsèque ne modifie généralement pas les propriétés de transport de charge des pérovskites hybrides aux halogénures, mais la modification de la composition du matériau peut facilement ajuster leurs propriétés intrinsèques [2], [42]. Les propriétés électroniques des pérovskites sont fondamentalement déterminées par les liaisons B-X des composants inorganiques, tandis que les cations A n'affectent pas immédiatement ces propriétés [2],[42]. Néanmoins il est montré par les simulations que la taille du cation est affectée par le niveau de distorsion, ce qui est immédiatement influencé par les propriétés électroniques du matériau.[2],[42]

2.8.1 La structure électronique :

J. Even et L. Pedesseau ont déterminé la structure de bandes de la pérovskite MAPI par la méthode DFT (théorie de la fonctionnelle de la densité) [48]. Leurs premiers calculs, sans considérer le couplage spin-orbite (SOC), ont révélé un écart énergétique élevé d'environ 1.64eV [48]. Cependant une levée de dégénérescence dans la bande de conduction a été engendrée par l'introduction du couplage spin-orbite, diminuant l'écart énergétique à 0.8eV [48]. Une observation inhabituelle comparée aux semi-conducteurs conventionnels comme le *GaAs*, où le SOC induit généralement une levée de dégénérescence dans la bande de valence [48]. La figure ci-dessous (Figure 2.8) présente la structure de bandes calculée par J. Even et ses collègues pour le MAPI.

Chapitre 2 : Propriétés des matériaux pérovskites

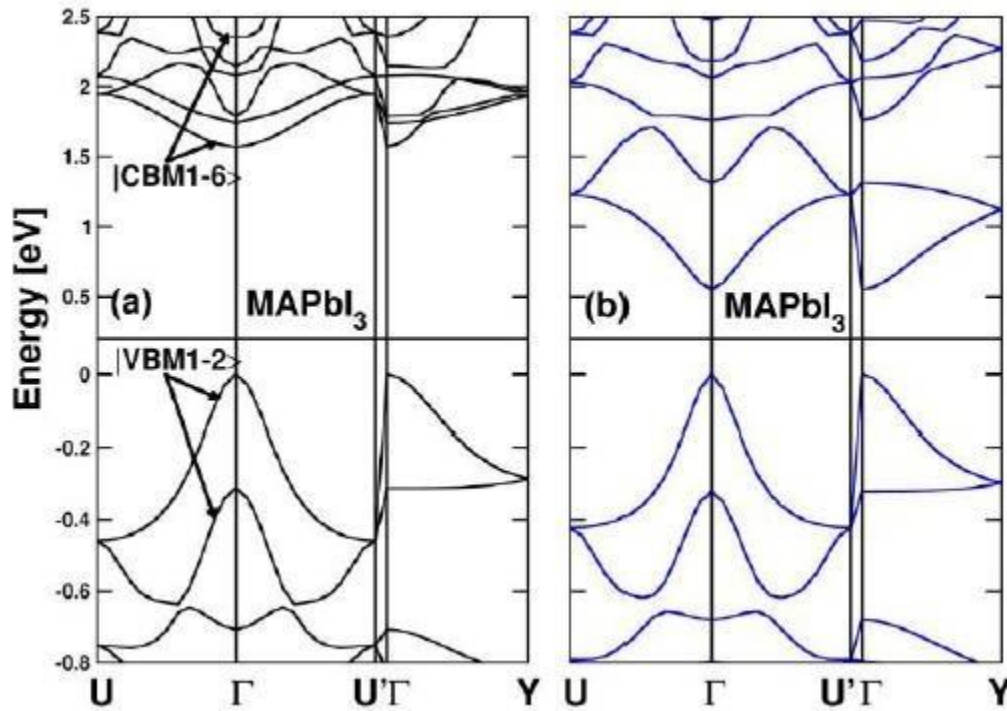


Figure 2.8 : Structures de bandes de $MAPbI_3$ (a) sans couplage spin-orbite (SOC) et (b) avec le couplage spin-orbite (SOC) [15]

Les pérovskites hybrides présentent un gap direct et un indice d'absorption important. Par exemple, on estime l'indice d'absorption de la pérovskite iodée $MAPbI_3$ à $1,5 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$ [2] à une longueur d'onde de 550 nm, une valeur proche à celle des matériaux conventionnellement exploités dans le photovoltaïque tels que le $GaAs$, le $CdTe$ et le $CIGS$, pour lesquels l'indice d'absorption se situe entre 10^4 et 10^5 cm^{-1} . La pérovskite $MAPbI_3$ présente un gap énergétique compris entre 1.50 et 1.55 eV, ce qui est exemplaire pour les usages photovoltaïques [2],[42]. Ce gap est variable en fonction de la composition du matériau, diminuant avec la diminution de l'électronégativité des ions et avec la divergence d'électronégativité entre le cation métallique et l'anion.[2],[42]

Par exemple, l'introduction de l'halogène Br peut augmenter la bande de conduction (BC) et diminuer la bande de valence (BV), ce qui conduit à un écart énergétique apprécié de 2,2 eV pour $CH_3NH_3PbBr_3$,[2],[42]. Les structures mixtes de pérovskite constituées d'iode et de brome ou de brome et de chlore peuvent présenter des écarts variant continuellement en ajustant le rapport des deux halogènes, permettant l'absorption de l'ensemble du spectre solaire. [2],[42]

2.9 Propriétés optiques :

La quantification de la densité optique qui évalue l'aptitude d'un milieu à absorber la lumière qui le traverse permet la quantification de l'absorption des couches de pérovskite [49]. La figure 2.9 représente le coefficient d'absorption de différents matériaux en fonction de l'énergie des photons, et la figure 2.10 représente les spectres

Chapitre 2 : Propriétés des matériaux pérovskites

d'absorption de $\text{MASn}_x\text{Pb}_{1-x}\text{I}_3$ sur une couche de TiO_2 pour différentes valeurs de x .

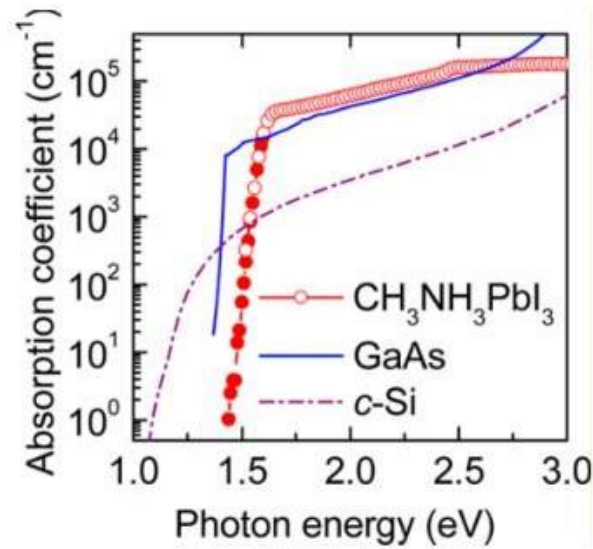


Figure 2.9 : Réévaluation des capacités d'absorption de matériaux clés en photovoltaïque. [17]

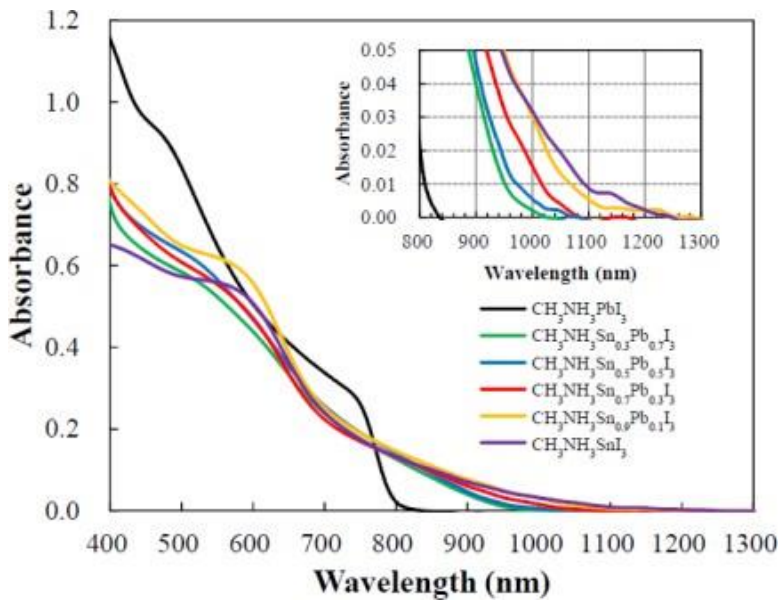


Figure 2.10 : Spectres d'absorption de $\text{MASn}_x\text{Pb}_{1-x}\text{I}_3$ sur une couche de TiO_2 pour différentes valeurs de x [16]

2.9.1 Densité optique :

La densité optique (DO) est établie en relation avec de coefficient de transmission T [50] :

Chapitre2 : Propriétés des matériaux pérovskites

$$DO = -\log(T) = -\log\left(\frac{I_t}{I_0}\right).$$

(II-2)

Avec :

I_t : L'intensité de lumière transmise à travers l'échantillon

I_0 : L'intensité de lumière incidente.

2.9.2 Photoluminescence (PL) :

La capacité des pérovskites 2D à irradier de manière efficiente la lumière (PL) est l'une de leurs propriétés les plus significative [49]. Cette approche fonctionne en excitant un échantillon à l'aide d'un faisceau Laser [50]. Les espèces (électrons ou excitations) sont favorisés vers un niveau d'excitation par cette stimulation, ce qui met le système en déséquilibre thermodynamique [50]. Après l'excitation, le matériau a tendance à retrouver son état d'équilibre thermodynamique via des mécanismes de recombinaison des charges, qui se produisent soit de manière radiative par l'émission d'un photon, soit de manière non radiative [50]. Le spectre de photoluminescence se compose d'une unique bande centrée à 1.58eV [50] et le spectre d'absorption a un pic légèrement prononcé autour de 1.63eV. [50],[18].

En raison de l'impact néfaste du plomb (Pb) présent dans les cellules pérovskite à base de plomb (comme $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$), des recherches sont faites pour trouver des alternatives aux structures pérovskites, conduisant à un intérêt croissant pour les pérovskites sans plomb telles que $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnI}_3$ (voir Figure 2.11),[2],[51]. Cependant, le déficit énergétique du $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnI}_3$ est encore insuffisant et le composé est moins stable dans l'air [2],[51]. Bien que l'équipe de Snaith ait signalé des cellules solaires $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnI}_3$ avec un rendement d'environ 6 % en 2014, elles ont fait peu de progrès depuis lors. Récemment, la meilleure performance des cellules solaires à pérovskite sans plomb utilisant de l'étain (Sn) au lieu du plomb a été enregistrée à 6,22 %.[2],[51].

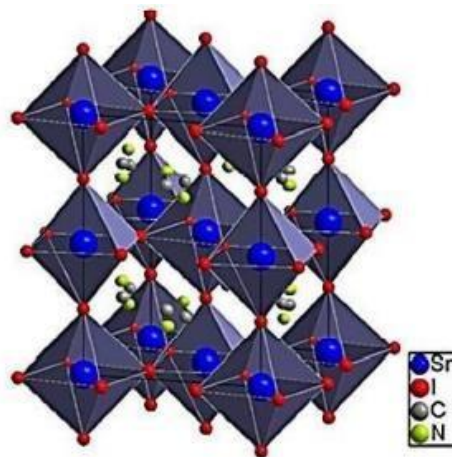


Figure 2.11 : Structure cristalline du $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnI}_3$ avec une conformation tétragonale de la maille de la pérovskite. [2],[19]

Chapitre 2 : Propriétés des matériaux pérovskites

La figure 2.12 représente les propriétés d'absorption optique avec une énergie de coupure d'environ 1,23 eV.[2],[51]

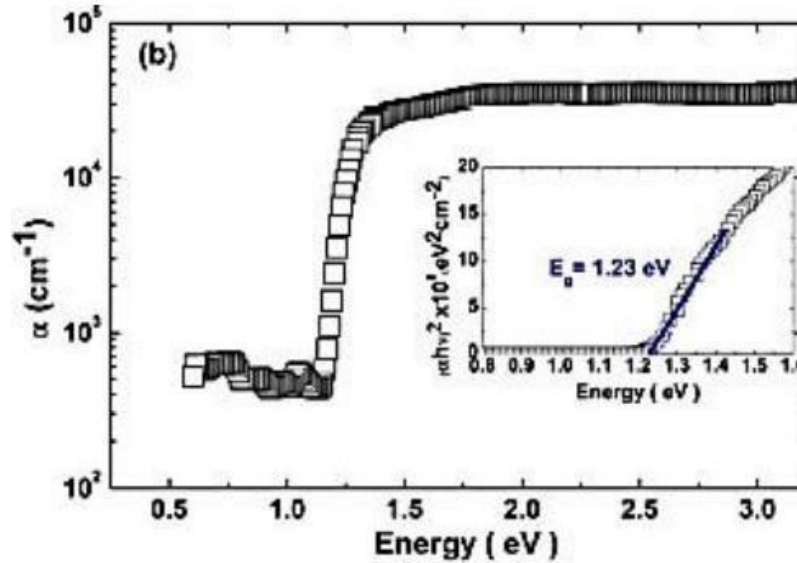


Figure 2.12: Courbe d'absorption du matériau $CH_3NH_3SnI_3$. [2],[19]

2.10 Principe de fonctionnement de la cellule solaire à base de pérovskite :

La technologie des cellules photovoltaïques à base de pérovskite consiste en un ensemble de couches habituellement appliquées sur le verre. Son mécanisme de fonctionnement est basé sur la pérovskite qui capte la lumière et génère des charges. Les électrons peuvent passer de la bande de valence à la bande de conduction par l'énergie lumineuse, créant ainsi des lacunes.[51]

Les propriétés de l'interface jouent un rôle décisif dans les performances, donc les pérovskites n'ont pas besoin de présenter d'excellentes capacités de transport.[51],[52]

La figure 2.13 illustre le schéma de transfert d'électrons et les processus de recombinaison dans les cellules solaires utilisant la pérovskite comme matériau de base. Les processus requis incluent dans la photo-excitation dans la pérovskite (flèche 1), le transfert d'électrons vers la couche de transport d'électrons (ETL (Electron Transport Layer) (flèche 2) et le transfert de trous vers la couche de transport de trous (HTL Hole Transport Layer) (flèche 3). À l'inverse, les processus indésirables (flèches vertes) incluent la réorganisation de la photo biomasse (4), le transfert de charge inverse aux interfaces HTL et TiO_2 -pérovskite (5, 6) et le contact direct entre HTL et TiO_2 (7).[51]

Chapitre2 : Propriétés des matériaux pérovskites

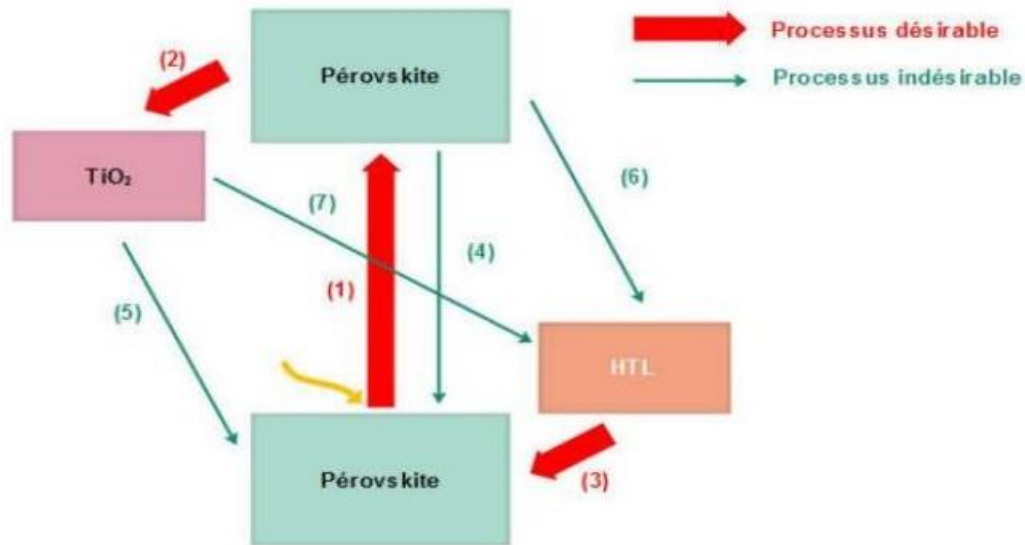


Figure 2.13 : Le schéma de transfert d'électrons et les processus de recombinaison dans les cellules solaires utilisant la pérovskite comme matériau de base sont présentés dans la référence. [19],[20]

2.11 Techniques de fabrications des couches en pérovskite :

On emploie majoritairement les techniques de dépôt de film de pérovskite comprenant le dépôt sous vide : tel que le dépôt de précurseur en une seule étape, le dépôt chronologique en phase vapeur et le dépôt sous vide à double source, et le traitement en solution : tel que le revêtement par centrifugation en une seule étape, le revêtement par centrifugation en deux étapes : revêtement, pulvérisation et dépôt chimique en phase vapeur; parmi ces méthodes, celle la plus couramment exploitée est le revêtement par centrifugation.[2],[53]

La figure 2.14 résume les diverses techniques pour fabriquer des films de pérovskites. Ces films doivent avoir une couverture de surface complète de la couche de transport d'électrons (ETL) ou de la couche de transport de trous (HTL), une minime rugosité des particules d'une dimension micrométrique. De multiples avantages sont offerts par les couches de pérovskite, notamment des capacités d'absorption de la lumière puissantes, des niveaux d'énergie appropriés pour un transport fiable des porteurs de charge à travers les cellules solaires, des structures réduisant les phénomènes de recombinaison et une efficacité économique satisfaisante, Malgré cela, ces couches sont très vulnérables à l'humidité, leur composition pose des obstacles en termes de considération de l'environnement et leur stabilité à longue durée reste un obstacle primordial. [2],[53]

Chapitre 2 : Propriétés des matériaux pérovskites

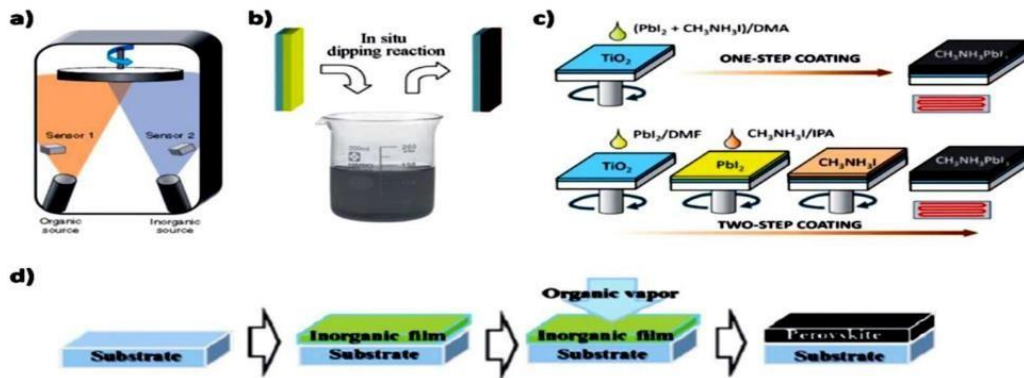


Figure 2.14 : Diverses techniques pour fabriquer des films de pérovskites. [2]

2.12 Architecture des cellules Pérovskites :

Les cellules solaires à pérovskite sont conçues par plusieurs méthodes parmi lesquelles celle produite à l'aide de quatre architectures principales, chacune présentant des attributs de réalisations incomparables. Ces structures sont surnommées mésoporeuses, couvertes, planaires n-i-p et planaires p-i-n et sont présentées sur la figure (2.15) [2],[54]. Pour la modélisation et la simulation numériques, il est recommandé de sélectionner la disposition de cellules solaires planaires à couches minces à hétérojonction p-i-n ou n-i-p. Celles-ci accordant aux propriétés des cellules solaires à base de pérovskite et sont pareilles à la structure des cellules solaires à semi-conducteurs assemblées à couches minces, telles que les CIGS.[2],[54]

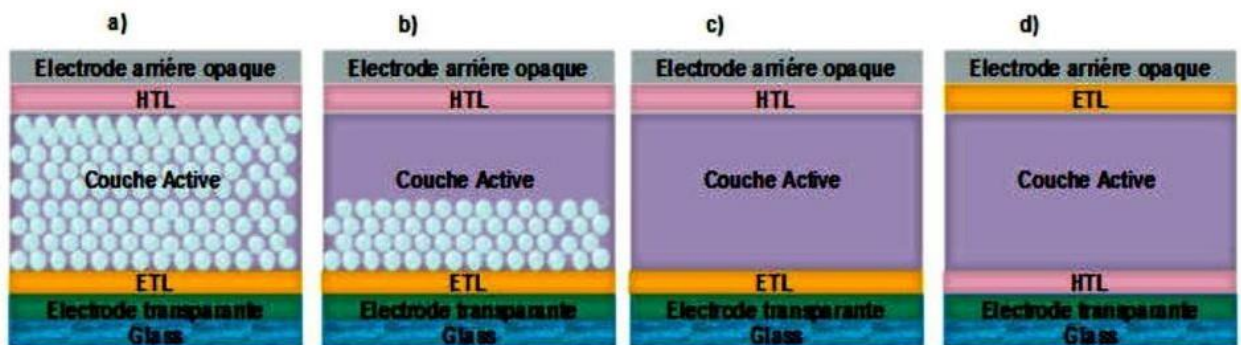


Figure 2.15 : Les quatre configurations les plus couramment employées dans les cellules solaires à pérovskite : (a) mésoporeuse, (b) avec couche de recouvrement (Capping-layer), (c) n-i-p planaire, et (d) p-i-n planaire. [2],[54].

La structure ci-dessus est souvent exploitée dans les équipements à cellules solaires à pérovskite. Sur la figure 2.15(a), une organisation mésoporeuse est affichée. Elle est construite sur un substrat de verre et d'une électrode transparente sur laquelle est mise une couche dense de porteur d'électrons (ETL), généralement édifée de TiO_2 . Les ETL mésoporeux (constitués de TiO_2 ou d' Al_2O_3) sont ensuite formés en frittant de petites particules totalité à surélévée température ($>400^\circ C$),[2],[54]. La méso structure poreuse est ensuite pleine d'une couche de pérovskite active sur laquelle est fixée une couche de transport de trous solides (HTL), habituellement dopée au (Spiro-OMeTAD) et un

Chapitre2 : Propriétés des matériaux pérovskites

contact arrière opaque (couramment de l'or (Au)). L'architecture de la superposition est élaborée à partir de cette disposition méso scopique [2],[54]. Puisqu'il a été observé que les pérovskites ne nécessitent pas d'interface ETL/pérovskite pour éloigner les excitons photo générés en charges libres et que le matériau pérovskite peut transporter avec succès des charges ambipolaires, l'épaisseur de la structure méso scopique est considérablement baissée,[2],[54]. Une épaisse couche de pérovskite parfaite se forme sur le dessus (voir Figure 2.16(b)),[2],[54]. En supprimant totalement la structure mésoporeuse, une structure planaire n-i-p peut être formée sans étape de frittage à haute température (voir Figure 2.16(c)). Les structures planaires p-i-n sont récoltées en déposant du HTL, couramment du poly (3,4-éthylènedioxythiophène) : polystyrène sulfonate (PEDOT : PSS), sur un substrat de verre transparent dissimulé d'électrodes. Par la suite, une couche de pérovskite est déposée, puis vient le dépôt de l'ETL, généralement l'ester méthylique de l'acide [6,6] -phényl-C61-butyrique (PCBM)) et enfin du contact arrière opaque (en aluminium (Al) ou en argent). (Ag)) fabriqué)) (voir Figure 2.16(d)).[2],[54]

2.13 Cellules tandem :

En assemblant deux cellules simples l'une sur l'autre, On crée les cellules tandem. À titre d'exemple on peut superposer une fine couche de silicium amorphe à une couche de silicium cristallin. On connecte en série ces deux cellules, et une couche qui permet la recombinaison des porteurs assure cela. En comparant la rentabilité des cellules cristallines, microcristallines ou amorphes avec celle des cellules tandem, on trouve que la rentabilité de cette dernière est significative.[55]

Le bénéfice de cette configuration est l'usage de deux matériaux avec des diverses bandes interdites (spectres d'absorption) et la totalité des deux spectres d'absorption est captée par cela. L'addition des tensions en circuit ouvert des deux cellules lorsqu'elles sont utilisées individuellement présente la tension en circuit ouvert d'un appareil, tandis que le courant de court-circuit est déterminé par la cellule ayant la valeur la plus basse entre les deux cellules. De plus, diverses catégories de matériaux peuvent être employés dans chacune des deux couches, ce qui offre une grande flexibilité lors de la fourniture des cellules.[41],[55]

Chapitre2 : Propriétés des matériaux pérovskites

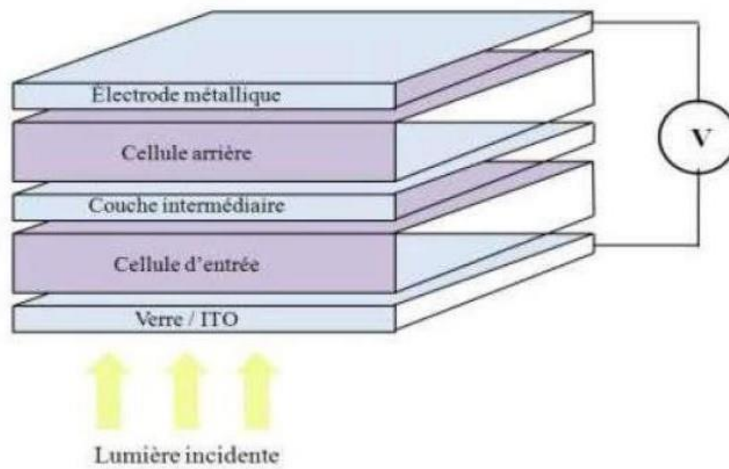


Figure 2.16 : Représentation d'une structure en tandem. [23]

En 2007, la production industrielle de ce type de batterie a débuté au Japon. En 2020 la société Orlikon en Suisse, a fabriqué des panneaux solaires à cellules tandem constitueront 30 % de la part de tout l'ensemble du secteur photovoltaïque. En 2007 l'entreprise a aussi initié à vendre ces produits.[41],[55]

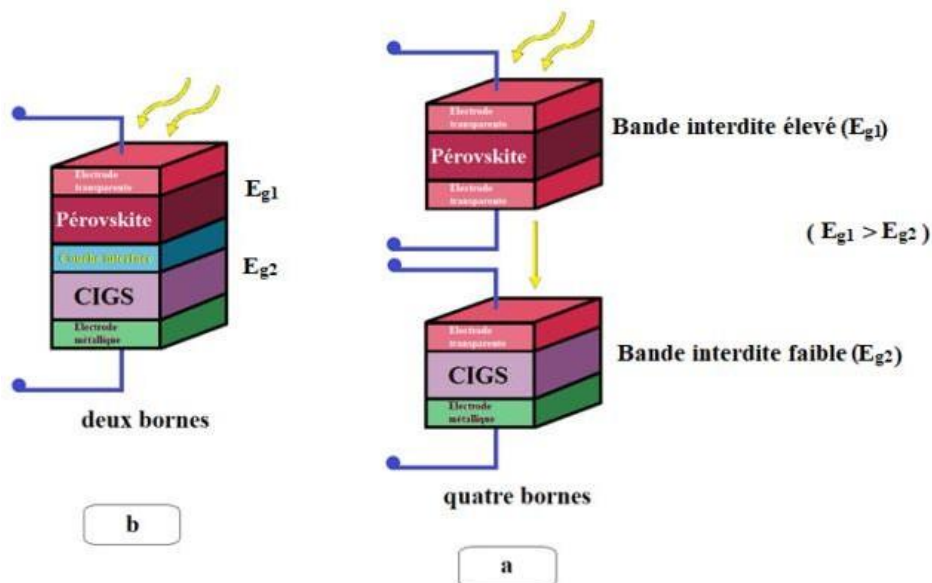


Figure 2.17 : Cellules solaires en tandem reliées a) par deux bornes et b) Quatre bornes. [23],[24]

Il est nécessaire d'avoir trois contacts transparents pour une configuration en série à quatre bornes empilées mécaniquement. La Figure 2.17 (a) expose la configuration tandem à quatre bornes mécaniquement accumulées. La réalisation individuellement des cellules CIGS et pérovskite offre un bénéfice pour ces cellules. Néanmoins, son principal obstacle réside dans son exigence de deux régulateurs.[55]

Chapitre 2 : Propriétés des matériaux pérovskites

Figure 2.17.(b) expose la configuration qui comporte un seul contact transparent aux deux extrémités c'est la configuration de la série monolithique. Grâce à la disposition d'un seul contact transparent, il est possible de capturer efficacement les couches intrinsèques. L'obstacle principal de cette structure est que la sous-cellule ayant une intensité plus faible, limite le courant photovoltaïque de la structure série.[55]

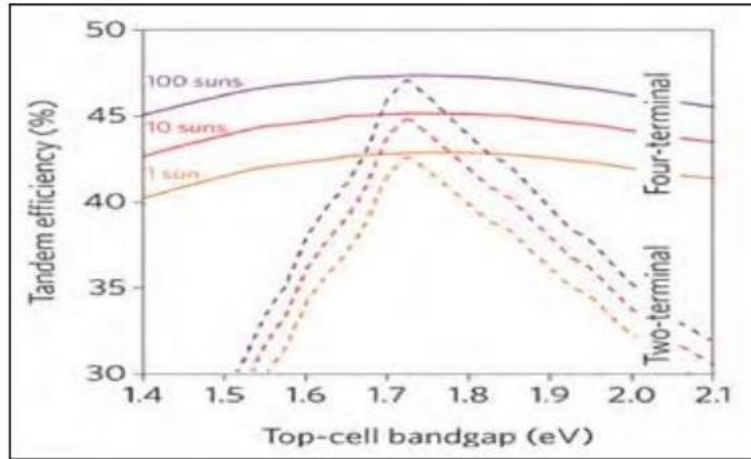


Figure 2.18 : La variation l'efficacité de la cellule en tandem en fonction de l'énergie de la bande interdite de la pérovskite [10],[24]

L'impact significatif de l'énergie de bande interdite de la cellule supérieure (pérovskite) sur l'efficacité des deux structures tandem (c'est-à-dire 2T et 4T) est mis en évidence dans la figure 2.18.[55]

On distingue deux configurations, 2T et 4T, qui sont employées pour empiler des matériaux photovoltaïques dans le but d'améliorer l'efficacité de la conversion de l'énergie solaire en électricité.[56]

2.13.1 Configuration 2T (deux terminaux) :

Configuration à deux bornes : Il y a une superposition des cellules qui partagent les mêmes contacts électriques (un positif et un négatif). Dans une configuration de 2T, les cellules sont reliées électriquement en série ou en parallèle, ce qui implique une compatibilité optique et électrique rigoureuse entre elles.[56]

Bien que la configuration 2T offre des avantages, mais elle peut être entravée par des contraintes liées à l'harmonisation des courants et des tensions entre les différentes couches.[56]

2.13.2 Configuration 4T (quatre terminaux) :

La configuration à quatre bornes : Chaque cellule solaire possède ses propres connexions électriques, ce qui permet une totale autonomie entre les différentes couches. Grâce à cette configuration, il est possible de combiner des cellules présentant des caractéristiques très variées, comme des largeurs de bande interdite différentes.[56]

La configuration 4T permet d'optimiser et d'ajuster les propriétés des différentes couches de manière plus flexible, mais elle est plus complexe et coûteuse à fabriquer

Chapitre2 : Propriétés des matériaux pérovskites

En raison de l'augmentation du nombre de connexions et de l'encapsulation nécessaire pour chaque cellule.[56]

2.14 Cellules organiques :

Les caractéristiques d'un semi-conducteur organique, qu'il soit cristallin ou polymère, sont similaires à celles des semi-conducteurs inorganiques. Il s'agit de la conduction par les électrons et les trous, ainsi que la bande interdite. On utilise le terme « organique » pour différencier ces semi-conducteurs des matériaux inorganiques tels que le silicium. L'utilisation des cellules photovoltaïques organiques a enregistré une croissance remarquable parmi toutes les technologies photovoltaïques au cours des quinze dernières années [57]. Une cellule photovoltaïque organique est un dispositif constitué d'une couche active organique (composé de polymères ou de petites molécules) d'une épaisseur de quelques centaines de nanomètres placé entre deux électrodes. L'une de ces électrodes est transparente, généralement en oxyde d'indium étain (ITO), déposé sur un substrat transparent tel que du verre ou du plastique. La cathode est recouverte d'aluminium après l'évaporation sur la couche active, qui est constituée de deux matériaux différents : l'un est destiné à transporter les trous et l'autre à transporter les électrons. [58]. La structure de la cellule organique est présentée dans la figure 2.19.

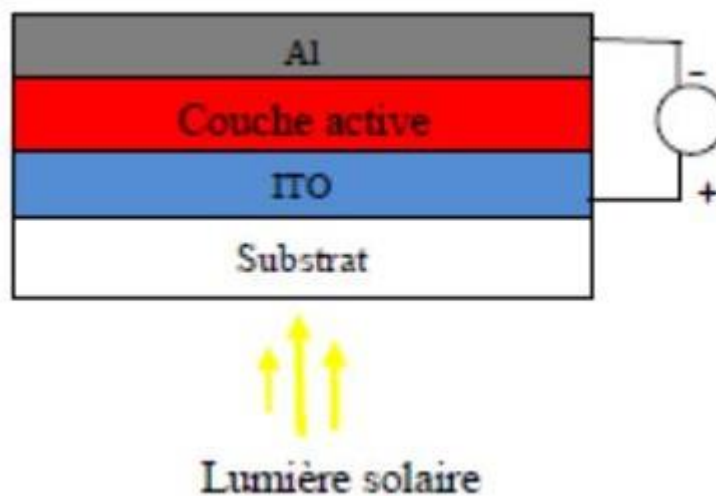


Figure 2.19 : Structure de la cellule organique [44],[59]

2.14.1 Principe de fonctionnement de cellule organique :

La génération de tension dans un dispositif photovoltaïque découle de la création de charges électriques suite à l'excitation du matériau par l'absorption de photon. Les charges ainsi produites de déplacement à travers le matériau vers un circuit électrique externe via des électrodes. Ces étapes de production et de transport des charges font appel à des semi-conducteur comme composants essentiels des cellules photovoltaïques [58]. La figure 2.20 présente le principe de fonctionnement de la cellule organique [58].

Chapitre 2 : Propriétés des matériaux pérovskites

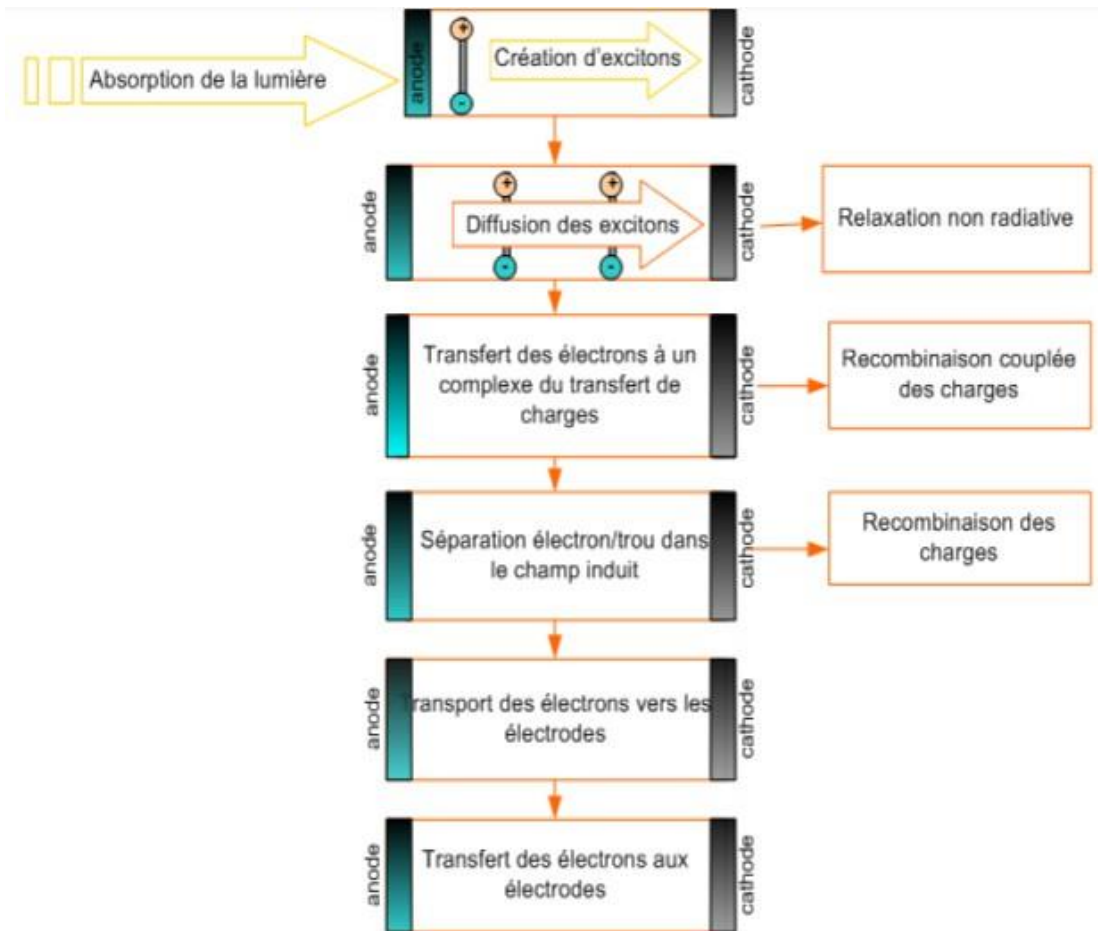


Figure 2.20 : Principe de fonctionnement de la cellule organique [27]

2.15 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté tout d'abord les différents types de la structure pérovskite et ses transitions de phase, les propriétés électriques et optiques de ce matériau qui offre un potentiel prometteur pour les applications photovoltaïques à cause de son gap direct et son fort coefficient d'absorption. Aussi nous avons montré le principe de fonctionnement des cellules pérovskites, tandem et organique

Chapitre2 : Propriétés des matériaux pérovskites

Références :

- [1]Z. El Jouad, « Réalisation et caractérisation des cellules photovoltaïques organiques », L'universit Bretagne Loire, 2016.
- [2]I. Fodil et A. Herous, « Etude et simulation d'une cellule solaire $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnI}_3$ », Université Mohamed Khider de Biskra, 2021.
- [3]M. BOUZEGANE et F. GAOUAOUI, « Alimentation d'un moteur à courant continu par une source photovoltaïque », Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, 2018.
- [4]A. HAOUECHE et B. MECHRI, « Etude et simulation d'une cellule solaire à pérovskite hybride a base de germanium par le simulateur SCAPS1-D », Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj, 2020.
- [5]R. Chettouh et B. Dou, « Effet de l'épaisseur de la couche absorbante sur une cellule solaire InGaP/GaAs », Université Echahid Hamma Lakhdar El-Oued, 2018.
- [6]« Connaissance des énergies : infos pétrole,énergie renouvelable,photovoltaïque ».Disponible sur:
<https://www.connaissancedesenergies.org/>
- [7]E. B, « Mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires », *C.R. Acad. Sci*, vol. 9, 1839.
- [8]T. Berrouba et N. Kaddouri, « Optimisation des parametres géométrique et physique de cellules photovoltaïques a contacts arriere interdigites », université Abou -bokr Belkaid -Tlemcen, 2014.
- [9]D. Djicknoum, « Cellules photovoltaïques silicium à hétérojonctions et à structures interdigitée en face arrière », L'université paris-sud 1 1 faculté des science d'oersay, 2010.
- [10]A. W.G et D. RE, « On the Action of Light on Selenium », *Proc. R. Soc. London*, vol. 25, 1876.
- [11]F. C.E, *J. Frankl. Inst.*, vol. 119, p. 221.
- [12]C. Bouchikhi, « Évaluation et simulation des performances d'une cellule solaire pérovskite pour des différents matériaux en couches de transport d'électrons et de trous », UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID – TLEMEN, 2021.
- [13]M. Q, « Les cellules photovoltaïques, cœur des panneaux solaires ».
- [14]C. D.M, F. C.S, et P. G.L, « A New Silicon P-N Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power », *J. Appl. Phys*, vol. 25, 1954.
- [15]B. Youcef et B. Noura, « Évaluation expérimentale des performances de la centrale solaire photovoltaïque de 53 MW installée dans la région de Djelfa », UNIVERSITE AHMED DRAIA-ADRAR-, 2021.

Chapitre2 : Propriétés des matériaux pérovskites

- [16]N. TALHI, « Étude et prédiction de structures cristallines de cellules pérovskites », UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID - TLEMCEM, 2021.
- [17]R. A, *Photopiles Solaires*. Paris: Presses Polytechniques et Universitaires romandes, 1996.
- [18]S. Belaid Lalouni, « Cours Energie Solaire Photovoltaïque ». Université A.MIRA de BEJAIA, 2015 2014.
- [19]« Qu'est-ce que l'énergie solaire: exploitation thermique, photovoltaïque, thermodynamique ».Disponible sur: <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie-solaire>
- [20]A. Touahria et Y. Djendel, « Modélisation VHDL-AMS d'une cellule photovoltaïque », Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj, 2021.
- [21]J. C. C, *Physics of Solar Energy*, 1st ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons Inc, 2011.
- [22]F. Rahmani, H. Saoud, et faycel Bouchaala, « Etude et simulation d'une cellule solaire bi-faciale », UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, 2021.
- [23]« La cellule photovoltaïque : comment ça marche ? » Disponible sur: <https://www.planete-energies.com/fr/media/article/cellule-photovoltaïque-comment-ca-marche>
- [24]H. Ben cherif, « Etude et modélisation analytique d'une cellule solaire à base de SiGe », Université Hadj lakhdar Batna, Faculté De Technologie.
- [25]Yumpu.com, « Les principes de l'énergie solaire photovoltaïque - 123 Solaire » Disponible sur: <https://www.yumpu.com/fr/document/view/4084959/les-principes-de-lenergie-solaire-photovoltaïque-123-solaire>
- [26]H. NAIM, « 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 », 2016.
- [27]I. eddine CHAMEKHI, « Comparaison par Simulation Numérique entre une Cellule Solaire à Base du Silicium Cristallin de type P en Couches Minces et une Cellule solaire à Base du Silicium Cristallin de type N en Couches Minces », Université Ibn Khaldoun – Tiaret, 2017.
- [28]Q. M. Futura, « Les cellules au CdTe : minces, rentables... mais toxiques ? », Futura. Disponible sur: <https://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/developpement-durable-cellules-photovoltaïques-coeur-panneaux-solaires-1688/page/10/>
- [29]A. Bouraioui, « Élaboration et Caractérisation des Couches Minces CuInSe₂ par Électrodéposition », 2009.
- [30]T. V.V, R. Nurul A.A, et S. Jeyraj A./L, « Progress in solar PV technology: Research and achievement », p. 443-461, avril 2013.

Chapitre2 : Propriétés des matériaux pérovskites

- [31]A. A. Kanoun, « Etude théorique et prédictive des nouveaux matériaux pour conception des cellules solaires et applications photovoltaïques », Université ABOU-BEKR BELKAID-TLEMCEN, 2019.
- [32]D. P.C et B. W.J, « How the West was Won? A History of Organic Photovoltaics », p. 99-110, novembre 2019.
- [33]J. C.B, « Synthèse et caractérisation de pérovskites doubles magnétorésistives dérivées de Sr_2FeMoO_6 ».
- [34]O. Ben Mya, « Synthèse et Caractérisation de la pérovskite $La_{1-x}Sr_xFe_{0.7}Ni_{0.3}O_3$ », 2015.
- [35]M. GOUFI et B. HAMDOUNI, « Etude et Simulation D'une Cellule Photovoltaïque à Pérovskite », Université Larbi Bun M'Hidi O.E.B, 2020.
- [36]O. O, « Les cellules solaires à base de matériaux pérovskites - Structures et performances », p. 515-520, 2018.
- [37]N. TALHI, « Étude et prédiction de structures cristallines de cellules pérovskites », UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID - TLEMCEN, 2020.
- [38]B. Mathilde, « Pérovskites halogénées AMX_3 : synthèse, substitution cationique et étude structurale », Université Grenoble Alpes, 2018.
- [39]D. Pia, « Cellules Solaires à base de Pérovskites : De la caractérisation des matériaux à l'amélioration des rendements et de la stabilité », Université Grenoble Alpes, 2019.
- [40]Z. WALID et M. TRACHE, « Etude et Simulation d'une cellule solaire à pérovskite hybride à base Tin Iodide de césium ($CsSnI_3$) par le simulateur GPVDM », UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ – BOUIRA -, 2021.
- [41]B. S. Z. laabidine BEN SAOUCHE et D. B. DJEHICHE, « Simulation numérique de la cellule solaire Tandem Pérovskite/CIGS », UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 2019.
- [42]M. A. Elarifi et W. Aiche, « simulation et optimisation d'une cellule solaire à base des matériaux pérovskite hybride $CH_3NH_3PbI_3-xCl_x$ », Université Saad Dahlab de Blida, 2019.
- [43]P. C, « Modelling the Crystal Structures of Aurivillius Phases », vol. 3, n° 1-2, p. 115-123, 2001, doi: 10.1016/S0167-2738(01)00699-3.
- [44]M. ADJAL et N. HOURI, « Les structures pérovskites en feuillets », Université Mohamed Khider de Biskra, 2021.
- [45]F. ISSAOUI, « Etude des propriétés magnétiques des matériaux à bases des métaux de transition sous forme de poudre (A_2BO_4) et monocristaux (RMX_5) », L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE, 2012.

Chapitre2 : Propriétés des matériaux pérovskites

- [46]S. W. P *et al.*, « Structures, Phase Transitions and Tricritical Behavior of the Hybrid Perovskite Methyl Ammonium Lead Iodide », vol. 6, n° 35685, doi: 10.1038/srep35685.
- [47]K.ADAIKA, « SYNTHÈSE ET CARACTERISATION PHYSICOCHIMIQUE DES OXYDES La Cr_{1-x}Cu_xO₃. », Université Mohamed Kheider-Biskra, 2015.
- [48]K. Hamza, « ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DES MINES ET METALLURGIE ENSMM-Annaba- », ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DES MINES ET METALLURGIE ENSMM-Annaba-, 2017.
- [49]J. Khaoula, « Synthèse et auto-assemblage de molécules de pérovskite pour la photonique et le marquage », Université Paris Saclay (COMUE), 2016.
- [50]D. Hiba, « Propriétés optiques des pérovskites hybrides 3D pour le photovoltaïque », Université Paris Saclay (COMUE), 2017.
- [51]C. Bouchikhi, « Évaluation et simulation des performances d'une cellule solaire pérovskite pour des différents matériaux en couches de transport d'électrons et de trous », UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID – TLEMCEN, 2020.
- [52]G. M. A., H.-B. A, et S. H. J, « The Emergence of Perovskite Solar Cells », vol. 8, p. 506-514, 2014.
- [53]L. KADRI, « Etude, synthèse et optimisation de la couche compacte de TiO₂ pour applications cellules solaires », université Oran Mohamed Boudiafe, 2020.
- [54]M. BENNAOUM, « Etude Théorique des Cellules Solaires à base de Pérovskites », UNIVERSITE DJILLALI LIABES -SIDI BEL ABBES, 2021.
- [55]A. HAMZA, « Simulation numérique d'une cellule solaire Tandem empilée mécaniquement Pérovskite/CIGS », Université Mohamed Khider de Biskra, 2021.
- [56]D. Jane et S. John, « Optimizing Perovskite Layers in Tandem Solar Cells: A Comparative Study of 2T and 4T Configurations », 2023, doi: 10.1016/j.solmat.2023.110312.
- [57]L. BENMENIA et A. BELMERABET, « Modélisation et simulation des cellules photovoltaïques organiques transparentes », UNIVERISTIE LARBI TEBESSI – TEBESSA, 2022.
- [58]TOUMI Menad et MESSAOUDI Hamid, « ETUDE DE FONCTIONNEMENT D'UNE CELLULE SOLAIRE GRATZEL », Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2017.
- [59]M. A. Moulay, « Cellules solaires pérovskites imprimées et optimisation des couches pérovskites pour les cellules tandems », ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE UNIVERSITÉ DU QUÉBEC., 2019.
- [60]« What is OghmaNano? ».
- [61]N. TALHI, « Étude et prédiction de structures cristallines de cellules pérovskites », UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID - TLEMCEN, 2021.

Chapitre2 : Propriétés des matériaux pérovskites

[62]B. BOULESBAA, « Étude de l'effet des caractéristiques de la couche TCO sur les propriétés de la cellule PV en silicium », Université Mohammed Seddik BENYAHIA - Jijel, 2019.

[63]S. E. Khemidja et A. Laksi, « Amélioration de la Stabilité et de l'efficacité des Cellules Solaires à Pérovskites », Université Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj, 2023.

[64]« Manual: OghmaNano - Organic and hybrid Material Nano Simulation tool ». Disponible sur: <https://www.oghma-nano.com/docs.html?page=Manual>

[65]« Manual: OghmaNano - Organic and hybrid Material Nano Simulation tool ». Disponible sur: <https://www.oghma-nano.com/docs.html?page=Videos>

[66]H. MOHAMED SEGHIR et H. MOKRANI, « Simulation d'une cellule solaire photovoltaïque organique à réseau interpénétré avec le logiciel GPVDM », UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU, 2018.

[67]M. Sadiq, A. Muhammad, et A. Naveed, « Numerical investigation of a new approach based on perovskite CH₃NH₃PbI₃ absorber layer for high-efficiency solar cells », 2021, doi: 10.1088/2053-1591/ac2377.

Chapitre3 : Présentation du fonctionnement du Logiciel GPVDM

Chapitre3 : Présentation du fonctionnement du logiciel GPVDM

Chapitre3 : Présentation du fonctionnement du logiciel GPVDM

3.1 Introduction :

Le logiciel GPVDM est un outil de modélisation et de simulation employé dans le domaine de la photovoltaïque. Il simule le comportement des cellules solaires et des systèmes photovoltaïques en tenant compte de multiples paramètres tels que l'ensoleillement, la température, les caractéristiques des cellules tels que les épaisseurs des diverses couches, etc.

L'usage du logiciel GPVDM par les chercheurs, les ingénieurs et les concepteurs de systèmes photovoltaïques est en évolution permanente, pour optimiser la conception et le rendement des installations solaires. Cela est dû à son interface conviviale et des fonctionnalités avancées qui permet une meilleure analyse des performances des cellules solaires et des systèmes photovoltaïques.

3.2 Historique de GPVDM :

Le GPVDM a été conçu à l'origine à l'Imperial Collège en 2011 afin de simuler des cellules solaires organiques. Depuis lors, le logiciel a subi de nombreuses révisions et réécritures.[1]

27/01/2012 : Le modèle s'appelle Modèle de dispositif photovoltaïque organique (OPVDM) et il est accessible au public en ligne.[1]

17/01/2016 : OPVDM a été introduit dans le programme et le modèle a été modifié et il est devenu « GPVDM » (modèle d'appareil photovoltaïque à l'usage général). À cause de la célébrité progressant des pérovskites.[1]

14/10/2022 : Le nom OghmaNano a été donné au modèle afin de mettre en évidence sa capacité à simuler de diverses catégories de dispositif, notamment des transistors. Ce nouveau nom évoque son rôle élargi en tant qu'outil de nano simulation de matériaux organiques et hybrides.[1]

Actuellement, le modèle peut simuler une large gamme d'appareils, notamment des cellules solaires, des capteurs, des OFET, des OLED et de diverses autres catégories d'appareils.[1]

3.3 Définition de GPVDM :

Initialement il était nommé OPVDM, un logiciel de simulation des cellules solaires organiques. Il a été conçu dans l'objectif de simuler spécifiquement les dispositifs organiques [2]. Cependant, avec le temps, ses fonctionnalités se sont élargies pour envelopper la simulation d'autres catégories de dispositifs photovoltaïques [2]. Ce qui a conduit à la transformation du nom à GPVDM, qui reflète cette évolution vers une gamme plus large de dispositifs photovoltaïques simulables [2]. IL est fondé sur la méthode de différences finies pour les équations de la diffusion de la dérive. De plus il

Chapitre3 : Présentation du fonctionnement du logiciel GPVDM

emploie les équations optiques en employant soit le lancer de rayons, soit la méthode de la matrice de transfert. [3]

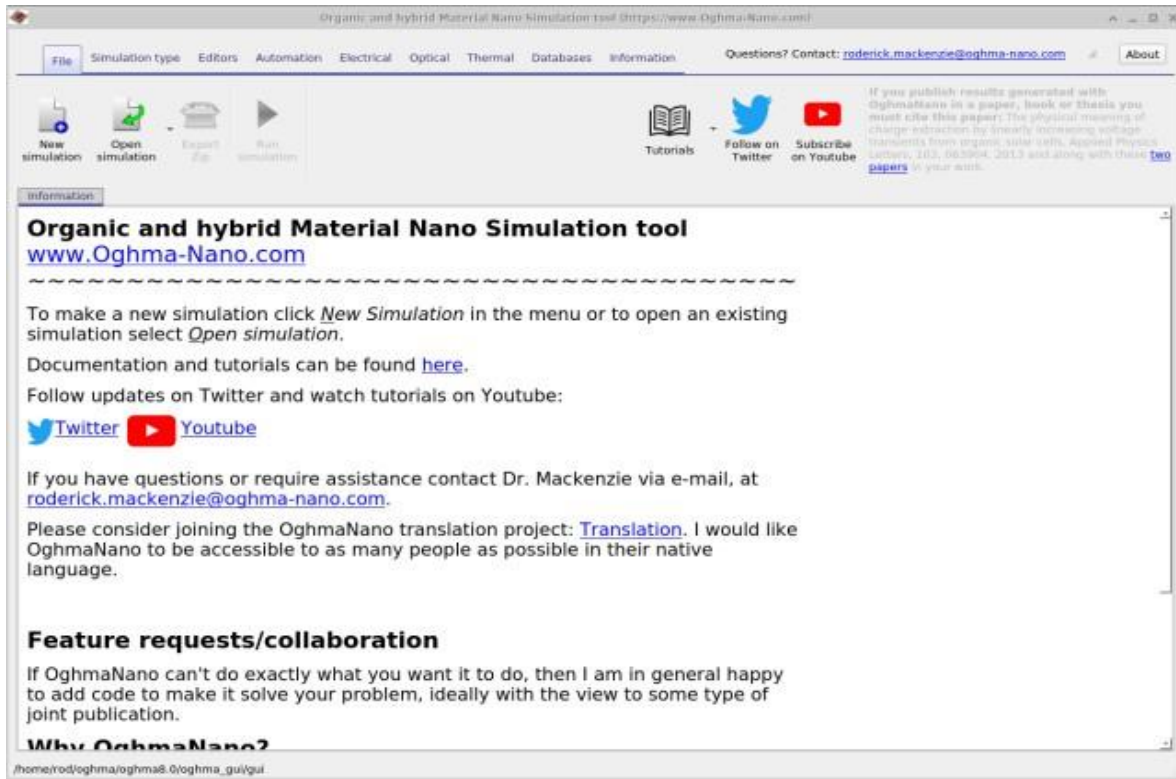


Figure 3.1 : Interface GPVDM. [4]

3.4 Etapes à suivre pour faire une simulation de cellules avec le GPVDM :

Pour lancer une simulation, on clique sur nouvelle simulation

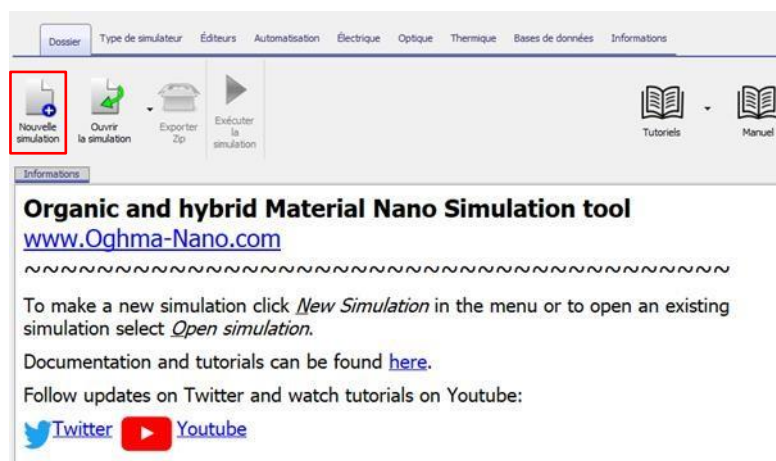


Figure 3.2 : Création d'une nouvelle simulation [4]

Chapitre3 : Présentation du fonctionnement du logiciel GPVDM

On fait une double clique pour choisir le modèle qu'on veut étudier par exemple Pérovskite

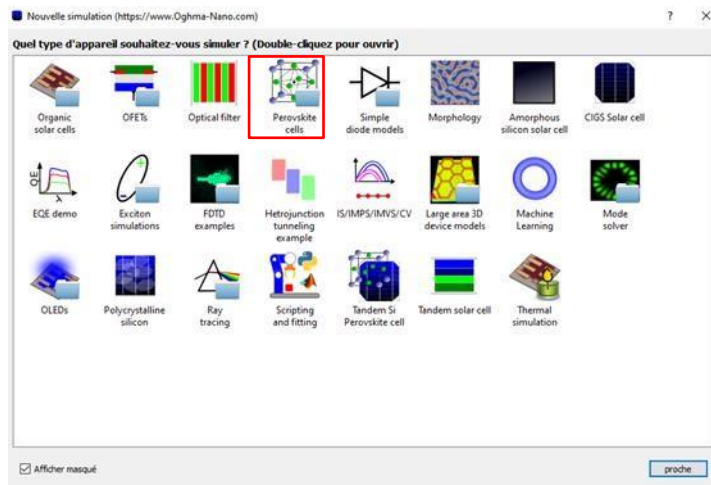


Figure 3.3 : Simulation de pérovskite. [4]

Nous choisissons le dossier où enregistrer La simulation et les résultats de la simulation

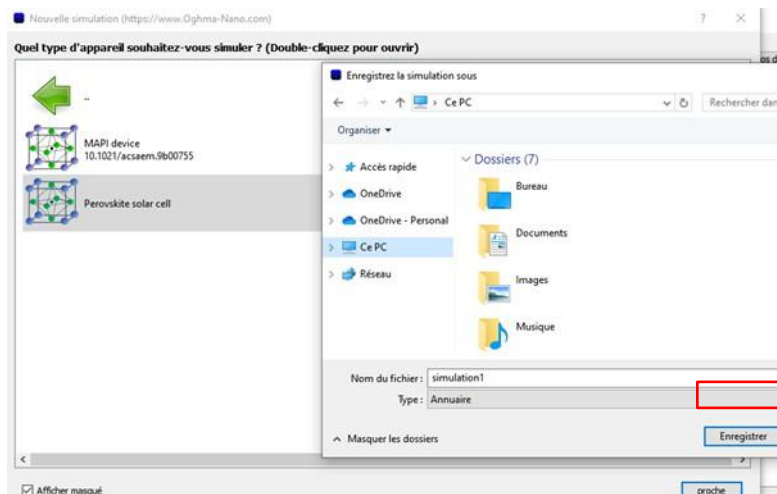


Figure 3.4 : Enregistrement de la simulation et les résultats de simulation [5]

Pour ajuster l'épaisseur et changer les matériaux on utilise l'éditeur de couches

Chapitre3 : Présentation du fonctionnement du logiciel GPVDM

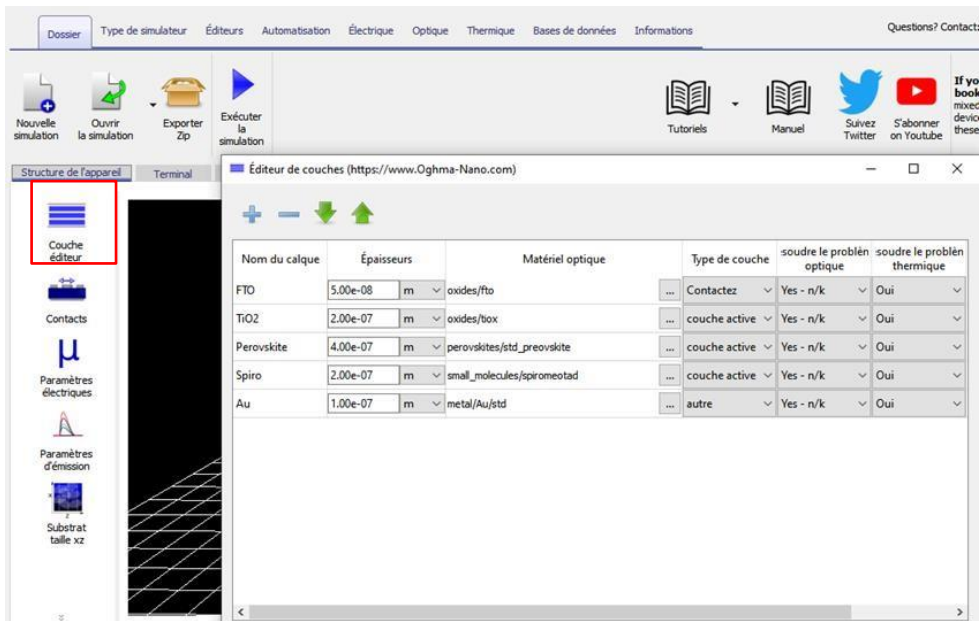


Figure 3.5 : Changement des épaisseurs et des matériaux formant la cellule étudiée [5]

Pour modifier les paramètres électriques on clique sur « paramètres électriques »

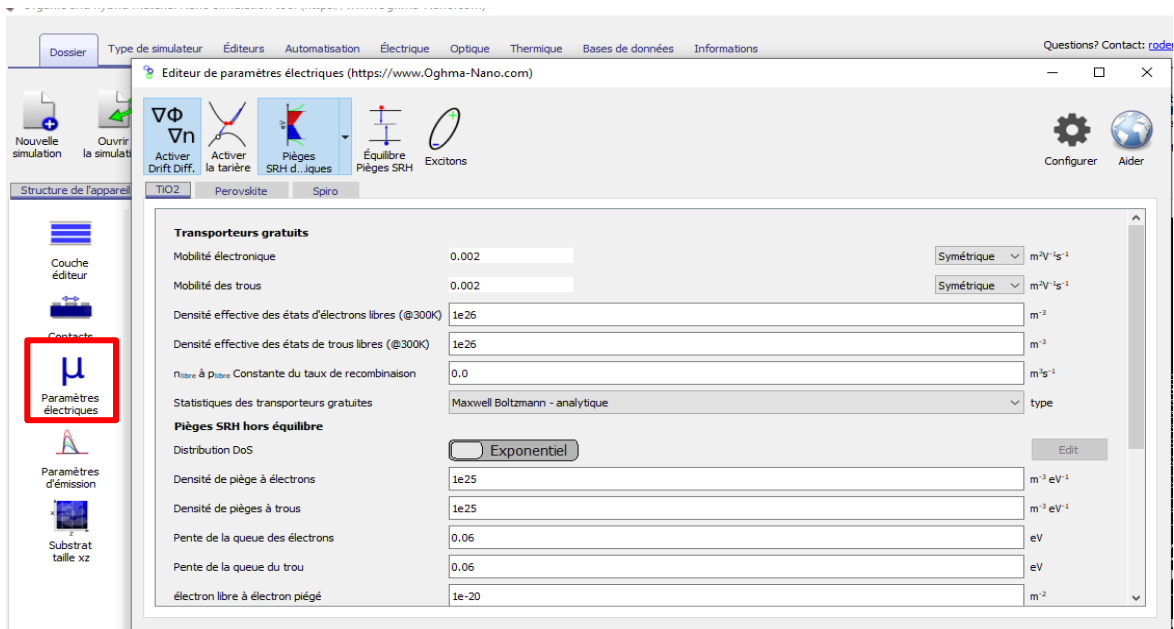


Figure 3.6 : Changement des paramètres électriques [5]

Chapitre 3 : Présentation du fonctionnement du logiciel GPVDM

Après on exécute la simulation en cliquant sur « Exécuter Simulation »

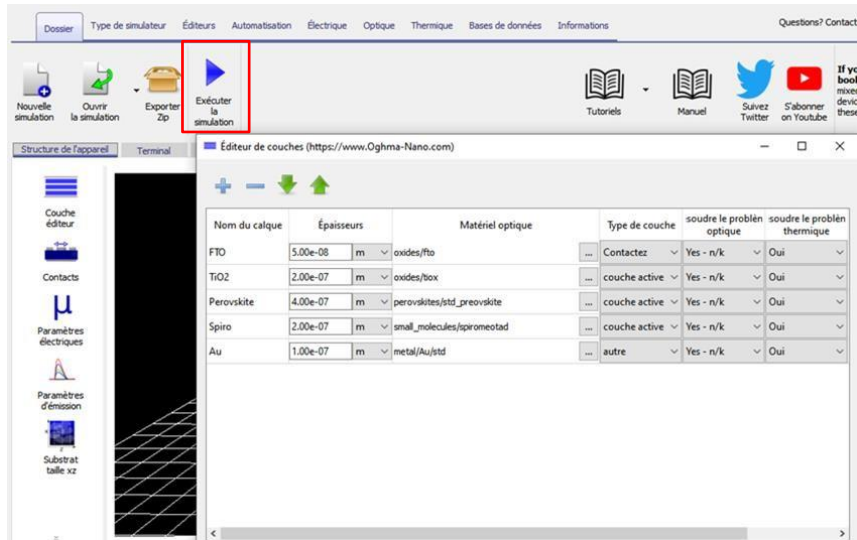


Figure 3.7 : Exécution de la simulation [4]

Pour voir les résultats qui nous intéressent on clique sur « Production »

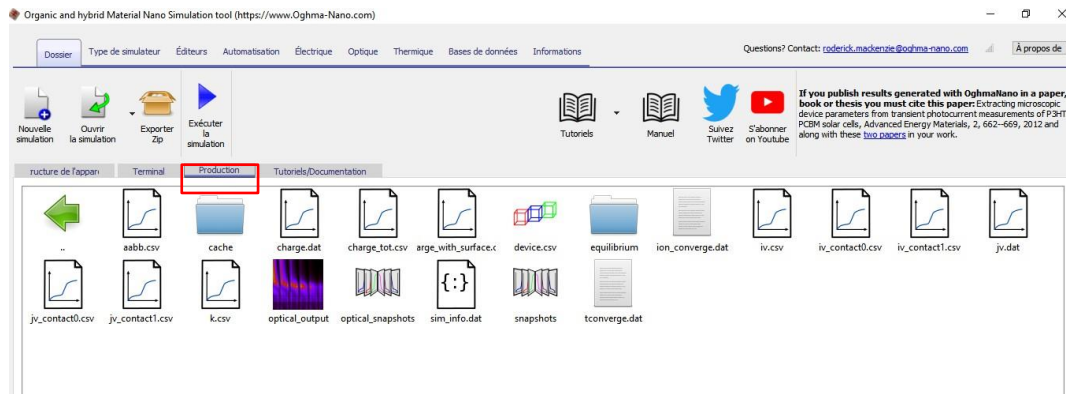


Figure 3.8 : Les résultats de simulation [4]

Chapitre3 : Présentation du fonctionnement du logiciel GPVDM

3.5 Types de couches de GPVDM :

Type de couche	Description	Résolution électrique des Équations	Résolution Optique des Équations
Active	Les couches sont usées pour résoudre le modèle électrique, chaque couche avoir son propre totale de paramètres électriques.	Oui	Oui
Autre	Dans ces couches, il n'y a pas d'équation électrique solutionnée.	Non	Oui
Contact	Les contacts sont établis à l'aide de ces couches, aucune équation électrique n'est solutionnée dans ces couches.	Non	Oui

Tableau 3-1 : Types de couches dans GPVDM [6]

Pour chaque couche utilisée dans la cellule étudiée on précise leur types :

Couche conductrice transparente : L'entrée de la lumière dans la cellule est habituellement bénéficiée en employant de l'oxyde d'indium et d'étain (ITO) ou de l'oxyde d'étain dopé à l'antimoine (FTO).[7]

La couche de transport d'électrons (ETL) : Afin de contribuer le transport des électrons, l'oxyde de titane (TiO₂) ou de l'oxyde de zinc (ZnO) est exploité usuellement comme couche de transport d'électrons (ETL).[7]

La couche de pérovskite (couche active) : La couche de pérovskite est conformée de matériaux tels que le triiodure de plomb méthylammonium (CH₃NH₃PbI₃), qui absorbe la lumière et génère des paires d'électrons et des trous.[7]

La couche de spiro-OMeTAD (HTL) : est placée entre l'électrode en Or et la couche active pour privilégier le mouvement des trous.[7]

Une couche de métal, habituellement l'argent (Ag) ou l'aluminium (Al) est employée pour la collecte des électrons.[7]

3.6 Théorie de la modélisation de la diffusion de dérive :

3.6.1 Transport par transporteur de charges :

Pour modéliser le mouvement des porteurs, nous résolvons l'équation de dérive-diffusion ambipolaire dans l'espace des positions. [4]

Chapitre3 : Présentation du fonctionnement du logiciel GPVDM

Pour les électrons :[4]

$$J_n = q\mu_e n \nabla E_c + qD_n \nabla n \quad (\text{III-1})$$

Où :

J_n : Densité de courant de transport des porteurs de charges négatives (électrons)

q : Charge élémentaire (-1.6×10^{-19} C)

μ_e : La mobilité des porteurs de charge négative dans le matériau.

n : La densité des porteurs de charge négative (électrons).

E_c : Energie de la bande de conduction

D_n : C'est le coefficient de diffusion des porteurs de charge négative.

∇n : Le gradient de la densité des électrons.

Pour les trous :[4]

$$J_p = q\mu_h p \nabla E_v + qD_p \nabla p \quad (\text{III-2})$$

J_p : Densité de courant de transport des porteurs de charges positifs (Trous)

μ_h : C'est la mobilité des porteurs de charge positifs dans le matériau.

p : La densité des porteurs de charge positifs (Trous).

E_v : Energie de la bande de valence

D_p : Le coefficient de diffusion des porteurs de charge positifs (Trous)

∇p : Le gradient de la densité des trous.

3.6.1.a Equation de continuité électronique : [4]

$$\nabla J_n = q(R - G + \frac{\partial n_{free}}{\partial t}) \quad (\text{III-3})$$

Où

∇J_n : est le gradient de la densité de courant, indiquant la variation spatiale du courant.

q : La charge élémentaire ($q = -1.6 \times 10^{-19}$ C)

R et G sont respectivement les taux nets de recombinaison et de génération par unité de volume.

$\frac{\partial n_{free}}{\partial t}$: Le taux de changement temporel de la densité des porteurs de charge négatifs libres.

3.6.1.b Equation de continuité de trou :[4]

$$\nabla J_p = -q(R - G + \frac{\partial p_{free}}{\partial t}) \quad (\text{III-4})$$

Où

Chapitre3 : Présentation du fonctionnement du logiciel GPVDM

∇J_p : Le gradient de la densité de courant, indiquant la variation spatiale du courant.

R et G sont respectivement les taux nets de recombinaison et de génération par unité de volume.

q : La charge élémentaire ($q = -1.6 \times 10^{-19}$ C)

$\frac{\partial p_{free}}{\partial t}$: Le taux de changement temporel de la densité des porteurs de charge positifs libres.

3.6.2 Potentiel électrostatique :

Pour identifier la répartition du potentiel électrique à l'intérieur de l'appareil, nous résolvons l'équation de Poisson : [4]

$$\nabla \cdot \epsilon_0 \epsilon \nabla = q(n_f + n_t - p_f - p_t - N_{ad} + -N_{ion} + a) \quad (\text{III-5})$$

Où

n_f , n_t sont les densités de porteurs des électrons libres et piégés

p_f et p_t sont les densités de porteurs des trous libres et piégés

N_{ad} est la densité de dopage.

N_{ion} est l'arrière-plan densité des ions pérovskites

a est la densité des ions mobiles.[4]

3.6.3 Piégeage et recombinaison de porteurs hors équilibre à l'aide des états de piège Shockley-Read-Hall :

La théorie de Shockley-Read-Hall (SRH) est employée dans le modèle pour représenter la capture de charges dans les états de piégeage et la recombinaison qui y est liée. Selon cette théorie, les électrons et les trous sont capturés dans les pièges et s'en échappent à des taux spécifiques[4]. Les trous dans l'espace électronique sont capturés lors de la recombinaison. On calcule l'équilibre des porteurs pour chaque niveau de piège. Ce qui donne à chaque niveau de piège un niveau de Fermi quasi-indépendant. Il est possible de répartir chaque point dans l'espace de position entre 10 et 160 états de piège distincts.[8]

Chapitre3 : Présentation du fonctionnement du logiciel GPVDM

$$\frac{\partial n}{\partial t} = r_{ec} - r_{ee} - r_{hc} + r_{he} \quad (\text{III-6})$$

Où :

r_{ec} : Taux de capture d'électrons
 r_{ee} : Taux d'échappement des électrons

r_{hc} : Taux de capture de

r_{he} : Taux d'évasion des trous

3.6.4 Recombinaison d'équilibre Shockley-Read-Hall : [4]

Pour les systèmes matériels hautement ordonnés avec peu d'états de piège, la description des états de piège SRH peut être simplifiée à l'aide de l'équation suivante :[4]

$$R^{SRH} = \frac{n_p - n_0 \times p_0}{\tau_p(n + n_1) + \tau_p(p + p_1)} \quad (\text{III-7})$$

Avec :

R^{SRH} : Est le taux de recombinaison SRH

n, p : sont la densité de porteurs de charge libres

n_0, p_0 : sont la densité d'équilibre des porteurs de charge

$\tau_{n,p}$: sont les durées de vie SRH

n_1, p_1 : sont les densités d'électrons et de trous piégés lorsque le niveau de Fermi correspond à l'énergie de l'état du piège. Ceci peut être activé dans l'éditeur de paramètres électriques.

Chapitre3 : Présentation du fonctionnement du logiciel GPVDM

3.7 Le modèle optique:[4]

Dans le cas d'une onde plane, la corrélation entre les champs électriques et magnétiques est décrite par les équations de Maxwell [4]

$$\nabla \times E = -j\mu H \quad (\text{III-8})$$

Ce qui se simplifie en :

$$\frac{\partial E}{\partial z} = -j\mu H \quad (\text{III-9})$$

Avec :

j : La densité de courant libre.

μ : La perméabilité magnétique du matériau.

H : Le champ magnétique.

3.8 Les avantages de GPVDM :

L'étude de l'impact des propriétés matérielles telles que la mobilité, le désordre énergétique, les sections efficaces de dopage et de recombinaison sur les performances des dispositifs photovoltaïques est simplifiée par le logiciel GPVDM. Toutes les données internes du dispositif simulé, comme la densité de courant, la densité de charge, la caractéristique courant-tension, ainsi que la répartition des porteurs piégés en position et l'espace d'énergie sont réalisable via l'interface graphique du logiciel ou directement par le fichier de sortie. En revanche, l'évolution de la technologie des cellules solaires dépend de notre compréhension du fonctionnement de ces dispositifs.

On envisage la simulation comme un moyen précieux pour obtenir ces informations.[3]

3.9 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté le logiciel GPVDM en donnant un historique sur la conception et l'évolution du logiciel, ensuite nous avons donné les étapes pour réaliser une simulation et les diverses équations sur lesquelles le logiciel est fondé.[6]

Chapitre3 : Présentation du fonctionnement du logiciel GPVDM

Références :

- [1] H. MOHAMED SEGHIR et H. MOKRANI, « Simulation d'une cellule solaire photovoltaïque organique à réseau interpénétré avec le logiciel GPVDM », UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU, 2018.
- [2] « What is OghmaNano? ».
- [3] N. TALHI, « Étude et prédiction de structures cristallines de cellules pérovskites », UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID - TLEMCEM, 2021.
- [4] « Manual: OghmaNano - Organic and hybrid Material Nano Simulation tool ». Disponible sur: <https://www.oghma-nano.com/docs.html?page=Manual>
- [5] B. BOULESBAA, « Étude de l'effet des caractéristiques de la couche TCO sur les propriétés de la cellule PV en silicium », Université Mohammed Seddik BENYAHIA - Jijel, 2019.
- [6] « electricalparams.pdf ». Disponible sur: <https://www.oghma-nano.com/docs/tutorials/electricalparams.pdf>
- [7] S. E. Khemidja et A. Laksi, « Amélioration de la Stabilité et de l'efficacité des Cellules Solaires à Pérovskites », Université Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj, 2023.
- [8] « Manual: OghmaNano - Organic and hybrid Material Nano Simulation tool ». Disponible sur: <https://www.oghma-nano.com/docs.html?page=Videos>

Chapitre 4 : Etude des propriétés d'une cellule pérovskite par le logiciel GPVDM

Chapitre4 : Etude des propriétés d'une cellule pérovskite par le logiciel GPVDM

Chapitre4 : Etude des propriétés d'une cellule pérovskite par le logiciel GPVDM

4.1 Introduction :

Les scientifiques et les ingénieurs utilisent la simulation pour améliorer et développer les cellules solaires. En effet, la simulation du fonctionnement d'une cellule solaire est basée sur la modélisation mathématique et informatique des processus physiques qui se produisent à l'intérieur de la cellule solaire. Cela comporte la capture de la lumière solaire, la génération de paires électron-trou, la séparation des charges, le transport des porteurs de charge et la production de courant électrique. En utilisant des logiciels de simulation spécialisés tel que le logiciel que nous avons utilisé dans notre travail en récurrence le ("GPVDM Generalized Photovoltaic Device Model" (Modèle Généralisé de Dispositif Photovoltaïque en français), il est possible de prédire les performances d'une cellule solaire en fonction de différents paramètres tels que la composition des matériaux, l'épaisseur des couches, l'intensité de la lumière solaire, la température, etc. Les simulations peuvent aider à optimiser la conception des cellules solaires et à améliorer leur efficacité énergétique.

4.2 Simulation de la pérovskite hybride :

Le tableau suivant présente les matériaux utilisés dans les couches de la cellule pérovskite étudiée dans notre simulation, avec leurs épaisseurs avant l'optimisation :

Nom de couche	Epaisseur (nm)	Matériaux
FTO	50	Oxides/fto
TiO_2	200	Oxides/tiox
<i>Pérovskite</i>	400	Pérovskites/std-pérovskite
Spiro	200	Smal-molécules/spiromeotad
Au	100	Metal/Au/std

Tableau 4-1 : Matériaux utilisés dans les couches de la cellule pérovskite hybride avec leurs épaisseurs avant l'optimisation.

Nous changeons l'épaisseur de chaque couche, afin d'optimiser les valeurs de la tension en circuit ouvert V_{oc} et la puissance de conversion d'énergie PCE , et voir la valeur d'épaisseur optimale pour chaque couche de la cellule pérovskite hybride.

4.3 Les paramètres de la cellule étudiée :

Le tableau suivant présente les paramètres de la cellule pérovskite étudiée :

Chapitre4 : Etude des propriétés d'une cellule pérovskite par le logiciel GPVDM

	TiO_2	Pérovskite	Spiro
La densité d'électrons ($m^{-3}eV^{-1}$)	$1e^{25}$	$1e^{20}$	$1e^{20}$
La densité des trous ($m^{-3}eV^{-1}$)	$1e^{25}$	$1e^{20}$	$1e^{20}$
Mobilité des électrons ($m^2v^{-1}s^{-1}$)	0.002	0.002	0.002
Mobilité des trous ($m^2v^{-1}s^{-1}$)	0.002	0.002	0.002
Permittivité relative	20	20	20
Densité effective d'états d'électrons libres (m^{-3})	$1e^{25}$	$1e^{26}$	$1e^{26}$
Densité effective d'états trous libres (m^{-3})	$1e^{25}$	$1e^{26}$	$1e^{26}$
Travail de sortie χ (eV)	3.8	3.8	3.8
E_g (eV)	1.6	1.6	1.6
Le taux de Recombinaison (m^3S^{-1})	0	$1e^{-15}$	0

Tableau 4-2 : Paramètre électrique de la cellule pérovskite hybride étudiée

4.4 Résultats de la simulation

4.4.1 Effet de la variation de l'épaisseur des différentes couches sur Les caractéristiques de la cellule pérovskite :

Nous varions l'épaisseur de chaque couche et nous traçons ensuite la variation du potentiel à circuit ouvert V_{co} et de la puissance de conversion d'énergie PCE en fonction de l'épaisseur de la couche

4.4.1.1 La couche FTO :

C'est une couche conductrice transparente, qui permet le passage de la lumière. Après la modification de l'épaisseur de cette couche nous obtenons les résultats donnés dans la figure 4.1, pour la variation du potentiel à circuit ouvert V_{oc} en fonction de

Chapitre4 : Etude des propriétés d'une cellule pérovskite par le logiciel GPVDM

L'épaisseur de la couche FTO, et la figures 4.2 pour la variation de la puissance de conversion d'énergie PCE en fonction de l'épaisseur de la couche FTO.

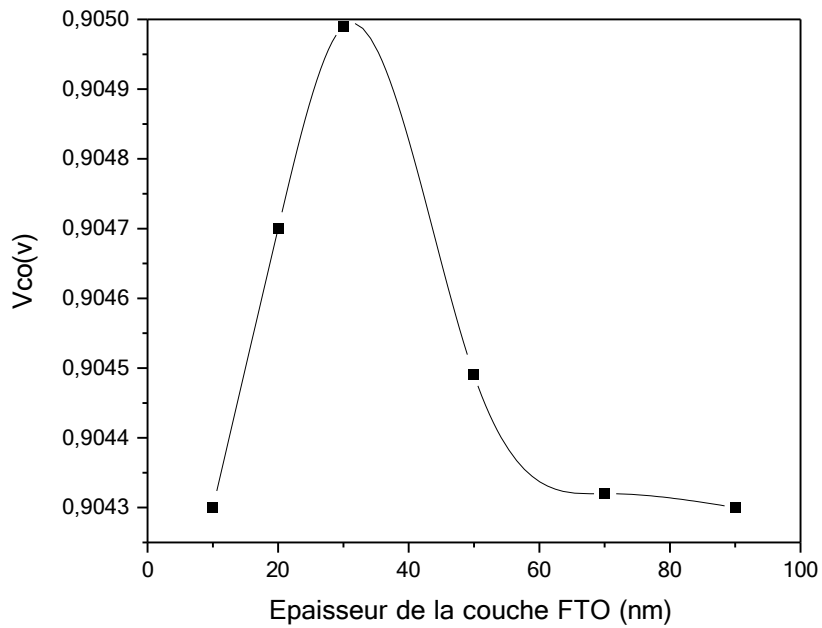


Figure 4.1 : Variation de la tension du circuit ouvert V_{oc} en fonction de l'épaisseur de la couche FTO

D'après la figure 4.1 nous remarquons que :

Dans l'intervalle [10, 30] nm la valeur de V_{oc} augmente avec l'augmentation de la l'épaisseur de la couche, et la valeur maximale de $V_{oc} = 0.9050V$ pour une épaisseur de « $e=30nm$ ».

Dans l'intervalle [30, 90] nm il y a une diminution de V_{oc} avec l'augmentation de l'épaisseur.

Chapitre4 : Etude des propriétés d'une cellule pérovskite par le logiciel GPVDM

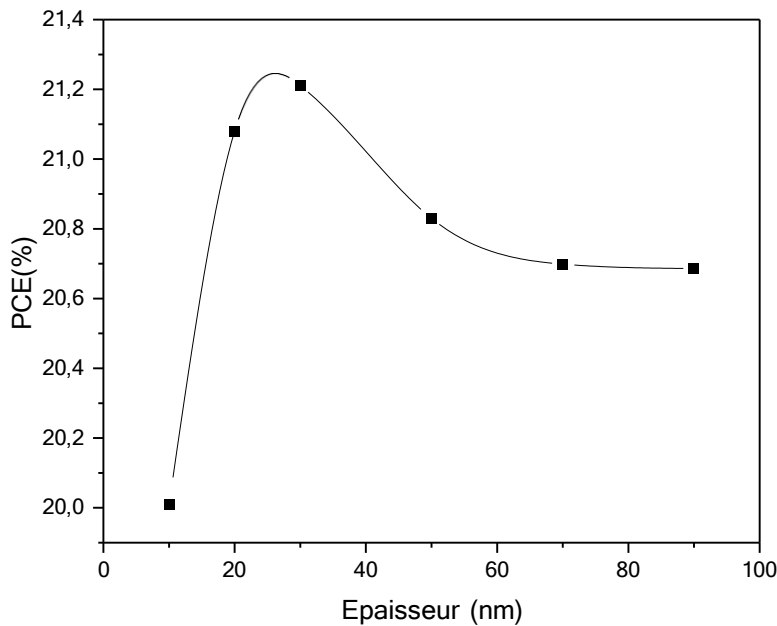


Figure 4.2 : Variation de la puissance de conversion d'énergie PCE en fonction de l'épaisseur de la couche FTO

D'après la figure 4.2 qui présente la variation de la puissance de conversion d'énergie en fonction de l'épaisseur de la couche FTO nous remarquons que :

Dans l'intervalle [10,25] nm la valeur de la puissance de conversion d'énergie augmente avec l'augmentation de la l'épaisseur de la couche, et on distingue une valeur maximale de PCE=21.2% à pour une épaisseur « e=25nm ».

Et dans l'intervalle [25,90] nm la puissance de conversion d'énergie diminue avec l'augmentation de l'épaisseur.

Nous pouvons conclure que l'épaisseur optimale est 25 nm pour la couche FTO.

Lorsque l'épaisseur de la couche FTO augmente initialement cela peut entraîner une meilleure collecte des porteurs de charge libres générées dans la pérovskite et aussi une conductivité électrique optimale, ce qui permet une extraction plus efficace des électrons générés dans la pérovskite vers l'électrode de collecte de courant, ce qui augmente le courant de court-circuit I_{cc} et le potentiel en circuit ouvert V_{co} et par conséquent la performance de conversion d'énergie PCE. Néanmoins, Une fois que l'épaisseur de la couche FTO dépasse un certain seuil, Le phénomène de réflexion de la lumière incidente se produit, ce qui réduit l'absorption dans la pérovskite. De plus une diffusion excessive des porteurs de charge à travers une couche FTO très épaisse peut entraîner une augmentation de la résistance interne de la cellule, ce qui diminue le V_{co} et PCE.

Chapitre4 : Etude des propriétés d'une cellule pérovskite par le logiciel GPVDM

4.4.1.2 La couche ETL :

C'est la couche de transport d'électrons elle est composée d'oxydes métalliques pour les cellules pérovskites tel que TiO_2 , Les résultats de changement d'épaisseur sont donnés dans les figures (4-1) pour V_{co} et (4- 3) pour PCE :

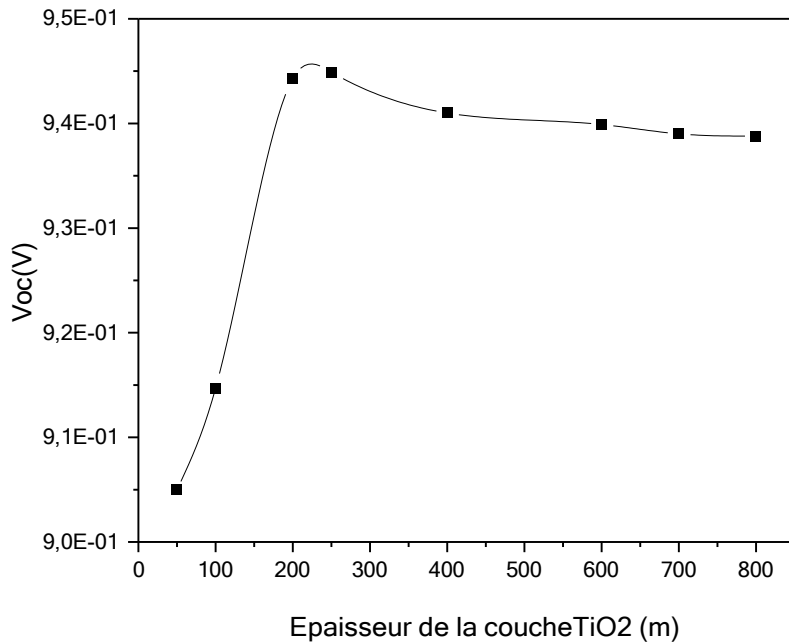


Figure 4.3 : Variation de V_{oc} en fonction de l'épaisseur de la couche de transport d'électrons ETL (TiO_2)

D'après la figure 4.3 qui présente la variation de la tension du circuit ouvert V_{co} en fonction de l'épaisseur de la couche de transport d'électrons ETL on remarque que :

Dans l'intervalle [70 ,250] nm V_{co} augmente avec l'augmentation de l'épaisseur jusqu'à atteindre une valeur maximale de $V_{oc} = 9.45 \times 10^{-1}V$ à une épaisseur de valeur de 250nm.

Et dans l'intervalle [250, 800] nm il y a une diminution V_{co} malgré l'augmentation de l'épaisseur.

Chapitre4 : Etude des propriétés d'une cellule pérovskite par le logiciel GPVDM

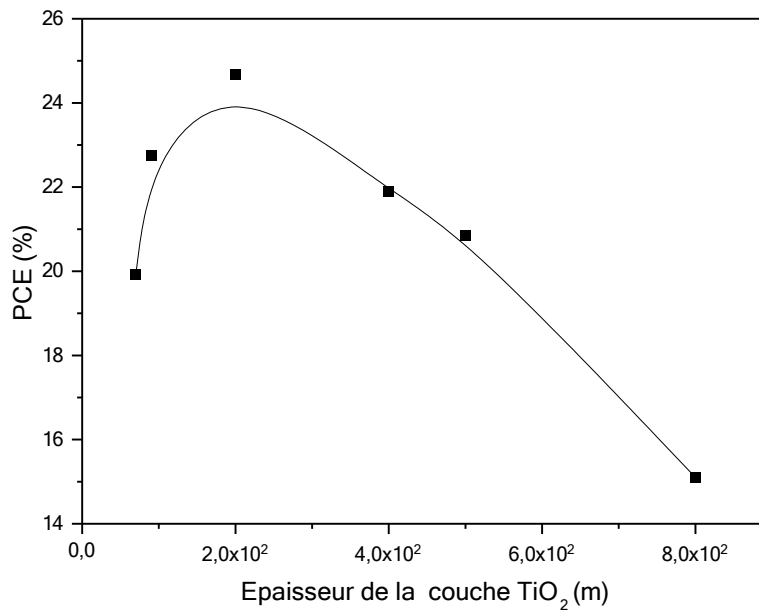


Figure 4.4 : Variation de la puissance de conversion de l'énergie en fonction de l'épaisseur de la couche de transport d'électrons *ETL*

D'après la figure 4.4 qui présente la variation de la puissance de conversion de l'énergie en fonction de l'épaisseur de la couche de transport d'électrons *ETL* nous avons :

Dans l'intervalle [70 ;200] nm la valeur du PCE augmente avec l'augmentation de la l'épaisseur de la couche, et on distingue une valeur maximale de la puissance de conversion d'énergie PCE=23% à e=200nm

Et dans les deux intervalles [200 ;800] nm PCE diminue avec l'augmentation de l'épaisseur.

En conclusion, l'épaisseur optimale pour la couche *ETL* est de 200 nm.

Lorsque l'épaisseur de la couche *ETL* est faible, les électrons peuvent se déplacer facilement à travers la couche et peuvent être collectés par l'électrode. Cela réduit les pertes d'électrons et favorise une meilleure performance de la cellule solaire. Une fois l'épaisseur devient très importante cela crée une résistance accrue au mouvement des électrons à travers la couche, cela peut entraîner la recombinaison des porteurs de charge et des pertes de transport ce qui conduit la diminution de V_{oc} et PCE.

4.4.1.3 La couche Pérovskite :

C'est la couche active de notre cellule étudiée.

Chapitre4 : Etude des propriétés d'une cellule pérovskite par le logiciel GPVDM

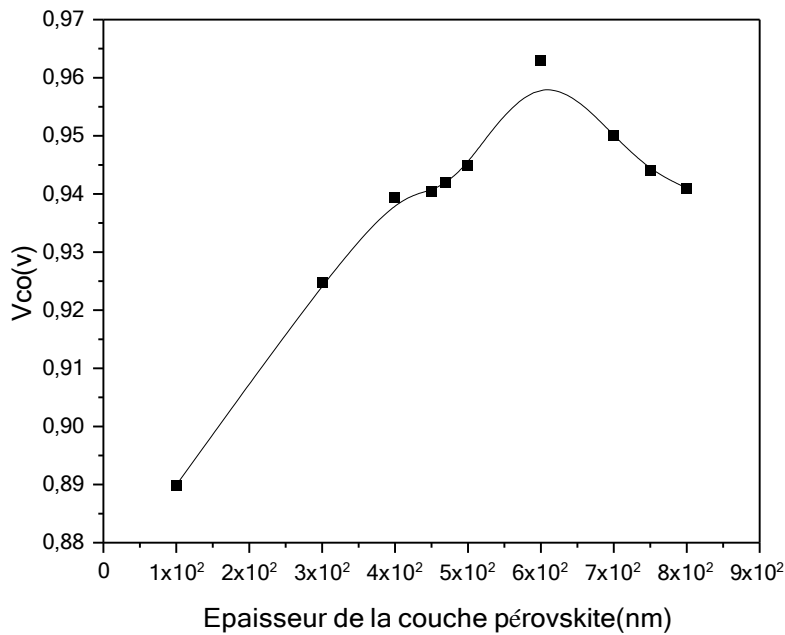


Figure 4.5 : Variation de V_{oc} de la couche pérovskite en fonction de l'épaisseur

D'après la figure 4.5 qui présente la variation de V_{co} en fonction de l'épaisseur de la couche pérovskite nous constatons :

Dans les intervalles : [100 ;600] nm V_{oc} augmente avec l'augmentation d'épaisseur jusqu'à atteindre une valeur maximale de $V_{co}=0.96V$ à 600nm

Dans l'intervalle : [600 ;800] nm V_{co} diminue avec l'augmentation d'épaisseur.

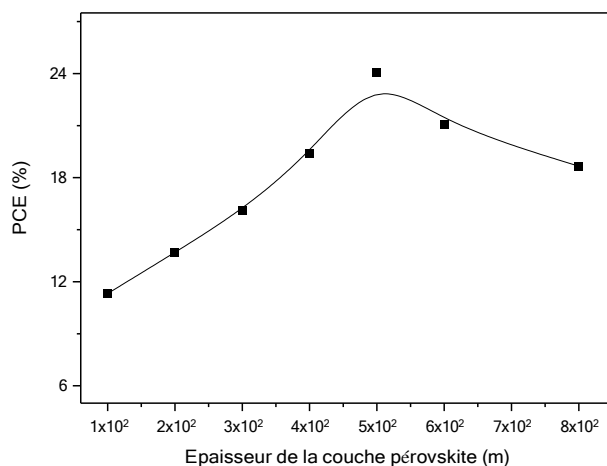


Figure 4.6 : Variation de la puissance de conversion d'énergie en fonction de l'épaisseur de la couche pérovskite

Chapitre4 : Etude des propriétés d'une cellule pérovskite par le logiciel GPVDM

D'après la figure 4.6 qui présente la variation de la puissance de conversion d'énergie en fonction de l'épaisseur de la couche pérovskite on remarque que :

PCE augmente avec l'augmentation d'épaisseur dans l'intervalle [100, 500] nm et diminue dans l'intervalle [500, 800] nm.

La valeur maximale de PCE=23.9% à une épaisseur $e=500$ nm

En conclusion la valeur d'épaisseur 500nm est la valeur optimale pour la couche pérovskite.

Lorsque l'épaisseur de la couche active est faible la lumière ne peut pas pénétrer dans la couche active, atteignant ainsi plus facilement la jonction p-n ce qui augmente le courant de photo courant, contribuant ainsi à l'augmentation de V_{co} , aussi la distance que les charges générées doivent parcourir pour atteindre les électrodes est plus courte, ce qui réduit les pertes de recombinaison et améliore la collecte des charges augmentant ainsi la puissance de conversion d'énergie PCE. Maintenant lorsque l'épaisseur est plus importante, une fraction plus grande de la lumière incidente est absorbée dans cette couche, mais une partie de cette lumière ne contribue pas directement à la génération de photo-courant car elle est absorbée trop loin de la jonction p-n ce qui diminue la tension de circuit ouvert V_{co} . Aussi l'épaisseur excessive de la couche active peut entraîner une augmentation des pertes de recombinaison, car les charges générées ont une plus grande probabilité de se recombiner avant d'atteindre les électrodes, ce qui diminue la puissance de conversion d'énergie PCE.

4.4.1.4 La couche HTL :

C'est la couche de transport de trous, les cellules pérovskites comprennent les polymères conducteurs tel que le PEDOT :PPS (Poly (3,4-éthylène dioxythiophène) : poly(styrène sulfonate).

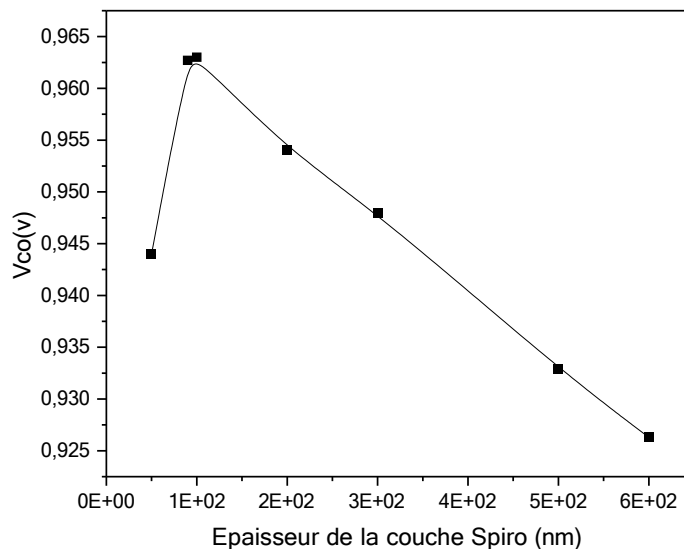


Figure 4.7 : Variation de V_{oc} en fonction de l'épaisseur de la couche de transport de trous HTL

Chapitre4 : Etude des propriétés d'une cellule pérovskite par le logiciel GPVDM

D'après la figure 4.7 qui présente la variation du potentiel de circuit ouvert V_{oc} en fonction de l'épaisseur de la couche de transport de trous HTL on remarque que :

Dans l'intervalle [50,100] nm , V_{oc} augmente avec l'augmentation de l'épaisseur.

Et dans l'intervalle [100, 600] nm , V_{oc} diminue avec l'augmentation de l'épaisseur.

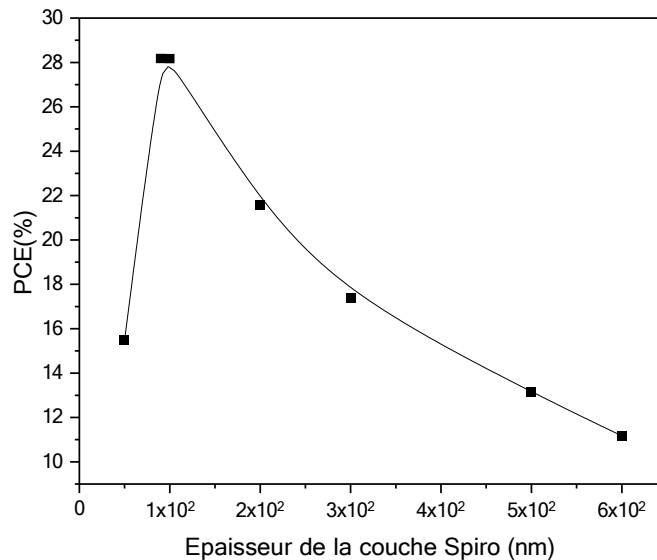


Figure 4.8 : Variation la puissance de conversion d'énergie en fonction de l'épaisseur de la couche de transport des trous HTL

D'après la figure 4.8 qui présente la variation de la puissance de conversion d'énergie PCE en fonction de l'épaisseur de la couche HTL nous constatons que :

Dans l'intervalle [50 ,100] nm il y a une augmentation du PCE avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche HTL , et dans l'intervalle [100, 600] nm il y a une diminution du PCE.

La valeur maximale de $PCE=27\%$ pour une épaisseur $e=100\text{nm}$

En conclusion, l'épaisseur optimale de cette couche qui correspond à la valeur maximale de PCE est 100nm.

Lorsque l'épaisseur de la couche HTL augmente, elle offre plus de canaux pour le transport des trous photo générés depuis la couche pérovskite vers l'électrode. Cela réduit les recombinaisons non radiatives et augmente la tension du circuit ouvert V_{co} ainsi que PCE.

Si l'épaisseur dépasse 100nm, la résistance au transport des trous augmente ce qui entrave le flux de charge et diminue le V_{co} et la PCE.

4.4.1.5 La couche Au :

C'est la couche arrière de la cellule

Chapitre4 : Etude des propriétés d'une cellule pérovskite par le logiciel GPVDM

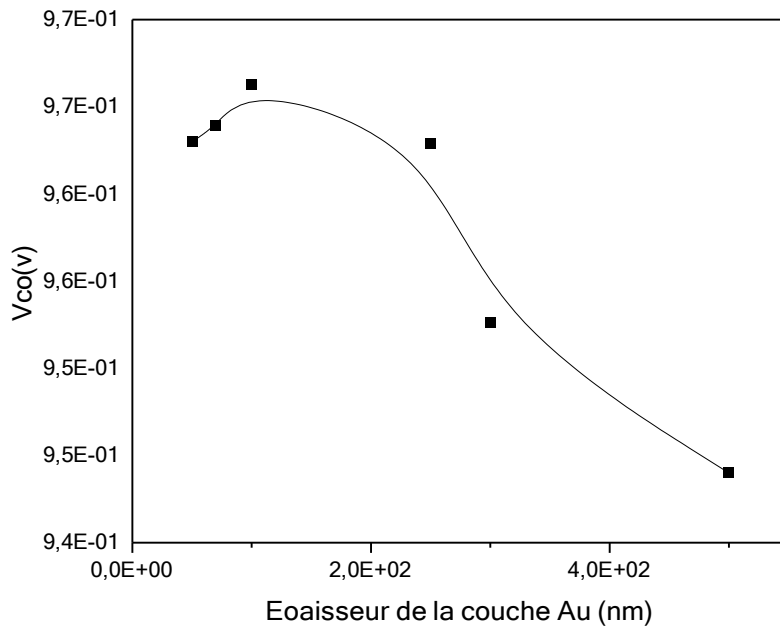


Figure 4.9 : Variation de la tension de circuit ouvert V_{oc} en fonction de l'épaisseur de la couche arrière.

D'après la figure 4.9 qui présente la variation de la tension de circuit ouvert V_{oc} en fonction de l'épaisseur de la couche arrière, nous remarquons qu'il y a une augmentation de V_{oc} avec l'augmentation de l'épaisseur dans l'intervalle [50, 100] nm et la valeur maximale de $V_{oc} = 0.96V$

Dans l'intervalle [100, 500] nm V_{oc} diminue avec l'augmentation de l'épaisseur.

Chapitre4 : Etude des propriétés d'une cellule pérovskite par le logiciel GPVDM

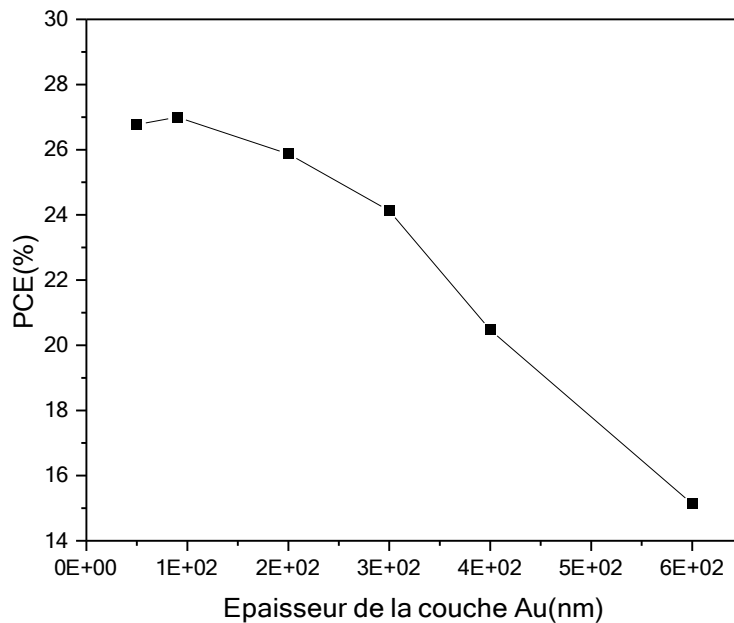


Figure 4.10 : Variation de la puissance de conversion de l'énergie PCE en fonction de l'épaisseur de la couche arrière.

D'après la figure 4.10 qui présente la variation de la puissance de conversion de l'énergie PCE en fonction de l'épaisseur de la couche arrière nous avons :

Le PCE diminue avec l'augmentation d'épaisseur dans l'intervalle [90, 600] nm avec l'augmentation de l'épaisseur, et la valeur maximale de PCE=27% pour une épaisseur $e=90$ nm

La valeur optimale d'épaisseur est 90nm pour la couche arrière.

Lorsque la couche arrière est plus épaisse, il se produit une augmentation de la résistance au transport des électrons ce qui limite le flux de courant et réduit la tension de circuit ouvert V_{co} et le PCE.

4.4.2 Les caractéristiques de la cellule pérovskite hybride optimisée

Après la simulation effectuée, nous utilisons dans notre cellule pérovskite hybride les matériaux avec les meilleures épaisseurs trouvées dans la modélisation précédente. Le GPVDM nous donne ensuite les caractéristiques électriques de la cellule pérovskite hybride optimisée tel que IV (courant en fonction de la tension) et JV (densité de courant en fonction du potentiel).

Chapitre4 : Etude des propriétés d'une cellule pérovskite par le logiciel GPVDM

4.4.2.1 Caractéristique jv de la cellule pérovskite hybride :

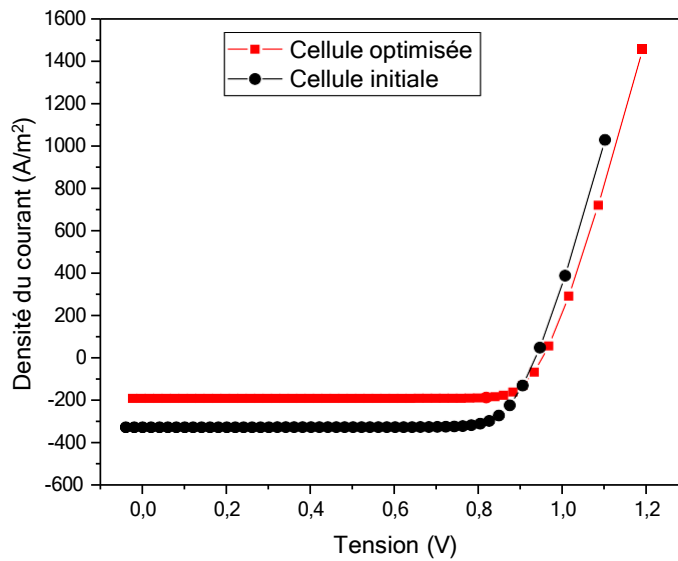


Figure 4.11 : Variation de la densité du courant électrique en fonction de la tension de la cellule pérovskite hybride initiale et optimisée

D'après la figure 4.11 qui présente la variation de courant électrique en fonction de la tension de la cellule pérovskite hybride initiale et optimisée, nous constatons que la densité de courant reste constante avec l'augmentation de la tension dans l'intervalle $[0,0 ; 0,8]$ V, Après la valeur $0,8 V$ la densité de courant augmente avec l'augmentation de la tension et on distingue une valeur maximale de densité de courante égale $1600 A \cdot m^{-2}$ à $V=1,2V$ pour la cellule optimisée et $1200 A \cdot m^{-2}$ pour la cellule initiale.

Chapitre4 : Etude des propriétés d'une cellule pérovskite par le logiciel GPVDM

4.4.3 Effet de température sur les caractéristiques de la cellule pérovskite hybride :

Dans cette partie, nous étudions l'effet de la température sur les caractéristiques d'une cellule pérovskite hybride en particulier : la puissance de conversion de l'énergie PCE, le facteur de remplissage FF, le potentiel au circuit ouvert V_{co} et la densité de courant de court-circuit J_{sc} .

Les résultats sont donnés dans le tableau 4.3

Température (K)	FF (AU)	PCE (%)	V_{co} (V)	J_{sc} (A/m ²)
230	0,867	33,47	1,11	347,324
260	0,852	30,98	1,045	347,374
300	0,8277	27,6	0,960	347,4101
320	0,816	25,95	0,915	347,4176
330	0,809	25,09	0,892	347,4192
360	0,787	22,62	0,826	347,4170
380	0,772	21	0,782	347,4150
400	0,754	19,37	0,738	347,4004

Tableau 4-3 : Variation des caractéristiques (FF, PCE, V_{co} , J_{sc}) de la cellule solaire n fonction de la température

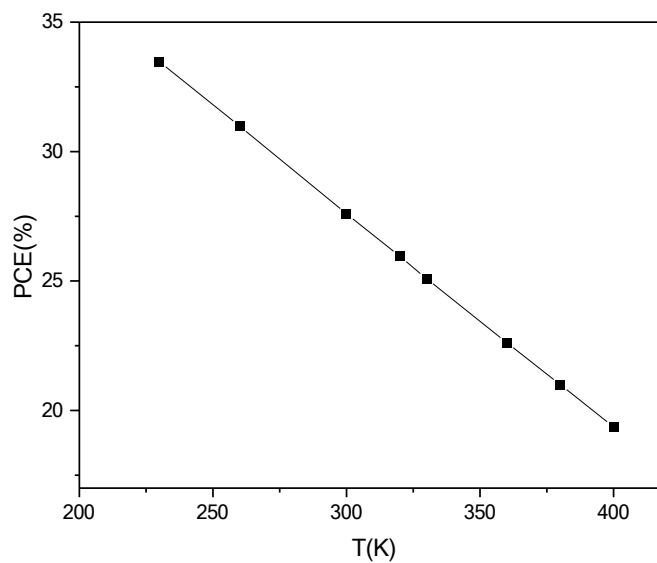


Figure 4.12: Variation de l'efficacité de conversion d'énergie PCE en fonction de la température.

Chapitre4 : Etude des propriétés d'une cellule pérovskite par le logiciel GPVDM

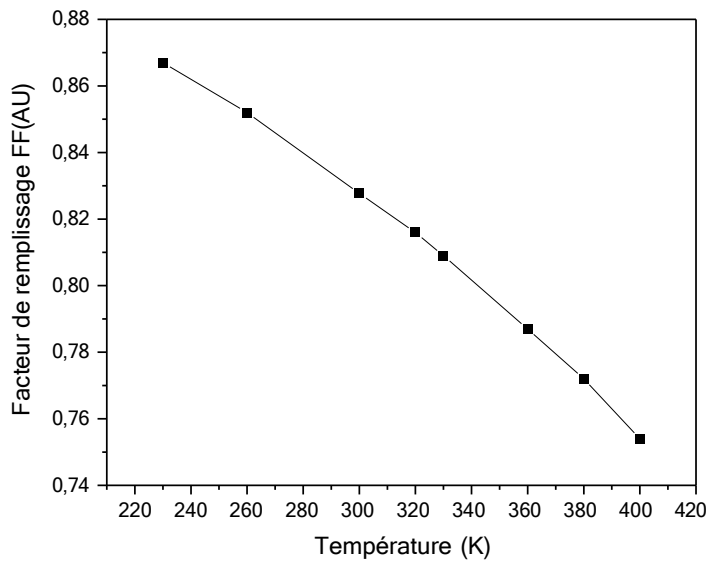


Figure 4.13 : Variation de facteur de remplissage FF en fonction de la température.

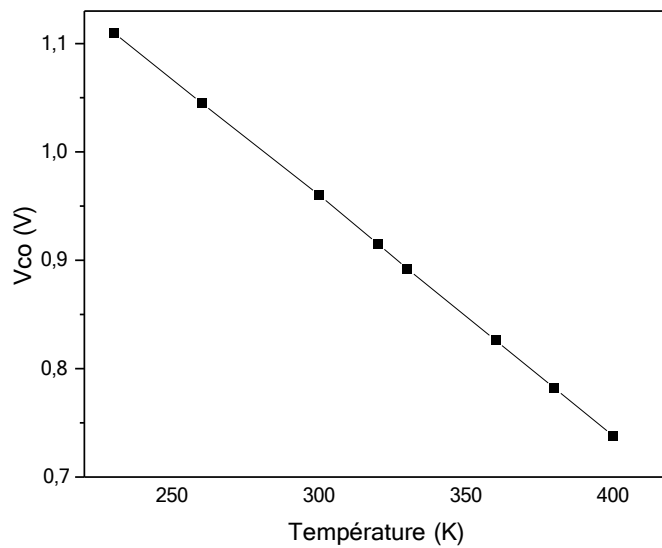


Figure 4.14 : Variation de V_{oc} en fonction de la température.

D'après les figures 4.12, 4.13 et 4.14 qui présentent la variation du PCE, FF et V_{oc} , respectivement en fonction de la température, les trois caractéristiques diminuent avec l'augmentation de la température.

Chapitre4 : Etude des propriétés d'une cellule pérovskite par le logiciel GPVDM

En augmentant la température, les taux de recombinaison des porteurs de charge augmentent ce qui explique la diminution du Voc et PCE dans une cellule solaire à pérovskite hybride.

L'augmentation des températures mène à la diminution de mobilité de porteurs de charge, à cause de l'agitation thermique. Ainsi ; il y a l'augmentation de la résistance en série et le facteur de forme à haute température.

En effet, le facteur de forme et la résistance sont liés par la formule suivante

$$FF = FF_0 \left(1 - \frac{R_s I_{sc}}{V_{Co}}\right). \quad [1] \quad (IV-1)$$

FF_0 : Facteur de remplissage idéal

R_s : Résistance en série

I_{sc} : Courant de circuit ouvert

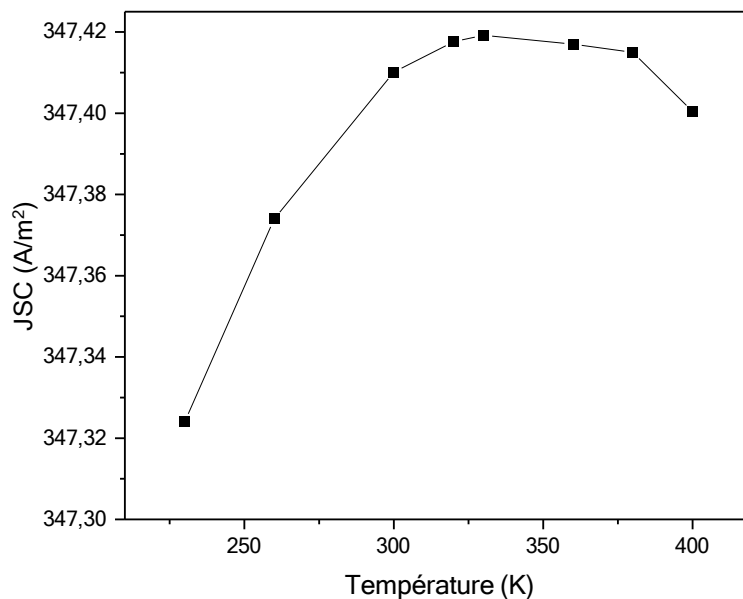


Figure 4.15 : Variation de la densité de courant de court-circuit J_{sc} en fonction de la température

D'après la figure 4.15 qui présente la variation de la densité de courant de court-circuit J_{sc} en fonction de la température, nous constatons que le J_{sc} augmente avec l'augmentation de la température jusqu'à atteindre un pic de $347,42 A /m^2$ pour une température de 320 K, la densité de courant diminue ensuite en augmentant la température à cause de la croissance de la mobilité des porteurs de charges, et la recombinaison des porteurs de charges.

Un grand nombre de porteurs de charge parviennent à atteindre les électrons avant de subir une recombinaison, ce qui entraîne une augmentation du courant de court-circuit.

Chapitre4 : Etude des propriétés d'une cellule pérovskite par le logiciel GPVDM

$$J_{sc} = \frac{FF}{V_{oc} \times P_{max}} \cdot [1] \quad (IV-2)$$

P_{max} : la puissance maximale que la cellule peut délivrer

4.4.4 Effet de la mobilité des porteurs de charges sur les caractéristiques de la cellule hybride à base de pérovskite :

Dans cette partie nous avons étudié l'effet de la mobilité des trous et des électrons dans la couche active sur les différentes caractéristiques électriques de notre cellule tel que J_{sc} , FF, PCE et V_{co} .

Nous avons varié la valeur de la mobilité de $2 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{VS}$ à $2 \text{ m}^2/\text{VS}$. Les résultats de la simulation sont reportés sur le tableau (4- 4)

Mobilité (m^2/VS)	FF (A.U)	PCE (%)	V_{oc} (V)	J_{sc} (A/m^2)
2×10^{-7}	0,265	2,5	0,9736	-94,10
2×10^{-6}	0,4751	7,306	0,9837	-155,10
2×10^{-5}	0,5994	19,06	0,9811	-324,10
0,0002	0,7419	23,93	0,9491	-340,20
0,002	0,7913	25,44	0,94	-340,24
0,02	0,8121	24,42	0,8812	-341,14
0,2	0,7927	23,44	0,8419	-342,01
2	0,716	22,35	0,815	-343,17

Tableau 4-4 : Variation des caractéristiques (FF, PCE, V_{co} , J_{sc}) de la cellule solaire en fonction de la mobilité des porteurs

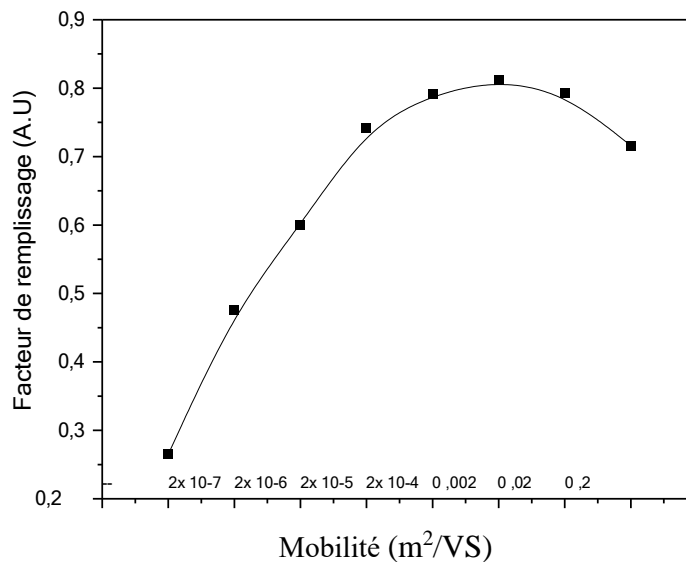


Figure4.16: Variation du facteur de forme en fonction de la mobilité des porteurs de charges

Chapitre4 : Etude des propriétés d'une cellule pérovskite par le logiciel GPVDM

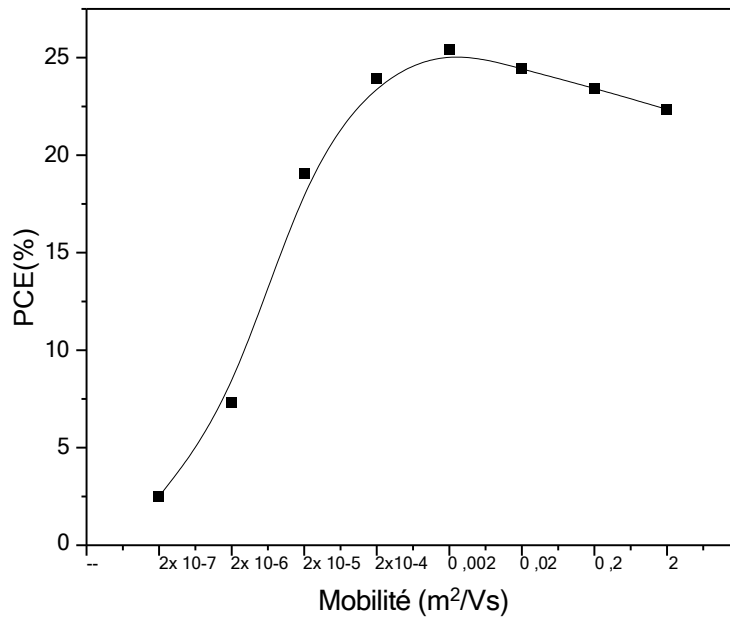


Figure 4.17 : Variation du rendement PCE en fonction de la mobilité des porteurs de charges

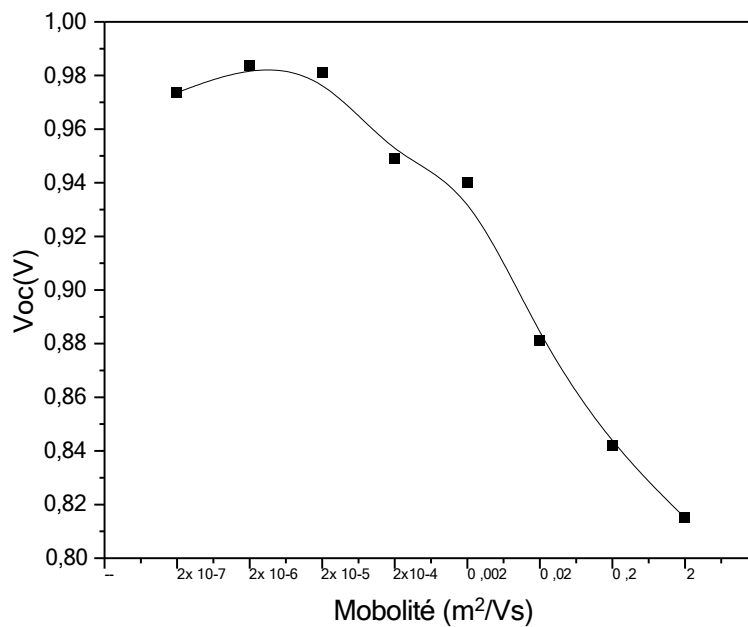


Figure 4.18 : Variation du facteur du potentiel au circuit ouvert V_{oc} e en fonction de la mobilité des porteurs de charges

Chapitre4 : Etude des propriétés d'une cellule pérovskite par le logiciel GPVDM

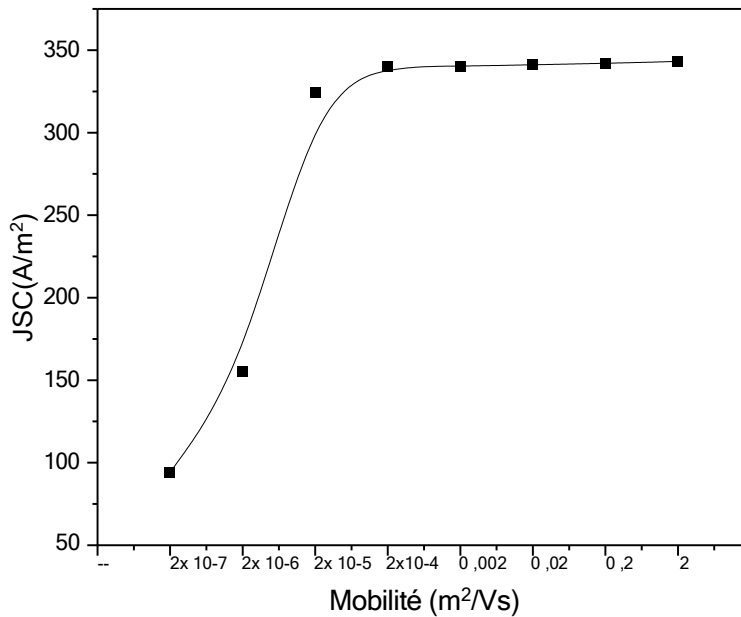


Figure 4.19 : Variation du JSC en fonction de la mobilité des porteurs de charges

PCE, FF et JSC augmentent lorsque la mobilité des porteurs augmente (figure 4.17 ,4.18 et 4.19).

Le rendement de conversion PCE varie de 25.44 % à 1.41% et présente un maximum à la mobilité $2.10^{-3}m^2/Vs$ (figure 4.18) ce qui se traduit par l'augmentation de la densité de courant.

Pour une mobilité élevée des porteurs de charge, peuvent se déplacer plus librement à travers le matériau en réponse à un champ électrique appliqué. Cela se traduit par une plus grande conductivité électrique du matériau, ce qui est essentiel pour assurer le transport efficace des charges électriques dans les dispositifs photovoltaïques. Outre Une grande mobilité des porteurs de charge peut réduire la vitesse de recombinaison en permettant aux porteurs de se déplacer sur de plus grandes distances avant de se recombiner. Cela peut contribuer à une plus grande efficacité de conversion de l'énergie lumineuse en électricité.

4.4.5 Propriétés optiques de la cellule pérovskite hybride :

Nous présentons dans cette partie, la densité de photons à travers la cellule donnée par la figure 4.20 et le rendement quantique dans la figure 4.21.

Chapitre4 : Etude des propriétés d'une cellule pérovskite par le logiciel GPVDM

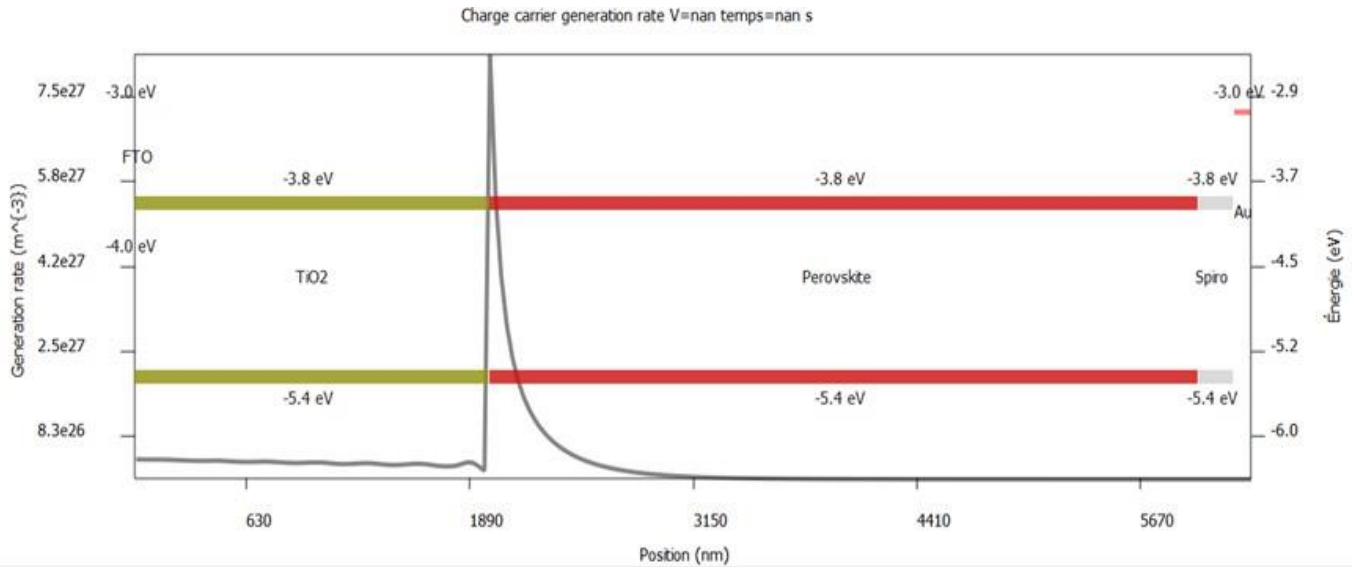


Figure 4.20 : Densité de photons à travers la cellule solaire à base de pérovskite

La figure 4.20 montre le diagramme correspondant des niveaux de bande d'énergie pour la structure d'une cellule pérovskite hybride optimisée avec les caractéristiques J-V présentées dans la figure 4.11. Pour la lumière incidente donnée (c'est-à-dire AM1.5G standard), les paires électrons-trous générées dans l'absorbeur se déplacera vers la couche de transport d'électrons (ETL) et la couche de transport de trous (HTL) dans le dispositif, puis sera extraite dans le circuit de sortie.

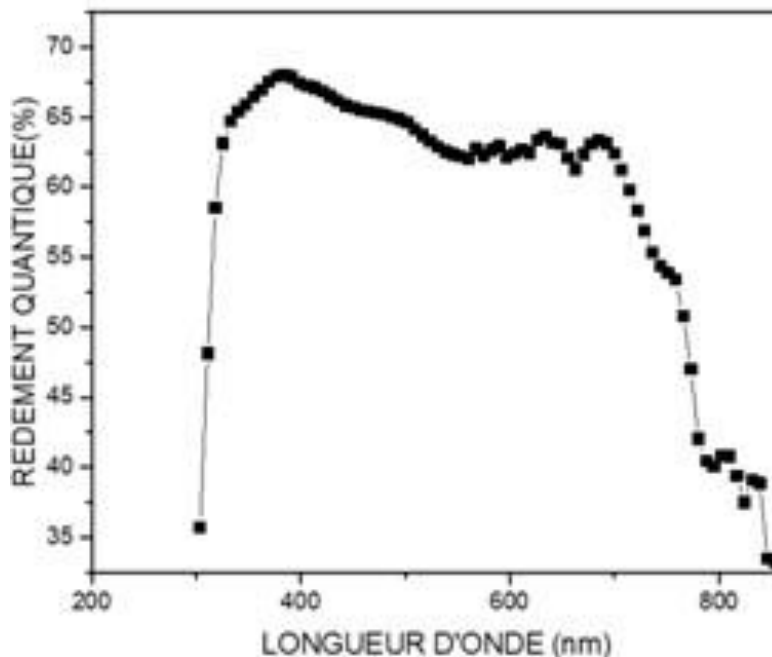


Figure 4.21 : Rendement quantique de la pérovskite hybride après l'optimisation

Chapitre4 : Etude des propriétés d'une cellule pérovskite par le logiciel GPVDM

D'après la figure 4.21 qui présente la variation de rendement quantique de la pérovskite hybride après l'optimisation en fonction de la longueur d'onde, nous remarquons que le rendement quantique augmente avec l'augmentation de la longueur d'onde dans l'intervalle [300, 400] nm, atteignant un maximum de 68%, après il diminue légèrement (68%- 62%) malgré l'augmentation de la longueur d'onde dans l'intervalle [400, 700] nm correspondant au spectre visible.

Enfin, dans l'intervalle [400, 700] nm, il y a une chute du rendement quantique.

A des longueurs d'onde courtes, les photons ont une énergie plus élevée donc ils peuvent interagir plus efficacement avec le matériau, générant davantage de paires d'électrons -trous par photon absorbé. Mais à certaine longueur d'onde, l'énergie de photons devient insuffisante pour exciter efficacement les électrons dans le matériau pérovskite, les photons de longueurs d'onde plus élevées ont une énergie plus faible et peuvent donc être moins efficaces pour générer des paires d'électrons -trous.

4.4.6 Simulation de la cellule Tandem -Si -Pérovskite :

Nous changeons l'épaisseur de chaque couche afin d'optimiser les valeurs de V_{oc} et PCE , pour trouver la valeur d'épaisseur optimale pour chaque couche de la cellule pérovskite Tandem-Si-Pérovskite.

4.4.6.1 Les matériaux utilisés dans les couches de la cellule avec leurs épaisseurs :

<i>Matériaux</i>	<i>Epaisseur(nm)</i>
<i>Oxides/ITO/ito</i>	15
<i>Polymers/pedotpss</i>	500
<i>Pérovskites/std- pérovskite</i>	400
<i>Oxides/tiox</i>	100
<i>Inorganic/si</i>	700
<i>Metal/Ag/std</i>	100
<i>Metal/Ag/std</i>	100

Tableau 4-5 : Matériaux utilisés dans les couches de la cellule tandem -Si -Pérovskite avec leurs épaisseurs.

En utilisant la cellule tandem optimisé, nous aurons une amélioration des caractéristiques de la cellule tel que le PCE qui passe de 27% à 30%

Chapitre4 : Etude des propriétés d'une cellule pérovskite par le logiciel GPVDM

4.4.6.2 Les paramètres de la cellule tandem -Si - Pérovskite étudiée :

	<i>pedotpss</i>	Pérovskite	TiOx	Si
Mobilité des électrons ($m^2v^{-1}s^{-1}$)	0.002	0.002	0.002	0.001
Mobilité des trous ($m^2v^{-1}s^{-1}$)	0.002	0.002	0.002	0.001
Permittivité relative	3	3	3	3
Densité effective d'états d'électrons libres (m^{-3})	$5e^{26}$	$5e^{26}$	$5e^{26}$	$5e^{26}$
Densité effective d'états trous libres (m^{-3})	$5e^{26}$	$5e^{26}$	$5e^{26}$	$5e^{26}$
Travail de sortie χ_i (eV)	3.7	3.7	3.7	3.7
E_g (eV)	1.6	1.6	1.6	1.6
Le taux de recombinaison (m^3S^{-1})	0	$1e^{-15}$	$1e^{-15}$	$1e^{-15}$

Tableau 4-6 : Paramètre électrique de la cellule tandem -Si -Pérovskite étudiée.

Nous choisissons les épaisseurs des couches de la cellule tandem -Si -Pérovskite et les matériaux présentés dans le tableau 4-6, Le GPVDM nous donne les résultats suivants :

4.4.6.3 Caractéristique jv de la cellule tandem -Si - Pérovskite :

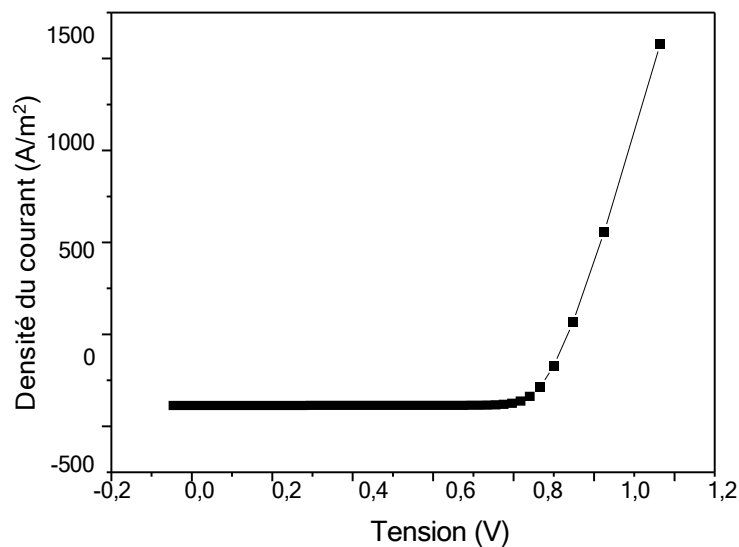


Figure 4.24 : Caractéristique jv de la cellule tandem -Si -Pérovskite

Chapitre4 : Etude des propriétés d'une cellule pérovskite par le logiciel GPVDM

D'après la figure 4.24 nous remarquons que :

La densité de courant reste constante avec l'augmentation de la tension dans l'intervalle [0, 0.9] V. et dans l'intervalle [0.9, 1.1] V la densité de courant augmente avec l'augmentation de la tension.

En utilisant la cellule tandem optimisé, nous aurons une amélioration des caractéristiques de la cellule tel que le PCE qui passe de 27% trouvé pour la cellule hybride à 30% pour la cellule Tandem ce qui explique l'intérêt que porte les recherches actuelles sur ce type de cellules et en particulier les cellules tandem pérovskite-si

4.4.7 Simulation de la cellule Organique :

Nous changeons l'épaisseur de chaque couche afin d'optimiser les valeurs de V_{oc} et PCE pour avoir la valeur d'épaisseur optimale pour chaque couche de la cellule pérovskite organique.

4.4.7.1 Les matériaux utilisés dans les couches de la cellule organique avec leurs épaisseurs :

Dans le tableau suivant, nous donnons les matériaux que nous avons choisi pour former la cellule pérovskite organique, avec leurs épaisseurs

	<i>Epaisseur(nm)</i>	<i>Matériaux</i>
<i>ito</i>	25	<i>Oxides/ITO/ito</i>
<i>PEDPT:PSS</i>	40	<i>Polymers/pedotpss</i>
<i>ternary</i>	300	<i>Pérovskites/std – pérovskite</i>
<i>PNDIT – F3N</i>	1	<i>Polymers/pcdtbt</i>
<i>Ag</i>	100	<i>Metal/Ag/std</i>

Tableau 4-7 : Matériaux utilisés dans les couches de la cellule organique avec leurs épaisseurs.

4.4.7.2 Les paramètres de la cellule organique étudiée :

Les paramètres électriques de la cellule pérovskite organique que nous avons étudiée sont donnés dans le tableau 4-8

Chapitre 4 : Etude des propriétés d'une cellule pérovskite par le logiciel GPVDM

Ternary	Mobilité des électrons (m^2/vs)	Mobilité des trous (m^2v)	Permittivité relative	Densité effective d'états d'électrons libres (m^{-3})	Densité effective d'états trous libres (m^{-3})	Travail de sortie Xi(eV)	Eg (eV)	Le taux de Recombinaison (m^3S^{-1})
	$1.49 e^{-07}$	$1.42 e^{-07}$	3	$1e^{26}$	$1e^{26}$	4.2	1.29	$1.15e^{-17}$

Tableau 4-8 : Paramètre électrique de la cellule organique étudiée.

Après la simulation de la cellule organique avec les matériaux et les épaisseurs présentés dans le tableau 4-8, le modèle de simulation nous donne les résultats suivants :

4.4.7.3 Caractéristique jv de la cellule organique :

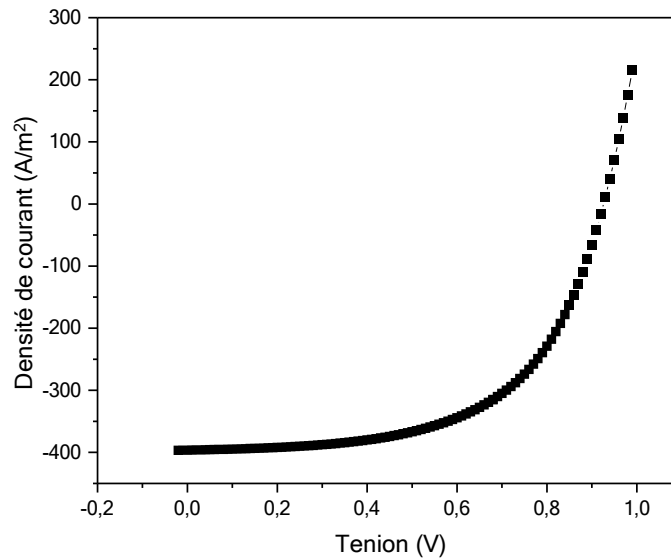


Figure 4.25 : Caractéristique jv de la cellule organique

D'après la figure 4.25 qui présente la caractéristique jv de la cellule organique on remarque que :

La densité de courant reste constante et faible avec l'augmentation de la tension dans l'intervalle [0 ;0.8] V. et dans l'intervalle [0.8;1] V la densité de courant augmente avec l'augmentation de la tension.

Chapitre 4 : Etude des propriétés d'une cellule pérovskite par le logiciel GPVDM

4.5 Comparaison entre les résultats obtenus pour les trois types de pérovskite

Le tableau 4.9 regroupe les paramètres des trois types de pérovskite en récurrence la cellule hybride, la cellule tandem et la cellule organique

	PCE (%)	Voc (V)	FF (%)	Jsc (A/m ²)
Cellule hybride	27	0.960	82.7	347.41
Cellule tandem	30	0.949	81.2	387
Cellule organique	22.40	0.937	58.3	413.74

Tableau 4-9 : Les caractéristiques des trois types de cellules tandem ; organique et hybride à base de pérovskite.

Dans ce tableau, nous constatons que le rendement est maximal pour la cellule tandem

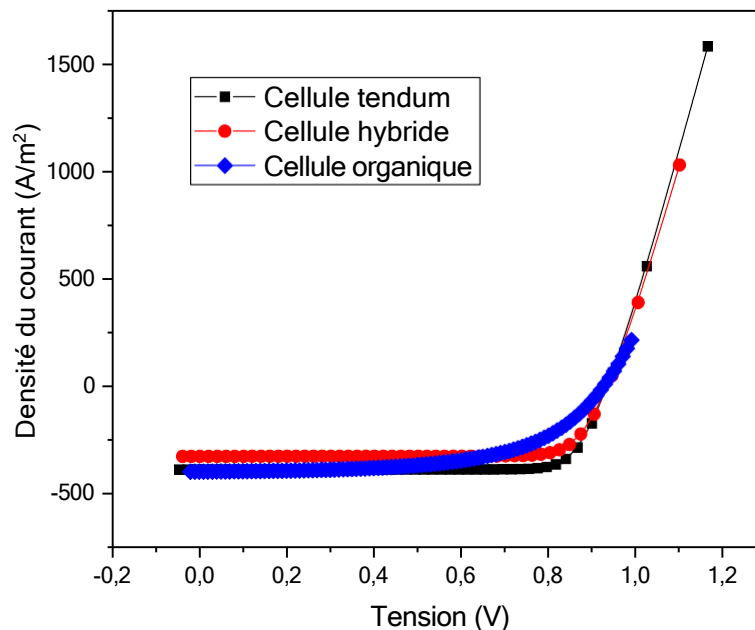
Dans le tableau suivant 4-10 nous comparons nos résultats obtenus pour la cellule hybride avec d'autres travaux

Model	V _{oc} (volt)	FF %	PCE
Wang et al [1]	0.88	74.7	15
Pandey et al [2]	1.31	82.1	25.9
Rieseret al [3]	1.07	76.3	17.1
Sadiq et al [4]	0.95	83.5	31.4
Notre travail	0.960	82.7	27

Tableau 4-10 : Comparaison de nos résultats avec d'autres travaux.

Nos résultats sont proches des résultats trouvés dans les travaux récents

Les caractéristiques JV pour les trois types de cellules solaires à base de pérovskite sont rassemblées dans la figure 4.26.



Chapitre4 : Etude des propriétés d'une cellule pérovskite par le logiciel GPVDM

Figure 4.26 : Caractéristique JV des trois types de cellules : Tandem, hybride et organique

Nous constatons que le courant et la densité maximale sont dans la cellule tandem alors que le courant commence à augmenter dans la cellule organique à partir d'une tension de 0,7 V alors que pour les autres ce ne se fait qu'au de 0.8V

4.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats de la simulation d'une cellule photovoltaïque à base de Pérovskite, et nous avons tiré les points suivants :

- L'étude de l'effet de l'épaisseur des couches dans une cellule pérovskite hybride nous a permis d'optimiser la cellule et d'améliorer ses caractéristiques en récurrence le PCE
- La variation de la température au voisinage de la température ambiante à un grand effet sur les caractéristiques de la cellule hybride notamment PCE, V_{co} , FF et J_{sc}
- Le passage à la cellule Tandem Si-Pérovskite fait croitre le rendement PCE
- La cellule pérovskite organique présente des résultats satisfaisants

Chapitre4 : Etude des propriétés d'une cellule pérovskite par le logiciel GPVDM

Références :

- [1] Muhammad Sadiq et al Numerical investigation of a new approach based on perovskite CH₃ NH₃ PbI₃ absorber layer for high-efficiency solar cells Mater. Res. Express 8095507(2021)
- [2] Wang D, Elumalai N K, Mahmud M A, Wright M, Upama M B, Chan K H, Xu C, Haque F, Coniber G and Uddin A Org. Electron(2018)
- [3] Pandey R and Chaujar R Superlattices Microstruct. 100 656 (2016)
- [4] Reiser B, González-García L, Kanelidis I, Maurer J H M and Kraus T Chem. Sci. 7 419 (2016)

Conclusion générale

Conclusion Générale

Conclusion générale :

Dans ce travail, nous avons étudié et simulé à l'aide du logiciel de simulation numérique GPVDM, une cellule solaire à base de matériau pérovskite hybride, une cellule organique et une cellule tandem,

Pour la première cellule, nous avons utilisé le *FTO* comme couche conductrice, *TiO₂* comme couche de transport d'électron (*ETL*), pour la couche absorbante nous avons utilisé un matériau pérovskite, et le *Spiro – MeOTAD* comme couche de transport de trous (*HTL*), et une couche arrière de *Au*.

Nous avons commencé par optimiser les épaisseurs de ces couches afin d'obtenir une cellule à haut rendement. Nous avons étudié aussi l'effet de la température et de la mobilité des porteurs de charge sur les caractéristiques de la cellule solaire hybride.

En effet, ce type de cellules à un grand champ d'application, on peut citer

Stockage d'énergie : les cellules hybrides peuvent être utilisées dans les batteries hybrides pour stocker l'énergie de manière plus efficace et durable.

Électronique portable, Véhicules électriques. Énergie renouvelable, Applications spatiales

Électronique médicale : les cellules hybrides peuvent être utilisées dans les dispositifs médicaux tels que les stimulateurs cardiaques et les prothèses

Éclairage LED : les cellules hybrides peuvent être utilisées dans les lampes LED pour une meilleure efficacité énergétique et une plus longue durée de vie.

L'étude faite sur la cellule tandem pérovskite- Si et la cellule organique à base de pérovskite, nous a montré l'efficacité et la performance de ces types de cellules.

En effet, la cellule organique a plusieurs applications tel que :

L'Électronique flexible : où les cellules organiques peuvent être utilisées dans la fabrication d'écrans flexibles, de capteurs flexibles et d'autres dispositifs électroniques flexibles.

Biocapteurs : les cellules organiques peuvent être utilisées dans la fabrication de biocapteurs pour détecter diverses substances biologiques telles que les protéines, les hormones et les virus.

Médecine régénérative : les cellules organiques peuvent être utilisées pour créer des tissus et des organes artificiels pour la médecine régénérative.

Les cellules solaires tandem sont des dispositifs photovoltaïques qui sont basés sur la composition de plusieurs matériaux semi-conducteurs pour absorber une plus large gamme de longueurs d'onde de la lumière solaire, ce qui permet d'atteindre des

Conclusion Générale

rendements plus élevés, dans notre simulation, le rendement a atteint 30%, alors que ça ne dépassait pas 26% pour la cellule hybride et 24% pour la cellule organique

Parmi ses domaines d'application

L'énergie solaire : les cellules solaires tandem sont utilisées dans les panneaux solaires pour la production d'électricité à partir de la lumière du soleil. Leur rendement plus élevé les rend particulièrement adaptées pour les applications résidentielles, commerciales et industrielles.

Électronique portable, Véhicules électriques, éclairage extérieur, applications spatiales, Stockage d'énergie.

Les cellules solaires tandem peuvent être combinées avec des systèmes de stockage d'énergie, tels que des batteries ou des supers condensateurs, pour créer des solutions d'énergie renouvelable complètes et autonomes.

En conclusion les matériaux pérovskites présentent un bon choix pour l'application photo voltaïques à cause de leurs propriétés électriques et optiques intéressantes notamment son fort coefficient d'absorption et son gap direct. Il reste à résoudre le problème de dégradation de ces composants qui a de multiples facteurs tel que l'influence des conditions extérieurs comme l'humidité...

Perspectives

Comme perspectives, nous souhaitons faire une étude pour réduire ou éliminer la toxicité des cellules à base de pérovskite à base de Pb. Il est crucial de développer des architectures qui résistent aux dégradations induites par la température, oxygène,

Humidité, et l'irradiation lumineuse. L'utilisation des composées mixtes tels que $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{Sn}_x\text{Pb}_{1-x}\text{I}_3$, $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3(1-x)\text{Br}_x$ et $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3(1-x)\text{Cl}_x$ peut conduire à une amélioration de la stabilité. Le bon choix des couches HTL et ETL conduit à augmenter la stabilité des cellules. L'Utilisation des électrodes alternatives plus stables, comme des alliages métalliques et des composites à base de graphène, peut également augmenter la durée de vie des cellules solaires pérovskites. D'autre part il est nécessaire d'introduire des techniques.

Résumé :

De nos jours, Ya divers problèmes provoquées par le réchauffement climatique, Cela a suscité un grand intérêt parmi les scientifiques pour le domaine des énergies renouvelables, et surtout le domaine photovoltaïque.

Dans le but d'obtenir un rendement plus efficace, des études qui s'appuient sur le remplacement de cellules à base de silicium par d'autres cellules ont été faites. La cellule photovoltaïque à pérovskite est une alternative prometteuse car elle contient un élément chimique ayant une structure de pérovskite qui est plus souvent manifesté par un hybride organique-inorganique de plomb ou un halogénure d'étain (dans sa couche active).

Dans ce mémoire nous avons étudié les cellules solaires à pérovskite, en utilisant le logiciel de simulation spécialisé dans le domaine du photovoltaïque qui set le GPVDM. Les modélisations ont révélé l'impact de différents paramètres sur les performances des cellules pérovskite hybride , tels que la température et l'épaisseur des différentes couches ainsi que la mobilité des porteurs de charges de la couche active . En analysant les propriétés électriques et structurales, nous avons constaté que la variation de la température et de l'épaisseur des couches active, HTL, et ETL influence les performances de la cellule. Les résultats obtenus nous ont donné la possibilité d'avoir une cellule optimisée avec un rendement amélioré. Les propriétés optiques des cellules solaires ont également été explorées à l'aide du logiciel GPVDM. Nous avons utilisé le même logiciel pour étudier les caractéristiques des cellules organiques ainsi que les cellules tandems Si/pérovskite qui ont montrés une amélioration significative du rendement. Les études se poursuivent pour réduire ou éliminer la toxicité des cellules à base de pérovskite à base de Pb

Mot clés : Cellules à pérovskites, GPVDM, Simulation, Propriétés optiques et électriques, Rendement électriques, cellules photovoltaïques

Abstract :

Nowadays, there are various problems caused by climate change, which has sparked great interest among scientists in the field of renewable energies, particularly in the photovoltaic sector.

In order to achieve higher efficiency, studies focusing on replacing silicon-based cells with other types of cells have been conducted. Perovskite solar cells are a promising alternative because they contain a chemical element with a perovskite structure, often manifested by an organic-inorganic hybrid of lead or tin halide in its active layer.

In this thesis, we studied perovskite solar cells using specialized simulation software in the field of photovoltaics called GPVDM. The modeling revealed the impact of different parameters on the performance of hybrid perovskite cells, such as temperature, thickness of different layers, and charge carrier mobility in the active layer. By analyzing electrical and structural properties, we found that variations in temperature and thickness of the active, HTL, and ETL layers influence the cell performance. The results allowed us to optimize the cell for improved efficiency. The optical properties of solar cells were also explored using the GPVDM software. We used the same software to study the characteristics of organic cells and Si/perovskite tandem cells, which showed a significant improvement in efficiency. Research is ongoing to reduce or eliminate the toxicity of lead-based perovskite cells.

Keywords : Perovskite cells, GPVDM, Modeling, Simulation, Optical and electrical properties, electrical efficiency ,photovoltaic cells.

ملخص:

في الوقت الحالي، هناك مشاكل متنوعة ناجمة عن تغير المناخ، مما أثار اهتماما كبيرا بين العلماء في مجال الطاقة المتجددة، ولا سيما في مجال الطاقة الشمسية

من أجل تحقيق كفاءة أعلى، تم إجراء دراسات تعتمد على استبدال الخلايا القائمة على السيليكون بأنواع أخرى من الخلايا. تعتبر خلية الطاقة الشمسية بيروفسكيت بديلا واعدة لأنها تحتوي على عنصر كيميائي يحمل هيكل بيروفسكيت، غالبا ما يتم تجسيده عبر هجين عضوي-لاعضوي من الرصاص أو هاليد القصدير في طبقتها النشطة

أظهرت التصنيعات تأثير GPVDM في هذه الورقة، قمنا بدراسة خلايا الطاقة الشمسية بيروفسكيت باستخدام برنامج محاكاة متخصص في مجال الطاقة الشمسية والذي يحمل اسم مختلف العوامل على أداء خلايا بيروفسكيت الهجينة، مثل درجة الحرارة وسمك الطبقات المختلفة وحركية حملة الشحن في الطبقة النشطة. من خلال تحليل الخصائص الكهربائية يؤثر على أداء الخلية. حصلت النتائج التي تم الحصول عليها على إمكانية تحسين الخلية لتحقيق ETL وHTL والهيكلي، لاحظنا أن التغير في درجة الحرارة وسمك الطبقات النشطة و لقد استخدمنا نفس البرنامج لدراسة خصائص الخلايا العضوية وكذلك خلايا GPVDM كفاءة محسنة. تم استكشاف الخصائص البصرية للخلايا الشمسية أيضا باستخدام برنامج التوأمية التي أظهرت تحسنا كبيرا في الكفاءة. ما تزال الدراسات جارية لتقليل أو القضاء على سمية الخلايا بيروفسكيت القائمة على Si/perovskite

الكلمات المفتاحية: خلايا البيروفسكيت، محاكاة، الخصائص الكهربائية والضوئية والكفاءة الكهربائية، الخلايا الشمسية.