

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Abderrahmane MIRA de Bejaia

Faculté de technologie



Département d'Automatique, Télécommunication et d'Electronique

Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Electronique

Spécialité : Instrumentation

Thème

Modélisation et Optimisation de Cellules Solaires Tandem à l'aide de Techniques de
Simulation Avancées en Python

Préparé par

KERDOUCHE Lynda et KASMI Soumya

Soutenu le : jeudi 19 juin 2025

Devant le jury composé de :

Président : Mme. OUDIAI Fatiha

Encadrant : Mr. KESSI Ferhat

Examinateur : Mr. LAHRECHE Aberrezak

Année universitaire : 2024/2025

Remerciement

Nous tenons tout d'abord à exprimer notre profonde gratitude à Monsieur Ferhat Kessi, qui a encadré cette recherche. Nous le remercions sincèrement pour sa patience, sa compréhension, sa disponibilité, ses conseils éclairés, ses encouragements constants, sa bienveillance et son soutien indéfectible, sans lesquels ce travail n'aurait pas pu aboutir.

Nous adressons également nos remerciements aux membres du jury pour avoir accepté de lire, d'examiner et d'évaluer notre travail avec attention.

Enfin, nous remercions chaleureusement toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce modeste travail.

Dédicace

Je dédie ce travail, à tous ceux qui sont chers, ceux à qui je dois mon succès :

À mes chers parents Mustapha et Zouina

À celui qui voyait dans mon plus simple succès la plus grande réalisation, à l'homme qui a fait de moi ce que je suis aujourd'hui, celui dans les yeux duquel je lis la fierté, mon modèle de respect et d'amour d'un père, de la compréhension et de la générosité. Grace à toi j'ai appris à être la fille qui ne cesse pas de faire tout pour te rendre heureux et fier.

À celle dont ses paroles m'accompagnent depuis mon enfance, la première femme forte, courageuse qui a souffert sans nous laisser souffrir, celle qui m'a appris à être une fille forte, déterminée qui cherche à ne jamais renoncer et poursuivre mes objectifs coûte que coûte, celle qui m'a encouragé à croire en mes rêves même les obstacles semblaient insurmontables. Mon ange gardien ton amour et ta présence dans ma vie et le fait d'être ma mère continueront d'éclairer mon chemin.

À mes chers frères Djamel et Yacine

Mes épaules solides, ceux qui m'ont fait découvrir le véritable sens de fraternité et partagé tant de moments de bonheur, merci pour votre soutien indéfectible, vos encouragements sincères et vos conseils toujours précieux.

À mes sœurs adorées Sonia, Thinhinane et Nadine

Je n'oublierai jamais vos encouragements constants, votre tendresse, votre soutien dans les moments où j'en avais le plus besoin. Votre présence dans mon cœur est un trésor inestimable.

À mon fiancé Syphax

Mon pilier et mon réconfort, merci pour ton amour, ta patience et ta présence à chaque étape de ce parcours. Tu as su apaiser mes doutes et raviver ma motivation.

À mes amis fidèles

Merci pour vos paroles réconfortantes et votre soutien qui m'ont portée jusqu'au bout.

À ma chère sœur Tina

Une pensée pleine d'émotion et d'amour, tu restes à jamais vivante dans mon cœur. Que ton âme repose en paix. Que ce travail soit un hommage à ta mémoire.

À mon binôme Sounya, qui est aussi mon amie

Merci d'être la meilleure version de toi-même. Ta contribution a été essentielle à cette réussite.

Enfin, à moi-même.

Pour chaque pas, chaque doute surmonté, chaque effort consenti. Ce travail est le reflet de ma persévérance et de ma foi en mes rêves.

LYNA

Dédicace

Je dédie ce travail à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont marqué mon chemin et ont contribué à ma réussite. À ceux dont l'amour, le soutien et les prières m'ont portée jusqu'ici.

À mes parents bien-aimés, Brahim et Akila

Vos sacrifices, votre amour inconditionnel, et votre foi en moi sont la fondation de tout ce que je suis. Papa, tes mots restent gravés en moi comme une boussole, et Maman, ta force et ton cœur sont les racines de ma détermination.

À mes frères Hicham et Yanis

Mes épaules solides, ceux qui m'ont fait découvrir le véritable sens de fraternité et partagé tant de moments de bonheur, merci pour votre soutien indéfectible, vos encouragements sincères et vos conseils toujours précieux.

À mes amis de cœur

Merci pour vos mots, vos encouragements, vos silences partagés. Vous avez mis de la chaleur dans ce parcours exigeant.

À Lyna, mon binôme et mon amie

Ta rigueur, ton soutien et ton énergie ont fait de cette collaboration un vrai partenariat. Merci d'avoir été là, à chaque étape.

Enfin, à moi-même

Pour chaque pas, chaque doute surmonté, chaque effort consenti. Ce travail est le reflet de ma persévérance et de ma foi en mes rêves.

SOUNYA

Table des matières

Table des matières	1
Liste des figures	2
Liste des tableaux	3
Introduction générale	4
Chapitre 1 : Fondamentaux des cellules solaires	5
1. Principes de base du photovoltaïque.....	3
1.1. Introduction à l'énergie photovoltaïque.....	3
1.2. Historique du développement photovoltaïque.....	3
1.3. Fondements physiques de l'effet photovoltaïque.....	4
1.3.1. Nature quantique de la lumière.....	4
1.3.2. Propriétés des semi-conducteurs.....	5
1.3.3. Dopage des semi-conducteurs.....	5
1.4. Mécanisme de conversion photovoltaïque.....	6
1.4.1. Absorption de photons et génération de charges.....	6
1.4.2. Séparation des charges et jonction P-N.....	7
1.4.3. Collection des charges et génération de courant.....	8
2. Principes de base du photovoltaïque.....	3
2.1. Introduction à l'énergie photovoltaïque.....	3
2.2. Historique du développement photovoltaïque.....	3
2.3. Fondements physiques de l'effet photovoltaïque.....	4
2.3.1. Nature quantique de la lumière.....	4
2.3.2. Propriétés des semi-conducteurs.....	5
2.3.3. Dopage des semi-conducteurs.....	5
2.4. Mécanisme de conversion photovoltaïque.....	6
2.4.1. Absorption de photons et génération de charges.....	6
2.4.2. Séparation des charges et jonction P-N.....	7
2.4.3. Collection des charges et génération de courant.....	8
3. Structure des cellules solaires conventionnelles.....	8
3.1. Anatomie détaillée d'une cellule photovoltaïque au silicium.....	8
3.1.1. Substrat de silicium.....	9
3.1.2. Émetteur et jonction P-N.....	10
3.1.3. Passivation et couche anti-reflet.....	10

3.1.4. Texturation de surface.....	11
3.1.5. Métallisation et collecte de courant.....	11
3.2. Caractéristiques électriques des cellules photovoltaïques.....	12
3.2.1. Modèle électrique équivalent.....	12
3.2.2. Dépendance en température des paramètres du modèle.....	13
3.2.3. Courbe I-V et points caractéristiques.....	15
3.2.4. Facteur de forme et rendement.....	16
3.3. Influence des conditions d'opération.....	16
3.3.1. Effet de l'éclairement.....	16
3.3.2. Effet de la température.....	17
3.3.3. Réponse spectrale et efficacité quantique externe.....	18
4. Limitations des cellules à simple jonction.....	20
4.1. Limitations physiques fondamentales.....	20
4.1.1. Limite de Shockley-Queisser et bilan détaillé.....	20
4.1.2. Compromis fondamentaux liés au gap énergétique.....	21
4.2. Pertes technologiques et pratiques.....	22
4.2.1. Pertes optiques.....	22
4.2.2. Pertes par recombinaison.....	23
4.2.3. Pertes résistives.....	23
5. Conclusion du chapitre.....	24
Chapitre 2 : Cellules solaires tandem.....	25
1. Introduction.....	25
2. Principe de fonctionnement.....	25
3. Avantages principaux.....	26
4. Types de cellules tandem.....	27
4.1. Classification selon le nombre de jonctions.....	27
4.1.1. Cellules à double jonction.....	27
4.1.2. Cellules à triple jonction.....	28
4.1.3. Cellules à quadruple jonction et au-delà.....	28
4.2. Classification selon la méthode d'interconnexion.....	29
4.2.1. Configuration monolithique à deux terminaux.....	29
4.2.2. Configuration à quatre terminaux.....	30
4.2.3. Configuration hybride.....	30
5. Matériaux utilisés et leur impact sur les performances.....	31

5.1. Matériaux semi-conducteurs III-V.....	31
5.2. Silicium et combinaisons avec d'autres matériaux.....	32
5.3. Pérovskites et matériaux émergents.....	33
6. Couches fonctionnelles et matériaux d'interface.....	33
7. Défis technologiques et limitations actuelles.....	34
7.1. Défis de fabrication et d'intégration.....	34
7.2. Limitations de performance.....	34
7.3. Défis de stabilité et fiabilité.....	35
7.4. Obstacles économiques et industriels.....	35
8. Perspectives et voies de recherche actuelles.....	35
9. Conclusion du chapitre.....	36
Chapitre 3 : Modélisation mathématique des cellules solaires tandem.....	37
1. Introduction.....	37
2. Modèle à une diode pour cellules simples.....	37
3. Méthodes d'extraction des paramètres.....	38
3.1. Méthode analytique.....	38
3.2. Méthodes numériques.....	38
4. Extension du modèle pour les cellules tandem.....	39
4.1. Configuration en série des cellules tandem.....	39
4.2. Configuration en parallèle.....	41
4.3. Configuration hybride.....	42
4.4. Modélisation des interfaces entre sous-cellules.....	44
4.4.1. Jonctions tunnel.....	44
4.4.2. Couches de recombinaison.....	45
5. Conclusion du chapitre.....	46
Chapitre 4 : Simulations, analyse des performances et optimisation.....	47
1. Introduction.....	47
2. Choix de Python pour la simulation de cellules solaires tandem.....	47
3. Choix de la Technologie Tandem Pérovskite/Silicium.....	49
4. Procédure de Simulation Électrique pour Cellules Tandem Pérovskite/Silicium.....	51
5. Simulation de la configuration série.....	54
6. Simulation de la configuration parallèle.....	57
7. Simulation de la configuration hybride 3T.....	60
8. Analyse paramétrique comparative.....	64

9. Optimisation des configurations.....	65
10. Conclusion du chapitre.....	66
Conclusion générale.....	67
Références bibliographiques.....	69

Liste des figures

Figure 1.1 : Développement du rendement de la technologie au silicium cristallin	4
Figure 1.2 : Distribution de la puissance lumineuse en fonction de la longueur d'onde dans le spectre solaire	7
Figure 1.3 : Jonction PN et diagramme des bandes d'énergie dans une cellule solaire	8
Figure 1.4 : Structure d'une cellule photovoltaïque standard à simple jonction PN	9
Figure 1.5 : Plaque de silicium monocristallin	9
Figure 1.6 : Plaque de silicium Poly cristallin	10
Figure 1.7 : Texturation d'une cellule photovoltaïque en silicium.....	11
Figure 1.8 : Circuit équivalent à une diode d'une cellule solaire	12
Figure 1.9 : Caractéristiques I-V d'une cellule solaire	15
Figure 1.10 : Variation du Rendement théorique maximum en fonction du gap pour une jonction photovoltaïque unique	22
Figure 2.1 : Structure des cellules solaires tandem : (a) structure en série (02 terminaux), (b) structure en parallèle (04 terminaux), (c) structure hybride (03 terminaux)	31
Figure 3.1 : Circuit équivalent d'une cellule tandem à deux jonctions en configuration série	40
Figure 3.2 : Circuit équivalent d'une cellule tandem à deux jonctions en configuration parallèle	41
Figure 3.3 : Circuit équivalent d'une cellule tandem à deux jonctions en configuration parallèle	43
Figure 4.1 : Cellule solaire tandem pérovskite/silicium en configuration : (a) série (2 terminaux), (b) parallèle (04 terminaux)	54
Figure 4.2 : Cellule solaire tandem pérovskite/silicium en configuration hybride (03 terminaux)	55
Figure 4.3 : Caractéristiques I-V et P-V simulées pour les cellules solaires individuelles Pérovskite, Silicium et Tandem 2T	60
Figure 4.4 : Caractéristiques I-V et P-V simulées pour les cellules solaires individuelles Pérovskite, Silicium et Tandem 4T	63
Figure 4.5 : Caractéristiques I-V et P-V simulées pour les cellules solaires individuelles Pérovskite1, Pérovskite2, Silicium et Tandem 3T	66

Liste des tableaux

Tableau 4.1 : Paramètres du modèle électrique équivalent des cellules solaires Pérovskite et Silicium utilisées dans la simulation de la cellule tandem Pérovskite/silicium 2T et 4T.....	59
Tableau 4.2 : Paramètres de performance électrique de la cellule solaire tandem Pérovskite/Silicium en configuration série extraits des caractéristiques I-V et P – V simulées	61
Tableau 4.3 : Paramètres de performance électrique de la cellule solaire tandem Pérovskite/Silicium en configuration parallèle extraits des caractéristiques I-V et P-V simulées	64
Tableau 4.4 : Paramètres du modèle électrique équivalent des cellules solaires Pérovskite1, Pérovskite2 et Silicium utilisées dans la simulation de la cellule tandem Pérovskite/silicium 3T	65
Tableau 4.5 : Paramètres de performance électrique de la cellule solaire tandem Pérovskite1/Pérovskite2/Silicium en configuration parallèle extraits des caractéristiques I-V et P-V simulées	67

Introduction générale

Dans un contexte mondial marqué par l'urgence climatique et la transition énergétique, le développement de technologies photovoltaïques plus performantes constitue un enjeu stratégique majeur. L'énergie photovoltaïque représente l'une des technologies les plus prometteuses dans le domaine des énergies renouvelables, permettant de convertir directement l'énergie lumineuse en électricité.

L'industrie photovoltaïque traverse actuellement une période de transformation majeure grâce à l'émergence de technologies innovantes qui surmontent les limitations des panneaux solaires en silicium conventionnels. Cette révolution s'articule autour de plusieurs approches complémentaires, notamment les cellules multi-jonctions, les systèmes tandem pérovskite-silicium, les cellules à porteurs chauds et les technologies exploitant les points quantiques. L'ensemble de ces innovations partage un objectif commun : dépasser la limite théorique de Shockley-Queisser en optimisant la capture de l'ensemble du spectre solaire tout en minimisant les pertes énergétiques.

Les cellules solaires tandem représentent une innovation particulièrement prometteuse pour répondre aux limites actuelles de conversion énergétique des cellules conventionnelles à simple jonction. Cette technologie photovoltaïque avancée améliore significativement l'efficacité de conversion énergétique en exploitant de manière optimale les différentes parties du spectre solaire.

Les objectifs scientifiques de ce projet sont multiples : développer un modèle de simulation numérique avancé, comprendre les mécanismes physiques des cellules tandem, proposer des stratégies d'optimisation innovantes et contribuer à l'amélioration des technologies photovoltaïques. La méthodologie reposera sur une approche interdisciplinaire combinant physique des semi-conducteurs, mathématiques appliquées, programmation scientifique et analyse numérique.

Ce mémoire est articulé autour de quatre chapitres complémentaires. Le premier chapitre établira les fondamentaux des cellules solaires en présentant les notions de base liées à cette technologie. Nous aborderons le principe de fonctionnement des cellules solaires, leur structure, les matériaux utilisés, le schéma électrique équivalent, ainsi que les principales limites des cellules solaires classiques à simple jonction.

Le deuxième chapitre sera consacré à une présentation compréhensive du concept de cellules tandem. Nous examinerons d'abord leur principe de fonctionnement et leurs avantages par rapport aux cellules conventionnelles, puis nous analyserons les différents types selon le nombre de jonctions et les méthodes d'interconnexion. L'étude portera également sur les matériaux semi-conducteurs utilisés et leur impact sur les performances, incluant les couches fonctionnelles et matériaux d'interface. Enfin, nous identifierons les défis technologiques actuels et les perspectives de recherche.

La Modélisation électrique des cellules tandem fera l'objet du troisième chapitre, qui présente une approche systématique de la modélisation électrique à travers les circuits équivalents. Nous débuterons par un rappel du modèle à une diode pour les cellules simples, avant d'examiner les méthodes d'extraction des paramètres essentiels. L'extension aux architectures tandem constituera le cœur du développement, avec une attention particulière portée à la modélisation des interfaces entre sous-cellules.

Le quatrième chapitre sera dédié à l'implémentation numérique et à l'étude de cas appliquée aux cellules tandem Pérovske/Silicium. Cette technologie représente une voie prometteuse combinant les avantages spectraux complémentaires de ces deux matériaux semi-conducteurs. Nous établirons d'abord un modèle électrique spécifique pour chaque configuration : série (2T), parallèle (4T) et hybride (3T). Ensuite, nous développerons une approche de simulation numérique systématique utilisant Python, permettant de modéliser avec précision le comportement électrique de ces différentes architectures. Les simulations généreront automatiquement les courbes caractéristiques I-V et P-V, puis le même programme Python extraîtra les paramètres de performances clés pour chaque configuration. Une étude comparative approfondie entre les trois configurations sera menée, suivie de la proposition de stratégies d'optimisation spécifiques à chaque architecture tandem.

Nous terminerons ce mémoire par une synthèse complète des résultats obtenus, une évaluation critique des modèles développés et une discussion sur les perspectives d'amélioration des cellules solaires tandem.

Chapitre 1

Fondamentaux des cellules solaires

1. Principes de base du photovoltaïque

1.1 Introduction à l'énergie photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque représente l'une des technologies les plus prometteuses dans le domaine des énergies renouvelables. Elle permet de convertir directement l'énergie lumineuse, principalement celle provenant du soleil, en électricité. Cette conversion s'effectue sans pièces mobiles, sans émission de gaz à effet de serre et avec une remarquable fiabilité. À l'heure où les préoccupations environnementales sont au cœur des politiques énergétiques mondiales, cette technologie attire une attention croissante tant au niveau de la recherche fondamentale qu'au niveau des applications industrielles.

Le terme "photovoltaïque" est composé de deux parties : "photo", dérivé du grec "phōs" signifiant lumière, et "voltaïque", faisant référence à Alessandro Volta, pionnier dans l'étude de l'électricité. Cette terminologie reflète parfaitement le principe fondamental de cette technologie : la transformation de la lumière en tension électrique.

Dans ce chapitre, nous présenterons les notions fondamentales liées aux cellules solaires. Nous aborderons leur principe de fonctionnement, leur structure, les matériaux utilisés, le schéma électrique équivalent, ainsi que les principales limites des cellules solaires classiques à simple jonction.

1.2 Historique du développement photovoltaïque

L'effet photovoltaïque a été observé pour la première fois en 1839 par le physicien français Alexandre-Edmond Becquerel [1]. Alors qu'il expérimentait avec des électrodes métalliques plongées dans une solution électrolytique, il constata qu'une différence de potentiel apparaissait lorsque le dispositif était exposé à la lumière. Cependant, il fallut attendre plusieurs décennies avant que ce phénomène ne trouve des applications pratiques.

En 1883, Charles Fritts fabriqua la première cellule solaire en recouvrant du sélénium d'une fine couche d'or [2]. Bien que son rendement fût inférieur à 1%, cette invention marqua le début

concret de la technologie photovoltaïque. La compréhension théorique du phénomène progressa significativement avec les travaux d'Albert Einstein sur l'effet photoélectrique en 1905, qui lui valurent le prix Nobel de physique en 1921.

La véritable percée technologique eut lieu en 1954 dans les laboratoires Bell, où Daryl Chapin, Calvin Fuller et Gerald Pearson développèrent la première cellule solaire au silicium avec un rendement de conversion de 6% [3]. Cette innovation cruciale ouvrit la voie aux applications pratiques, notamment dans le domaine spatial où les cellules solaires devinrent rapidement la source d'énergie privilégiée pour les satellites [4]. La Figure 1.1 représente des étapes de développement de la technologie au silicium cristallin [5].

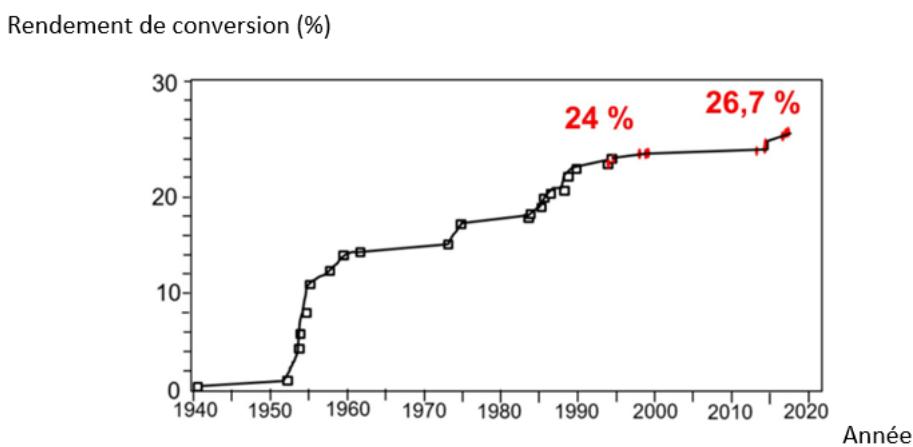


Figure 1.1 : Développement du rendement de la technologie au silicium cristallin [5]

1.3 Fondements physiques de l'effet photovoltaïque

1.3.1 Nature quantique de la lumière

Pour comprendre l'effet photovoltaïque, il est essentiel de considérer la nature duale de la lumière. En effet, la lumière peut être décrite comme une onde électromagnétique, caractérisée par sa longueur d'onde et sa fréquence, mais également comme un flux de particules appelées photons. Cette dualité onde-particule, mise en évidence par les travaux de Max Planck et Albert Einstein au début du XXe siècle, est fondamentale dans l'explication du phénomène photovoltaïque.

Chaque photon transporte une énergie quantifiée, directement proportionnelle à sa fréquence selon la relation :

$$E = h\nu \quad (1.1)$$

Où h est la constante de Planck ($6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$) et ν la fréquence de l'onde associée.

Cette relation implique que les photons de lumière bleue ou ultraviolette, de fréquence élevée, possèdent plus d'énergie que les photons de lumière rouge ou infrarouge, de fréquence plus basse.

1.3.2 Propriétés des semi-conducteurs

Les matériaux semi-conducteurs occupent une position intermédiaire entre les conducteurs, qui permettent facilement le passage du courant électrique, et les isolants, qui s'y opposent fortement. Leur conductivité électrique dépend de facteurs comme la température et, aspect crucial pour le photovoltaïque, l'exposition à la lumière [6].

À l'échelle atomique, les électrons dans un semi-conducteur sont répartis selon des bandes d'énergie distinctes. La bande de valence contient les électrons fortement liés aux atomes, tandis que la bande de conduction regroupe les électrons libres de se déplacer à travers le matériau. Ces deux bandes sont séparées par une bande interdite, ou "gap" énergétique, dont la largeur détermine les propriétés électroniques du matériau.

Pour le silicium cristallin, matériau semi-conducteur le plus couramment utilisé dans les cellules solaires, cette bande interdite est d'environ 1,12 électron-volt (eV) à température ambiante [6]. Cette valeur correspond à l'énergie minimale qu'un électron doit acquérir pour passer de la bande de valence à la bande de conduction.

1.3.3 Dopage des semi-conducteurs

Le dopage est un processus crucial dans la fabrication des cellules photovoltaïques. Il consiste à introduire délibérément des impuretés spécifiques dans le réseau cristallin du semi-conducteur pour modifier ses propriétés électriques.

Dans le cas du silicium, qui possède quatre électrons de valence, deux types de dopage sont couramment pratiqués :

- **Dopage de type N** : Des atomes possédant cinq électrons de valence, comme le phosphore ou l'arsenic, sont introduits dans le réseau cristallin. Le cinquième électron,

faiblement lié à l'atome dopant, peut facilement se détacher et contribuer à la conductivité électrique. Le matériau ainsi obtenu présente un excès d'électrons, porteurs de charge négative.

- **Dopage de type P :** Des atomes possédant trois électrons de valence, comme le bore ou le gallium, sont incorporés au réseau. Il en résulte un déficit d'électron, créant ce qu'on appelle un "trou". Ces trous se comportent comme des porteurs de charge positive et peuvent également contribuer à la conductivité électrique.

Ces modifications de la structure électronique du semi-conducteur sont fondamentales pour créer le champ électrique interne nécessaire au fonctionnement des cellules photovoltaïques.

1.4 Mécanisme de conversion photovoltaïque

1.4.1 Absorption de photons et génération de charges

Le processus de conversion photovoltaïque commence par l'absorption d'un photon par le matériau semi-conducteur. Pour être efficace, l'énergie du photon doit être au moins égale à la largeur de la bande interdite du semi-conducteur. Lorsqu'un tel photon est absorbé, son énergie est transférée à un électron de la bande de valence, lui permettant de franchir la bande interdite et d'accéder à la bande de conduction.

Ce phénomène crée simultanément deux entités : un électron libre dans la bande de conduction (charge négative) et un trou dans la bande de valence (charge positive). Cette paire électron-trou constitue l'unité fondamentale générée par l'effet photovoltaïque.

Il est important de noter que les photons dont l'énergie est inférieure à la largeur de la bande interdite ne peuvent pas générer de paires électron-trou et traversent le matériau sans être absorbés. À l'inverse, les photons possédant une énergie supérieure à la bande interdite créeront bien des paires électron-trou, mais l'excédent d'énergie sera dissipé sous forme de chaleur, contribuant à l'échauffement de la cellule.

Notons que le rayonnement solaire qui atteint la surface terrestre couvre un large spectre de longueurs d'onde, s'étendant principalement de l'ultraviolet (300 nm) à l'infrarouge proche (2500 nm), avec un maximum d'intensité dans le domaine visible. La distribution spectrale exacte varie en fonction de nombreux facteurs, notamment l'altitude, la latitude, les conditions atmosphériques et l'heure de la journée.

Pour caractériser de manière standardisée ce rayonnement, on utilise souvent la notion de masse d'air (AM, Air Mass). La référence AM0 correspond au spectre solaire hors atmosphère, tandis que AM1.5 représente le spectre standard à la surface terrestre pour des latitudes moyennes, avec le soleil à 41,8° au-dessus de l'horizon.

La Figure 1.2 représente Distribution de la puissance lumineuse en fonction de la longueur d'onde dans le spectre solaire [7].

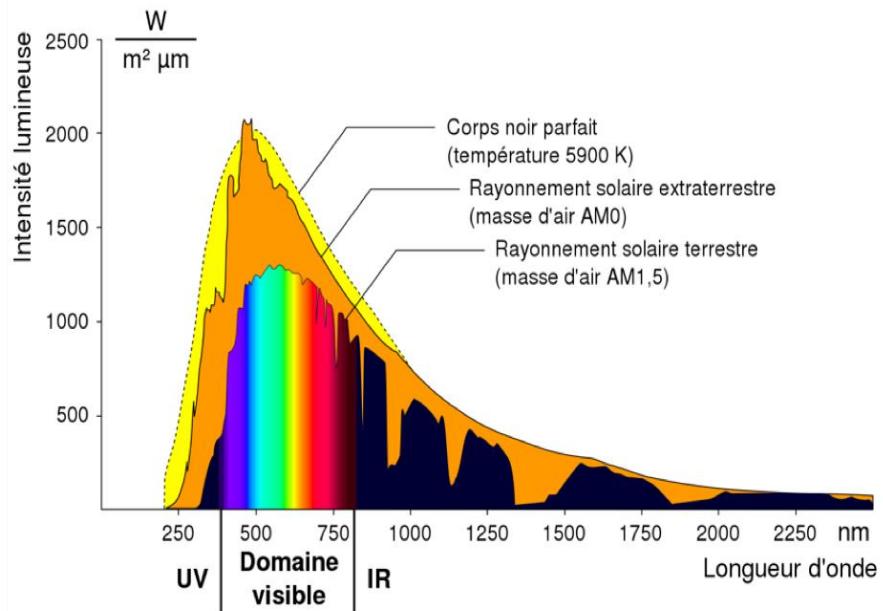


Figure 1.2 : Distribution de la puissance lumineuse en fonction de la longueur d'onde dans le spectre solaire [7].

1.4.2 Séparation des charges et jonction P-N

La simple génération de paires électron-trou n'est pas suffisante pour produire un courant électrique exploitable. En effet, sans mécanisme supplémentaire, ces charges tendraient naturellement à se recombiner rapidement, annulant l'effet de la photogénération.

C'est ici qu'intervient la structure de jonction P-N, élément central des cellules photovoltaïques conventionnelles. Cette jonction est formée par la mise en contact d'un semi-conducteur de type P et d'un semi-conducteur de type N. À l'interface entre ces deux régions, un phénomène de diffusion se produit : les électrons excédentaires de la région N diffusent vers la région P, tandis que les trous de la région P diffusent vers la région N.

Cette redistribution des charges crée une zone particulière appelée "zone de déplétion" ou "zone de charge d'espace", caractérisée par l'absence de porteurs libres. Plus important encore, elle

établit un champ électrique interne qui est orienté de la région N vers la région P. Ce champ électrique joue un rôle fondamental : il agit comme une barrière de potentiel qui empêche la poursuite de la diffusion des porteurs majoritaires, tout en facilitant le mouvement des porteurs minoritaires d'une région à l'autre.

Lorsqu'une paire électron-trou est générée par l'absorption d'un photon à proximité de la jonction, ce champ électrique sépare efficacement les charges : il pousse les électrons vers la région N et les trous vers la région P, prévenant ainsi leur recombinaison.

1.4.3 Collection des charges et génération de courant

Une fois séparées par le champ électrique de la jonction P-N, les charges photogénérées doivent être collectées pour produire un courant électrique utilisable. Cette collecte s'effectue via des contacts métalliques placés sur les faces avant et arrière de la cellule. Lorsque ces contacts sont reliés à un circuit externe, les électrons accumulés dans la région N circulent à travers ce circuit pour rejoindre la région P, créant ainsi un courant électrique continu. La puissance électrique produite est le produit de ce courant par la tension aux bornes de la cellule.

La Figure 1.3 illustre les différents mécanismes intervenant lors de la conversion photovoltaïque, à travers la jonction PN et le diagramme des bandes d'énergie correspondant [8].

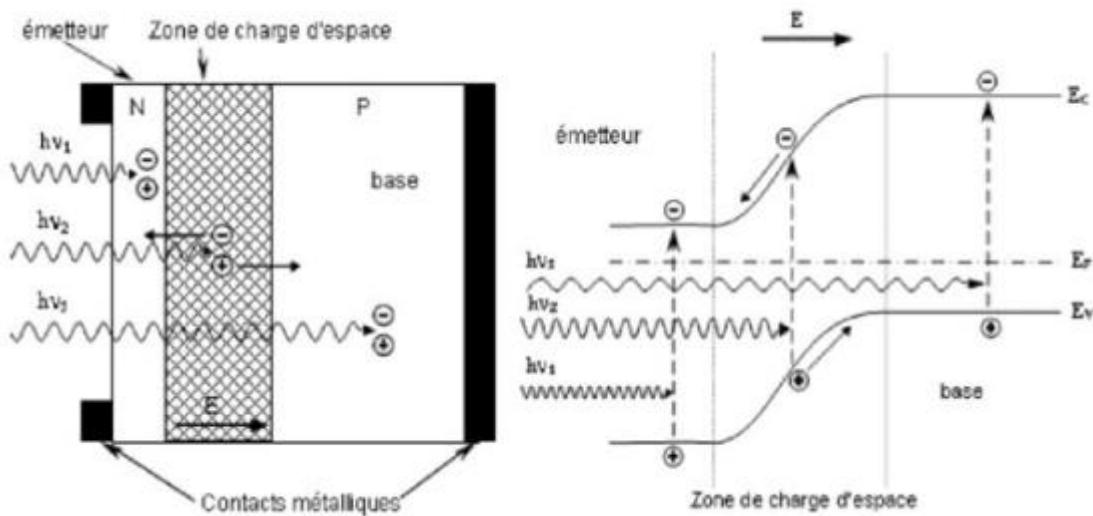


Figure 1.3 : Jonction PN et diagramme des bandes d'énergie dans une cellule solaire [8]

2. Structure des cellules solaire conventionnelles

2.1 Anatomie détaillée d'une cellule photovoltaïque au silicium

La cellule photovoltaïque au silicium cristallin représente la technologie dominante sur le marché actuel, avec plus de 90% des installations mondiales [9]. Sa structure, bien qu'en apparence simple, résulte d'une optimisation minutieuse de chaque composant pour maximiser l'efficacité de conversion tout en minimisant les coûts de production.

La Figure 1.4 illustre la structure d'une cellule photovoltaïque standard à simple jonction PN [10].

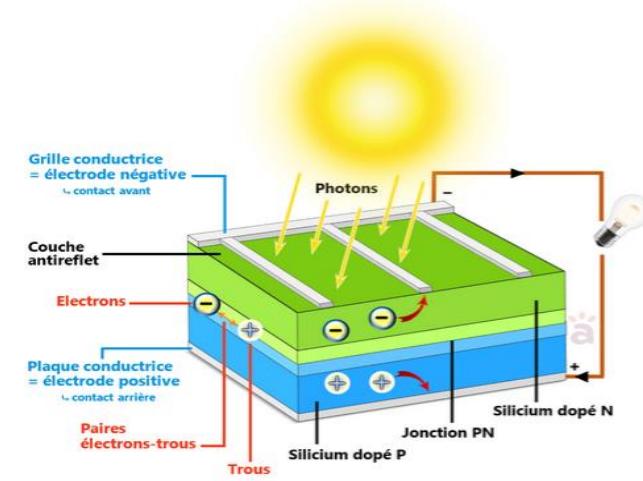


Figure 1.4 : Structure d'une cellule photovoltaïque standard à simple jonction PN [10]

2.1.1 Substrat de silicium

Le cœur de la cellule est constitué d'une plaque (ou "wafer") de silicium cristallin, d'une épaisseur typique de 150 à 200 micromètres. Deux variantes principales existent :

- **Silicium monocristallin** : il présente une structure cristalline homogène et ordonnée (voir Figure 1.5 [11]). Reconnaissable à sa couleur uniforme gris foncé à noir et souvent à sa forme pseudo-carrée aux coins arrondis, il offre les meilleurs rendements (20-22% en production industrielle) mais à un coût plus élevé.



Figure 1.5 : Plaque de silicium monocristallin [11].

- **Silicium polycristallin** : il est composé de multiples cristaux de tailles variables (voir Figure 1.6 [11]). Son aspect bleuté caractéristique révèle les différents grains cristallins. Moins coûteux à produire que le monocristallin, il présente des rendements légèrement inférieurs (17-19%) en raison des recombinaisons aux joints de grains.



Figure 1.6 : Plaque de silicium Poly cristallin [11].

Le substrat est généralement dopé au bore pour former un matériau de type p, avec une résistivité optimisée entre $0,5$ et $3 \Omega.cm$. Cette résistivité représente un compromis entre une bonne conductivité électrique et une longueur de diffusion des porteurs minoritaires suffisante.

2.1.2 Émetteur et jonction P-N

Sur la face avant du substrat est formée une couche mince ($0,2$ à $0,5$ micromètre) fortement dopée au phosphore, constituant l'émetteur de type N. L'interface entre le substrat de type P et l'émetteur de type N forme la jonction P-N, siège du champ électrique qui sépare les charges photogénérées. La profondeur et le profil de cette jonction sont des paramètres critiques : une jonction trop profonde augmente l'absorption parasite dans l'émetteur, tandis qu'une jonction trop superficielle peut compromettre la robustesse de la cellule et augmenter la résistance série.

Le dopage de l'émetteur suit généralement un profil graduel, avec une concentration plus élevée près de la surface (10^{20} - 10^{21} atomes/cm 3) pour faciliter le contact ohmique avec la métallisation, et une concentration plus faible à proximité de la jonction pour réduire les recombinaisons.

2.1.3 Passivation et couche anti-reflet

La surface d'un semi-conducteur présente de nombreuses liaisons pendantes qui agissent comme centres de recombinaison pour les porteurs de charge, réduisant significativement le rendement. Pour remédier à ce problème, des couches de passivation sont déposées sur les faces avant et arrière de la cellule.

La face avant est typiquement recouverte d'une couche de nitrure de silicium hydrogéné ($\text{SiN}_x : \text{H}$) déposée par PECVD (Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition). Cette couche remplit une double fonction :

- **Passivation chimique** : L'hydrogène présent dans le matériau diffuse vers l'interface et neutralise les liaisons pendantes du silicium.
- **Effet anti-reflet** : Avec une épaisseur d'environ 70-80 nm et un indice de réfraction d'environ 2, cette couche minimise la réflexion optique pour les longueurs d'onde autour de 600 nm, correspondant au maximum du spectre solaire. C'est cette couche qui donne aux cellules leur caractéristique couleur bleue.

La face arrière peut être passivée par différentes approches, comme une couche d'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) pour les substrats de type P.

2.1.4 Texturation de surface

Pour réduire davantage les pertes par réflexion, la surface avant du silicium est généralement texturée à l'échelle micrométrique (voir Figure 1.7 [12]). Cette texturation crée des structures pyramidales qui favorisent les réflexions multiples, augmentant ainsi les chances d'absorption des photons incidents.

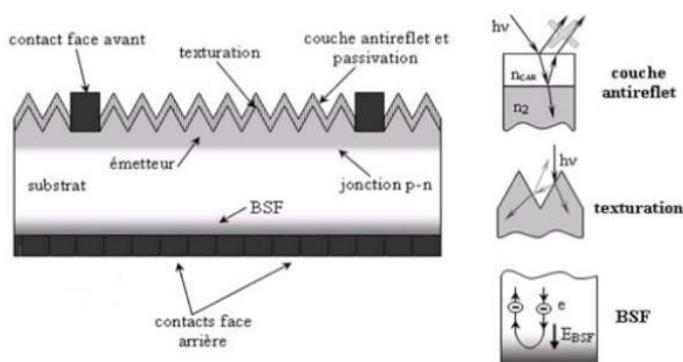


Figure 1.7 : Texturation d'une cellule photovoltaïque en silicium [12].

2.1.5 Métallisation et collecte de courant

Le système de métallisation d'une cellule solaire doit assurer une collecte efficace du courant tout en minimisant les pertes résistives et l'ombrage. Il comprend deux parties principales :

- **Métallisation avant** : Elle forme une grille composée de lignes fines appelées "fingers" (typiquement 30-40 μm de largeur), connectées à des barres collectrices plus larges appelées "busbars" (1-1,5 mm de largeur). Cette structure optimise le compromis entre résistance série et ombrage. Les cellules modernes comportent généralement 3 à 5 busbars, voire des configurations multiples (Multi-Busbar, MBB) avec 9 à 12 fils de plus petit diamètre.
- **Métallisation arrière** : Elle couvre généralement l'intégralité de la face arrière.

2.2 Caractéristiques électriques des cellules photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques sont caractérisées par plusieurs paramètres électriques fondamentaux qui déterminent leurs performances dans différentes conditions d'opération.

2.2.1 Modèle électrique équivalent

Une cellule solaire peut être modélisée électriquement par un circuit équivalent comprenant :

- Une source de courant photogénéré (I_{ph}) proportionnelle à l'éclairement.
- Une diode représentant la jonction P-N.
- Une résistance série (R_s) représentant les pertes résistives dans les contacts et le matériau.
- Une résistance parallèle (R_{sh}) modélisant les fuites de courant à travers la jonction.

La figure 1.8 ci-dessous représente ce circuit équivalent.

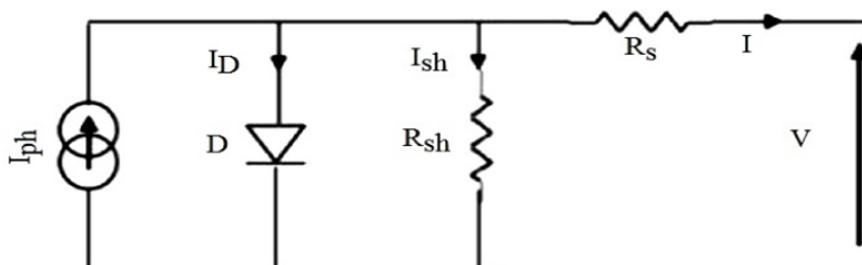


Figure 1.8 : Circuit équivalent à une diode d'une cellule solaire.

L'application des lois de Kirchhoff au circuit équivalent permet d'établir l'équation caractéristique courant-tension (I-V) de la cellule solaire selon le modèle à une diode [13] :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V - R_S I}{n V_T} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_S I}{R_{SH}} \quad (1.2)$$

Où I est le courant de sortie de la cellule (A), V est la tension aux bornes de la cellule (V), I_{ph} est le photocourant généré (A), I_0 est le courant de saturation inverse de la diode (A), R_S est la résistance série (Ω), R_{SH} est la résistance parallèle (Ω), n est le facteur d'idéalité de la diode (sans dimension, généralement entre 1 et 2), V_T est la tension thermique définie par $V_T = k_B T / q$ (V), avec : k_B est la constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$), T est la température absolue (K) et q est la charge élémentaire de l'électron ($1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$)

La tension thermique V_T à température ambiante (25°C ou $298,15 \text{ K}$) vaut approximativement $25,7 \text{ mV}$.

Le photocourant I_{ph} est directement proportionnel à l'intensité lumineuse incidente et peut être exprimé par [13] :

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}} [I_{ph,ref} + \alpha (T - T_{ref})] \quad (1.3)$$

Où G est l'irradiance solaire incidente (W/m^2), G_{ref} est l'irradiance de référence (généralement 1000 W/m^2), $I_{ph,ref}$ est le photocourant dans les conditions de référence (A), α est le coefficient de température du courant (A/K), T est la température de la cellule (K) et T_{ref} est la température de référence (généralement 25°C ou $298,15 \text{ K}$)

Pour une cellule idéale, R_S serait nulle et R_{sh} infinie. En pratique, les cellules commerciales présentent des valeurs de R_S de $0,5$ à $1 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}^2$ et de R_{sh} de quelques centaines à quelques milliers de $\Omega \cdot \text{cm}^2$ [13].

2.2.2 Dépendance en température des paramètres du modèle

La température a une influence significative sur les performances des cellules solaires. Dans le modèle à une diode, tous les paramètres dépendent de la température, mais de façon différente [13].

Énergie de bande interdite :

L'énergie de bande interdite du semi-conducteur diminue généralement avec la température selon la relation empirique de Varshni :

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \quad (1.4)$$

Où $E_g(0)$ est l'énergie de bande interdite à 0 K et α et β sont des constantes spécifiques au matériau

Courant de saturation

Le courant de saturation I_0 de la diode augmente fortement avec la température, suivant la relation :

$$I_0(T) = I_0(T_{ref}) \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left[\frac{E_g(T_{ref})}{k_B T_{ref}} - \frac{E_g(T)}{k_B T} \right] \quad (1.5)$$

Où $I_0(T_{ref})$ est le courant de saturation à la température de référence T_{ref} et $E_g(T_{ref})$ est la bande interdite du matériau à la température de référence T_{ref}

Cette dépendance exponentielle est responsable de la diminution significative de la tension en circuit ouvert avec l'augmentation de la température.

Photocourant :

Le photocourant augmente légèrement avec la température, principalement en raison de la diminution de l'énergie de bande interdite qui permet d'absorber plus de photons :

$$I_{ph}(T) = I_{ph}(T_{ref}) - \alpha_{ISC}(T - T_{ref}) \quad (1.6)$$

Où α_{ISC} est le coefficient de température du courant de court-circuit (typiquement de l'ordre de + 0,05 %/°C pour le silicium cristallin).

Résistances série et parallèle :

Les résistances série et parallèle varient également avec la température, mais leur dépendance est généralement plus faible et peut être modélisée par des relations linéaires :

$$R_s(T) = R_s(T_{ref})[1 + \alpha_{Rs}(T - T_{ref})] \quad (1.7)$$

$$R_{sh}(T) = R_{sh}(T_{ref})[1 + \alpha_{Rsh}(T - T_{ref})] \quad (1.8)$$

2.2.3 Courbe I-V et points caractéristiques

La caractéristique courant-tension (I-V) d'une cellule solaire, illustrée sur la Figure 1.9 [14], représente sa signature électrique complète. Cette courbe peut être mesurée en variant la charge connectée aux bornes de la cellule sous éclairement constant.

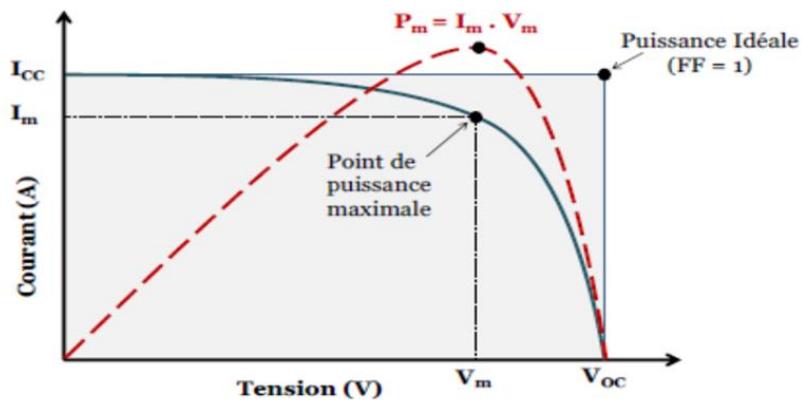


Figure 1.9 : Caractéristiques I-V d'une cellule solaire [14].

Elle présente plusieurs points caractéristiques [14] :

- **Courant de court-circuit (I_{CC})** : Courant délivré lorsque la tension aux bornes est nulle (cellule court-circuittée) ($V = 0$). Il est approximativement égal au courant photogénéré I_{ph} et proportionnel à l'éclairement. Pour une cellule standard de $156 \times 156 \text{ mm}^2$, I_{CC} est typiquement de 9-10 A sous un éclairement standard de 1000 W/m^2 . En négligeant la résistance série (qui est généralement faible), on peut approximer :

$$I_{SC} \approx I_{ph} \quad (1.9)$$

- **Tension de circuit ouvert (V_{oc})** : Tension aux bornes lorsque le courant est nul (circuit ouvert) ($I = 0$). Elle dépend logarithmiquement du rapport entre le courant photogénéré et le courant de saturation de la diode. Pour une cellule au silicium cristallin, V_{OC} est typiquement de 0,6-0,7 V. En supposant que R_{SH} est suffisamment grande, on obtient :

$$V_{OC} = nV_T \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right) \quad (1.10)$$

- **Point de puissance maximale (MPP)** : Point de la courbe I-V où le produit « courant \times tension » est maximal, définissant ainsi la puissance maximale P_{max} que peut délivrer la cellule.

$$P_{max} = V_{mp}I_{mp} \quad (1.11)$$

Où : V_{mp} et I_{mp} sont respectivement la tension et le courant au point de puissance maximale.

2.2.4 Facteur de forme et rendement

Le facteur de forme (FF) quantifie la "rectangularité" de la courbe I-V. Il est défini comme le rapport entre la puissance maximale et le produit « $I_{CC} \times V_{OC}$ » :

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{OC}I_{SC}} = \frac{V_{mp}I_{mp}}{V_{OC}I_{SC}} \quad (1.12)$$

Pour les cellules industrielles au silicium cristallin, FF est typiquement entre 0,75 et 0,83 [15]. Un FF élevé indique de faibles pertes résistives et une bonne qualité de jonction.

Le rendement (η) est la mesure ultime de performance, défini comme le rapport entre la puissance électrique maximale produite et la puissance lumineuse incidente :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{V_{mp}I_{mp}}{G A} \quad (1.13)$$

Où P_{inc} est la puissance lumineuse incidente (W), G est l'irradiance solaire (W/m²) et A est la surface active de la cellule (m²).

Les rendements typiques des cellules industrielles sont : 20-22% pour le silicium monocristallin, 17-19% pour le silicium polycristallin et jusqu'à 24-25% pour les technologies avancées comme l'hétérojonction ou les contacts passivants.

2.3 Influence des conditions d'opération

Les performances d'une cellule photovoltaïque varient significativement en fonction des conditions environnementales, principalement l'éclairement et la température [16].

2.3.1 Effet de l'éclairement

L'intensité lumineuse incidente (éclairement) affecte directement les paramètres électriques de la cellule :

- **Courant de court-circuit (I_{CC})** : Il varie de façon quasi-linéaire avec l'éclairement. Un ensoleillement réduit de moitié entraînera une réduction approximativement similaire du courant.
- **Tension de circuit ouvert (V_{OC})** : Elle varie de façon logarithmique avec l'éclairement. Cette dépendance plus faible explique pourquoi la tension des modules photovoltaïques reste relativement stable même par temps nuageux. Typiquement, une réduction de l'éclairement d'un facteur 10 ne réduira la tension que d'environ 60 mV pour une cellule au silicium [17].
- **Puissance maximale** : En conséquence des variations de I_{CC} et V_{OC} , la puissance varie quasi-linéairement avec l'éclairement, avec une légère dégradation du facteur de forme à très faible éclairement due à l'influence croissante de la résistance parallèle.

Cette dépendance à l'éclairement est particulièrement critique pour les applications réelles, où l'ensoleillement varie continuellement au cours de la journée et des saisons. Les systèmes photovoltaïques intègrent généralement des algorithmes de suivi du point de puissance maximale (MPPT) qui ajustent dynamiquement le point de fonctionnement pour maximiser la production énergétique dans toutes les conditions.

2.3.2 Effet de la température

Contrairement à une idée reçue, les hautes températures sont défavorables aux performances des cellules photovoltaïques au silicium :

- **Tension de circuit ouvert (V_{OC})** : Elle diminue significativement avec la température, typiquement de $-2,2 \text{ mV/}^{\circ}\text{C}$ pour une cellule au silicium cristallin [18]. Ce coefficient négatif est lié à l'augmentation du courant de saturation de la diode avec la température.
- **Courant de court-circuit (I_{CC})** : Il augmente légèrement avec la température (typiquement $+0,05\%/\text{}^{\circ}\text{C}$) en raison de la réduction du gap énergétique du silicium [18], permettant l'absorption de photons de plus basse énergie.
- **Rendement** : L'effet net est une diminution du rendement avec la température, caractérisée par un coefficient de température négatif d'environ $-0,4$ à $-0,5\%/\text{}^{\circ}\text{C}$ pour les cellules standard au silicium. Ainsi, une cellule certifiée à 20% de rendement à 25°C ne fonctionnera qu'à environ 18% à 45°C , température facilement atteinte en plein soleil.

Cette sensibilité à la température représente un défi majeur pour les installations photovoltaïques, particulièrement dans les climats chauds où les modules peuvent atteindre des températures de 60-70°C. Les technologies d'installation permettant une meilleure ventilation des modules, ainsi que les cellules à hétérojonction présentant des coefficients de température plus favorables (-0,3%/°C), constituent des pistes d'amélioration importantes.

Pour simplifier l'analyse, on définit souvent des coefficients de température globaux pour les principaux paramètres photovoltaïques :

- α_{ISC} : coefficient de température du courant de court-circuit (%/°C)
- β_{Voc} : coefficient de température de la tension en circuit ouvert (%/°C)
- γ_{Pmax} : coefficient de température de la puissance maximale (%/°C)

Ces coefficients permettent d'estimer les performances à une température T par rapport aux conditions standard de test (STC, généralement 25°C) :

$$I_{Sc}(T) = I_{Sc}(T_{ref}) \left[1 + \alpha_{ISC} \frac{T - T_{ref}}{100} \right] \quad (1.14)$$

$$V_{Oc}(T) = V_{Oc}(T_{ref}) \left[1 + \beta_{Voc} \frac{T - T_{ref}}{100} \right] \quad (1.15)$$

$$P_{max}(T) = P_{max}(T_{ref}) \left[1 + \gamma_{Pmax} \frac{T - T_{ref}}{100} \right] \quad (1.16)$$

2.3.3 Réponse spectrale et efficacité quantique externe

La sensibilité d'une cellule aux différentes longueurs d'onde du spectre solaire est caractérisée par sa réponse spectrale, définie comme le rapport entre le courant généré et la puissance lumineuse incidente à une longueur d'onde donnée. La réponse spectrale RS est donnée par la l'équation :

$$RS(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{P_{inc}(\lambda)} = \frac{I(\lambda)}{\phi(\lambda) \cdot S} \quad (1.17)$$

Où $I(\lambda)$ est l'intensité générée, $P_{inc}(\lambda)$ est la puissance incidente, $\phi(\lambda)$ est le flux lumineux incident (W/m²) et S la surface de la cellule (m²).

Pour les cellules au silicium cristallin : la réponse est nulle pour les longueurs d'onde supérieures à 1100 nm (limite d'absorption du silicium), elle atteint son maximum dans le proche infrarouge (900-950 nm) et elle diminue dans le bleu et l'ultraviolet en raison de l'absorption parasite dans l'émetteur et des recombinaisons de surface

La réponse spectrale intégrée sur l'ensemble du spectre solaire détermine le courant total généré par la cellule. Les variations du contenu spectral de la lumière (matin/soir, nuages, saisons) affectent donc les performances relatives de différentes technologies photovoltaïques selon leur réponse spectrale spécifique.

L'efficacité quantique externe $EQE(\lambda)$ représente le rapport entre le nombre d'électrons collectés et le nombre de photons incidents à une longueur d'onde donnée :

$$EQE(\lambda) = \frac{hc}{q\lambda} Rs(\lambda) \quad (1.18)$$

Où h est la constante de Planck, c est la vitesse de la lumière et λ est la longueur d'onde.

Le photocourant total généré sous un spectre donné peut être calculé par l'intégrale :

$$I_{ph} = A \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} Rs(\lambda) E(\lambda) d\lambda \quad (1.19)$$

Où A est la surface active de la cellule, $E(\lambda)$ est l'irradiance spectrale ($\text{W}/\text{m}^2/\text{nm}$) et λ_{min} et λ_{max} sont les limites du spectre considéré.

En conditions réelles d'utilisation, le spectre solaire varie considérablement en fonction de plusieurs facteurs :

- **Masse d'air (AM) :** La masse d'air caractérise la longueur du trajet optique des rayons solaires à travers l'atmosphère terrestre. Elle est définie par :

$$AM = \frac{1}{\cos \theta} \quad (1.20)$$

Où θ est l'angle zénithal du Soleil.

- **Conditions météorologiques** : La nébulosité, les aérosols et l'humidité modifient la distribution spectrale de la lumière.
- **Variations saisonnières et journalières** : L'heure du jour et la saison influencent la masse d'air et donc le spectre incident.

Pour modéliser ces variations, on peut utiliser des modèles de ciel clair comme le modèle SMARTS (Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine) ou des données mesurées pour différentes conditions.

3. Limitations des cellules à simple jonction

3.1 Limitations physiques fondamentales

Les cellules photovoltaïques à simple jonction sont soumises à des limitations physiques intrinsèques qui établissent des plafonds théoriques à leur rendement, indépendamment de la qualité de fabrication ou des optimisations techniques.

3.1.1 Limite de Shockley-Queisser et bilan détaillé

En 1961, William Shockley et Hans-Joachim Queisser ont établi un cadre théorique, connu sous le nom de "principe de bilan détaillé", pour calculer le rendement maximal atteignable par une cellule photovoltaïque à simple jonction [19]. Cette analyse tient compte des contraintes physiques fondamentales et repose sur plusieurs hypothèses : la cellule possède une jonction P-N idéale, chaque photon absorbé génère exactement une paire électron-trou, le seul mécanisme de recombinaison est radiatif (émission d'un photon), le semi-conducteur absorbe tous les photons d'énergie supérieure à son gap et les porteurs de charge se thermalisent instantanément à la température du réseau

Selon cette analyse, le rendement maximal théorique est d'environ 33,7% pour une cellule à simple jonction sous un spectre solaire AM1.5G (1000 W/m²) à 25°C, avec un gap énergétique optimal d'environ 1,34 eV. Pour le silicium cristallin ($E_g = 1,12$ eV), cette limite est légèrement inférieure, environ 29,4%.

Cette limitation provient de plusieurs mécanismes de pertes inévitables :

- **Pertes par non-absorption :** Les photons d'énergie inférieure au gap ne peuvent pas générer de paires électron-trou et traversent le matériau sans être absorbés. Pour le silicium, ces pertes représentent environ 19% de l'énergie solaire incidente.

- **Pertes par thermalisation :** Les photons d'énergie supérieure au gap génèrent des porteurs "chauds" qui se thermalisent rapidement, perdant leur excédent d'énergie sous forme de chaleur. Ces pertes représentent environ 33% de l'énergie incidente pour le silicium.
- **Pertes par recombinaison radiative :** Même dans une cellule idéale, une fraction des porteurs se recombine de façon radiative, un processus inévitable qui est la contrepartie thermodynamique de l'absorption.
- **Pertes dues au facteur de tension :** La tension de sortie est nécessairement inférieure au potentiel correspondant au gap ($V_{oc} < E_g/q$), en raison de l'entropie générée lors de la conversion photon-électron.
- **Pertes dues au facteur de remplissage :** La caractéristique I-V d'une diode impose une forme arrondie à la courbe, limitant le facteur de forme à environ 0,89 pour une cellule idéale.

Ces limitations fondamentales signifient qu'environ les deux tiers de l'énergie solaire incidente sont inévitablement perdus dans une cellule à simple jonction, quelle que soit la perfection de sa fabrication.

3.1.2 Compromis fondamentaux liés au gap énergétique

Le choix du gap énergétique du semi-conducteur représente un compromis fondamental influençant directement les performances de la cellule. Un gap élevé permet d'obtenir une tension élevée mais limite l'absorption aux seuls photons de haute énergie, réduisant le courant généré. Par contre, un gap faible maximise le courant en absorbant une plus grande partie du spectre, mais limite la tension de sortie.

Cette relation inverse entre tension et courant explique l'existence d'un gap optimal autour de 1,34 eV pour le spectre solaire terrestre. Le silicium (1,12 eV) se situe légèrement en dessous de cet optimum, ce qui explique que d'autres matériaux comme le GaAs (1,42 eV) puissent théoriquement atteindre des rendements supérieurs.

La figure 1.10 dite de mérite "gap énergétique - rendement théorique" présente une courbe en cloche. Pour $E_g < 0,9$ eV, le rendement est limité par la faible tension [20]. Pour $1,0 < E_g < 1,6$ eV, le plateau optimal est atteint. Pour $E_g > 1,8$ eV, le rendement est limité par le faible courant.

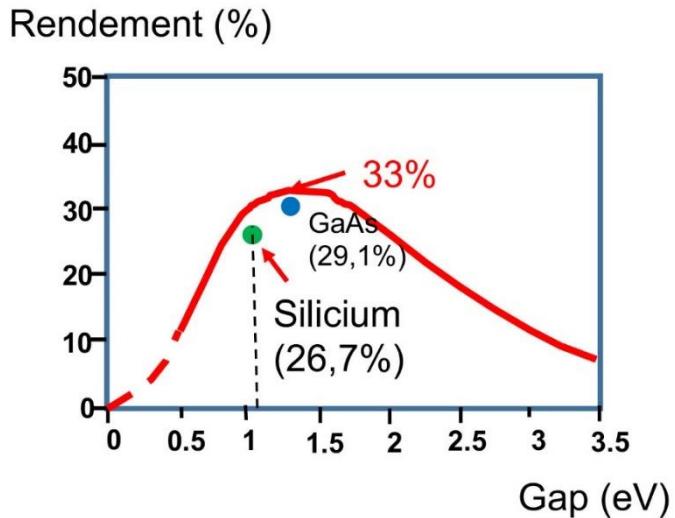


Figure 1.10 : Variation du Rendement théorique maximum en fonction du gap pour une jonction photovoltaïque unique [20].

3.2 Pertes technologiques et pratiques

Au-delà des limitations physiques fondamentales, les cellules photovoltaïques réelles souffrent de pertes supplémentaires liées aux imperfections matérielles et aux contraintes technologiques [13]. Ces pertes expliquent l'écart entre la limite théorique de 29-33% et les rendements pratiques de 18-25%.

3.2.1 Pertes optiques

Le rayonnement solaire subit plusieurs pertes avant même d'être converti en électricité :

- **Réflexion en surface** : Même avec des traitements anti-reflet optimisés et une texturation, environ 2-3% de la lumière incidente est réfléchie. Sans ces traitements, les pertes par réflexion atteindraient 30-40% pour une interface air-silicium.
- **Ombrage par la métallisation** : Les contacts métalliques en face avant, nécessaires à la collecte du courant, masquent typiquement 5-8% de la surface active. Les designs avancés (contacts enterrés, métallisation par électrodéposition, contacts arrière) visent à réduire cette perte.
- **Absorption parasite** : Une partie de la lumière est absorbée dans des couches non actives (encapsulant, verre, émetteur fortement dopé) sans générer de porteurs collectables. Ces pertes sont particulièrement significatives dans l'UV et le bleu.
- **Absorption incomplète** : Dans les cellules minces (pour économiser le matériau), les photons de grande longueur d'onde peuvent traverser la cellule sans être absorbés. Des

techniques de piégeage optique (light trapping) comme la texturation et les réflecteurs arrière tentent de minimiser cet effet.

L'optimisation optique reste un domaine de recherche actif, avec des approches comme les structures photoniques, les nanoparticules plasmoniques ou les revêtements sélectifs qui visent à maximiser l'absorption dans la couche active tout en minimisant les pertes parasites.

3.2.2 Pertes par recombinaison

Dans une cellule réelle, de nombreux porteurs photogénérés se recombinent avant d'atteindre les contacts, réduisant le courant disponible. Plusieurs mécanismes de recombinaison coexistent au même temps :

- **Recombinaison radiative** : Processus inverse de l'absorption photonique, avec émission d'un photon. C'est le seul mécanisme inévitable, dominant dans les matériaux à gap direct comme GaAs, mais relativement mineur dans le silicium.
- **Recombinaison Auger** : Processus à trois particules où l'énergie de recombinaison est transférée à un autre porteur. Ce mécanisme devient dominant dans le silicium fortement dopé (émetteur) et limite significativement la tension en circuit ouvert des cellules conventionnelles.
- **Recombinaison SRH (Shockley-Read-Hall)** : Recombinaison assistée par des défauts cristallins ou des impuretés agissant comme centres de recombinaison. Ce mécanisme domine dans le volume du silicium multicristallin ou dans les zones de jonction défectueuses.
- **Recombinaison de surface** : Cas particulier de recombinaison SRH aux interfaces, où les liaisons pendantes créent de nombreux états énergétiques dans la bande interdite. La passivation des surfaces est donc cruciale.

La qualité du matériau est quantifiée par la durée de vie des porteurs minoritaires (temps moyen avant recombinaison) ou par leur longueur de diffusion (distance moyenne parcourue). Pour les cellules hautes performances, des durées de vie supérieures à 1 milliseconde sont nécessaires [21].

3.2.3 Pertes résistives

Le transport ainsi que la collecte des charges générées introduisent des pertes résistives significatives :

- **Résistance série (R_s)** : Somme des résistances des contacts métalliques, de l'émetteur, du substrat et des interfaces. Elle réduit principalement le facteur de forme. Pour minimiser ces pertes, un compromis doit être trouvé entre densité de métallisation (réduisant R_s mais augmentant l'ombrage) et dopage de l'émetteur (réduisant R_s mais augmentant les recombinaisons Auger).
- **Résistance parallèle (R_{sh})** : Représente les fuites de courant à travers la jonction ou sur les bords de la cellule. Une faible R_{sh} affecte principalement les performances à faible éclairement. L'isolation des bords et l'élimination des courts-circuits localisés sont essentielles pour maximiser cette résistance.

Le dimensionnement optimal de la grille de métallisation avant représente un défi d'optimisation complexe, résultant généralement d'un compromis entre pertes résistives et pertes par ombrage.

4. Conclusion du chapitre

Ce premier chapitre a permis d'établir les bases essentielles à la compréhension des cellules solaires, en exposant leur principe de fonctionnement, leur structure, ainsi que les mécanismes physiques sous-jacents à la conversion photovoltaïque. Nous avons examiné les matériaux impliqués, les paramètres influençant le rendement, et les limites inhérentes aux cellules à simple jonction, notamment celles imposées par la théorie de Shockley-Queisser. Ces limitations ouvrent la voie à de nouvelles approches technologiques, présentées dans les chapitres suivants, visant à améliorer les performances des dispositifs photovoltaïques.

Chapitre 2

Cellules solaires tandem

1. Introduction

L'industrie photovoltaïque traverse une période de transformation majeure grâce à l'émergence de technologies innovantes qui surmontent les limitations des panneaux solaires en silicium conventionnels. Cette révolution s'articule autour de plusieurs approches complémentaires, notamment les cellules multi-jonctions [22], les systèmes tandem pérovskite-silicium [23], les cellules à porteurs chauds [24] et les technologies exploitant les points quantiques ou les bandes intermédiaires [25].

L'ensemble de ces innovations partage un objectif commun : dépasser la limite théorique de Shockley-Queisser en optimisant la capture de l'ensemble du spectre solaire tout en minimisant les pertes énergétiques. Les cellules organiques flexibles [26] et les systèmes à concentration solaire [27] complètent cet écosystème technologique, offrant des solutions adaptées à une large gamme d'applications, depuis les installations légères et flexibles jusqu'aux centrales haute performance destinées aux régions fortement ensoleillées.

Ce chapitre explore les cellules solaires tandem, une technologie photovoltaïque avancée qui améliore significativement l'efficacité de conversion énergétique. Nous examinerons d'abord leur principe de fonctionnement et leurs avantages par rapport aux cellules conventionnelles, puis nous analyserons les différents types selon le nombre de jonctions et les méthodes d'interconnexion. L'étude portera également sur les matériaux semi-conducteurs utilisés et leur impact sur les performances, incluant les couches fonctionnelles et matériaux d'interface. Enfin, nous identifierons les défis technologiques actuels et les perspectives de recherche qui orienteront le développement futur de cette technologie prometteuse.

2. Principe de fonctionnement

Les cellules solaires tandem sont des dispositifs photovoltaïques constitués de plusieurs cellules solaires empilées verticalement, chacune optimisée pour absorber une portion spécifique du spectre solaire [28]. Contrairement aux cellules conventionnelles à jonction unique qui ne

peuvent exploiter qu'une partie limitée de la lumière solaire, les cellules tandem superposent différents matériaux semi-conducteurs avec des bandes d'énergie complémentaires. Cette architecture permet de capturer plus efficacement l'ensemble du spectre lumineux, depuis les longueurs d'onde courtes (bleu-UV) jusqu'aux longueurs d'onde longues (rouge-infrarouge), réduisant ainsi les pertes énergétiques et augmentant considérablement le rendement de conversion photovoltaïque.

Dans une architecture tandem, les sous-cellules sont empilées de manière stratégique pour optimiser l'absorption lumineuse. La lumière traverse d'abord la cellule ayant la bande interdite la plus élevée, puis continue son parcours vers les cellules avec des bandes interdites progressivement plus faibles. Cette configuration ingénieuse permet de réduire considérablement les deux sources principales de pertes énergétiques identifiées dans les cellules photovoltaïques conventionnelles. D'une part, elle minimise les pertes thermiques en permettant à chaque sous-cellule d'absorber uniquement les photons dont l'énergie correspond approximativement à sa bande interdite, limitant ainsi la thermalisation qui convertit l'excès d'énergie des photons en chaleur. D'autre part, cette approche élargit significativement le spectre absorbé grâce à l'utilisation de matériaux avec différentes bandes interdites, permettant de capturer une portion beaucoup plus importante du spectre solaire, depuis les rayons ultraviolets jusqu'aux infrarouges.

3. Avantages principaux

Les cellules solaires tandem présentent plusieurs avantages significatifs par rapport aux cellules à simple jonction :

- **Rendements théoriques supérieurs** : Le rendement théorique maximal augmente avec le nombre de jonctions. Une cellule à double jonction peut atteindre environ 42%, une triple jonction peut dépasser 49%, et une cellule avec un nombre infini de jonctions pourrait théoriquement atteindre 86,8% dans des conditions de concentration solaire [29].
- **Meilleure utilisation du spectre solaire** : En divisant le spectre entre différentes sous-cellules, les cellules tandem peuvent convertir efficacement une plus grande partie du rayonnement solaire incident.

- **Performance améliorée dans diverses conditions d'éclairage** : Les cellules tandem maintiennent généralement une meilleure efficacité sous faible luminosité ou dans des conditions de lumière diffuse par rapport aux cellules à simple jonction.
- **Potentiel de réduction de la surface requise** : Grâce à leur rendement supérieur, les cellules tandem permettent de produire la même quantité d'énergie sur une surface plus petite, ce qui peut être particulièrement avantageux dans les contextes où l'espace est limité.
- **Stabilité accrue à haute température** : Certaines architectures tandem présentent une meilleure stabilité thermique que les cellules conventionnelles, ce qui peut prolonger leur durée de vie et maintenir leur performance dans des conditions climatiques variées.

La combinaison de ces avantages fait des cellules tandem une technologie particulièrement prometteuse pour l'avenir du photovoltaïque, avec des applications diverses allant des installations terrestres aux applications spatiales où l'efficacité et la légèreté sont primordiales.

4. Types de cellules tandem

Les cellules solaires tandem se déclinent en plusieurs catégories selon le nombre de jonctions qu'elles incorporent et leur méthode de fabrication. Chaque configuration présente des caractéristiques spécifiques adaptées à différentes applications et contraintes technologiques.

4.1. Classification selon le nombre de jonctions

4.1.1. Cellules à double jonction

Les cellules tandem à deux jonctions [30] représentent la configuration la plus simple des dispositifs multi-jonctions. Elles comprennent une cellule supérieure (top cell) avec une bande interdite élevée, généralement entre 1,6 et 1,9 eV, et une cellule inférieure (bottom cell) avec une bande interdite plus faible, typiquement entre 0,9 et 1,2 eV.

Parmi les configurations tandem les plus répandues, la combinaison InGaP/GaAs occupe une position dominante dans les applications spatiales grâce à sa robustesse et ses performances éprouvées en environnement hostile [31]. La configuration émergente pérovskite/silicium suscite un intérêt croissant car elle combine les avantages des pérovskites, notamment leur coût potentiellement faible et leur facilité de fabrication, avec la maturité technologique bien établie du silicium. Enfin, la configuration GaInP/GaInAs se distingue par son efficacité particulièrement remarquable dans les applications à concentration solaire, où elle exploite

optimalement l'intensité lumineuse concentrée pour maximiser les rendements de conversion [32].

Les cellules à double jonction ont atteint des rendements de laboratoire supérieurs à 32% sans concentration et peuvent dépasser 35% sous concentration solaire [33]. Elles représentent un bon compromis entre complexité de fabrication et gain de rendement par rapport aux cellules à simple jonction.

4.1.2. Cellules à triple jonction

Les cellules à triple jonction [34] représentent une évolution avancée des systèmes tandem en ajoutant une sous-cellule intermédiaire pour exploiter encore plus efficacement le spectre solaire. Cette architecture sophistiquée comprend généralement une cellule supérieure avec une bande interdite d'environ 1,8 à 2,0 eV, une cellule intermédiaire avec une bande interdite comprise entre 1,3 et 1,5 eV, et une cellule inférieure caractérisée par une bande interdite de 0,7 à 1,0 eV.

Parmi les configurations les plus remarquables, la combinaison GaInP/GaInAs/Ge domine le marché commercial avec des rendements impressionnantes oscillant entre 30% et 42% selon les conditions d'utilisation [33]. La configuration GaInP/GaAs/GaInNAs se distingue par son meilleur accord de maille entre les différentes couches, améliorant ainsi la qualité cristalline de l'ensemble. La structure GaInP/GaAs/InGaAs utilise des substrats métamorphiques pour optimiser l'absorption dans le domaine infrarouge, élargissant davantage la bande spectrale exploitée.

Ces cellules à triple jonction détiennent actuellement les records de rendement pour les dispositifs photovoltaïques commercialisés, avec des performances dépassant 40% sous concentration lumineuse [33]. Elles trouvent leurs applications privilégiées dans le secteur spatial, où leur efficacité exceptionnelle compense leur coût élevé, ainsi que dans les systèmes à concentration photovoltaïque terrestres où l'intensité lumineuse concentrée maximise leur potentiel de conversion énergétique.

4.1.3. Cellules à quadruple jonction et au-delà

Les cellules à quatre jonctions et plus représentent [35] aujourd'hui la frontière technologique la plus avancée dans le domaine des systèmes tandem. Ces dispositifs ultra-sophistiqués

poussent le concept de subdivision spectrale à son maximum en fragmentant encore plus finement le spectre solaire pour optimiser la conversion énergétique. Leur potentiel théorique est remarquable, avec des rendements pouvant dépasser 50% [33], mais cette performance exceptionnelle s'accompagne d'une complexité de fabrication significativement accrue et de coûts de production considérables qui ne peuvent être justifiés que dans des applications très spécifiques telles que le secteur spatial ou les applications militaires.

Les laboratoires de recherche ont réussi à démontrer la faisabilité de cellules à six jonctions atteignant des rendements supérieurs à 47% sous concentration lumineuse [33], illustrant le potentiel technique de ces architectures ultra-complexes. Cependant, l'analyse coût-bénéfice révèle que chaque jonction supplémentaire au-delà de quatre apporte un gain marginal décroissant en termes de performance, tout en augmentant considérablement la complexité technique et les défis de fabrication. Cette réalité économique et technique explique pourquoi les cellules à triple jonction demeurent actuellement le compromis optimal entre performance et viabilité commerciale pour la plupart des applications.

4.2. Classification selon la méthode d'interconnexion

Les cellules tandem peuvent être classées selon trois principales méthodes d'interconnexion qui déterminent leur architecture structurelle et leurs performances opérationnelles.

4.2.1. Configuration monolithique à deux terminaux

La configuration tandem monolithique à deux terminaux constitue l'approche la plus directe avec une structure verticale comprenant un contact supérieur en oxyde conducteur transparent (ITO ou FTO), une sous-cellule supérieure à bandgap élevé (1,6-2,0 eV) avec ses couches fenêtre, absorbantes de type n et p, jonction p-n et couche BSF, une jonction tunnel fortement dopée p++/n++ assurant le passage du courant, puis une sous-cellule inférieure à bandgap plus faible (0,9-1,4 eV) de structure similaire avec couches fenêtre, absorbantes et BSF et terminé par un contact arrière métallique réfléchissant, en principe le tout reposant sur substrat. Dans cette configuration série, le courant traverse successivement toutes les sous-cellules, nécessitant un accord parfait des courants générés, les photons de haute énergie étant absorbés par la cellule supérieure tandis que ceux de plus basse énergie traversent cette première cellule pour être captés par la cellule inférieure.

4.2.2. Configuration à quatre terminaux

La configuration parallèle ou à quatre terminaux adopte une architecture complexe comprenant successivement un premier contact supérieur transparent, une sous-cellule supérieure complète à bandgap élevé, un premier contact inférieur collectant les porteurs de cette sous-cellule, une couche intermédiaire transparente assurant l'isolation électrique, un second contact supérieur transparent, une sous-cellule inférieure complète à bandgap plus faible, et enfin un second contact inférieur collectant les porteurs de la sous-cellule inférieure et le tout sur un substrat support. Cette structure permet à chaque sous-cellule de fonctionner comme un générateur indépendant, connecté à l'extérieur par un circuit électronique capable d'optimiser individuellement la puissance extraite de chaque élément, offrant une flexibilité maximale mais au prix d'une complexité accrue du système électrique.

4.2.3. Configuration hybride

Les configurations hybrides à trois terminaux combinent les deux approches avec une structure comprenant un contact supérieur transparent, une première sous-cellule à haut bandgap, une jonction tunnel connectant en série cette première sous-cellule à une seconde sous-cellule à bandgap moyen, un contact intermédiaire permettant d'extraire ou d'injecter du courant, une troisième sous-cellule à bas bandgap connectée en parallèle, un substrat support, et un contact inférieur métallique. Cette architecture permet une gestion différenciée où deux sous-cellules partagent un courant série tandis que la troisième fonctionne indépendamment, équilibrant simplicité de fabrication et flexibilité opérationnelle.

Il est important de noter que ces trois configurations fondamentales peuvent être généralisées et étendues pour accommoder un nombre n quelconque de sous-cellules. Dans le cas des configurations monolithiques, des jonctions tunnel supplémentaires permettent de connecter en série autant de sous-cellules que nécessaire, chacune optimisée pour une bande spectrale spécifique. Les configurations à terminaux multiples peuvent également être étendues avec $2n$ terminaux pour n sous-cellules indépendantes, tandis que les approches hybrides offrent une flexibilité encore plus grande en permettant diverses combinaisons de connexions série et parallèle selon les besoins spécifiques de l'application.

Le choix entre ces configurations dépend des applications visées, des contraintes économiques et des technologies disponibles, les cellules à triple jonction dominant les applications spatiales tandis que les systèmes pérovskite/silicium à double jonction sont privilégiés pour l'adoption terrestre massive.

La Figure 2.1 présente les schémas de principe de la structure des cellules solaires tandem, en considérant trois configurations : série (à deux terminaux), parallèle (à quatre terminaux) et hybride (à deux terminaux).

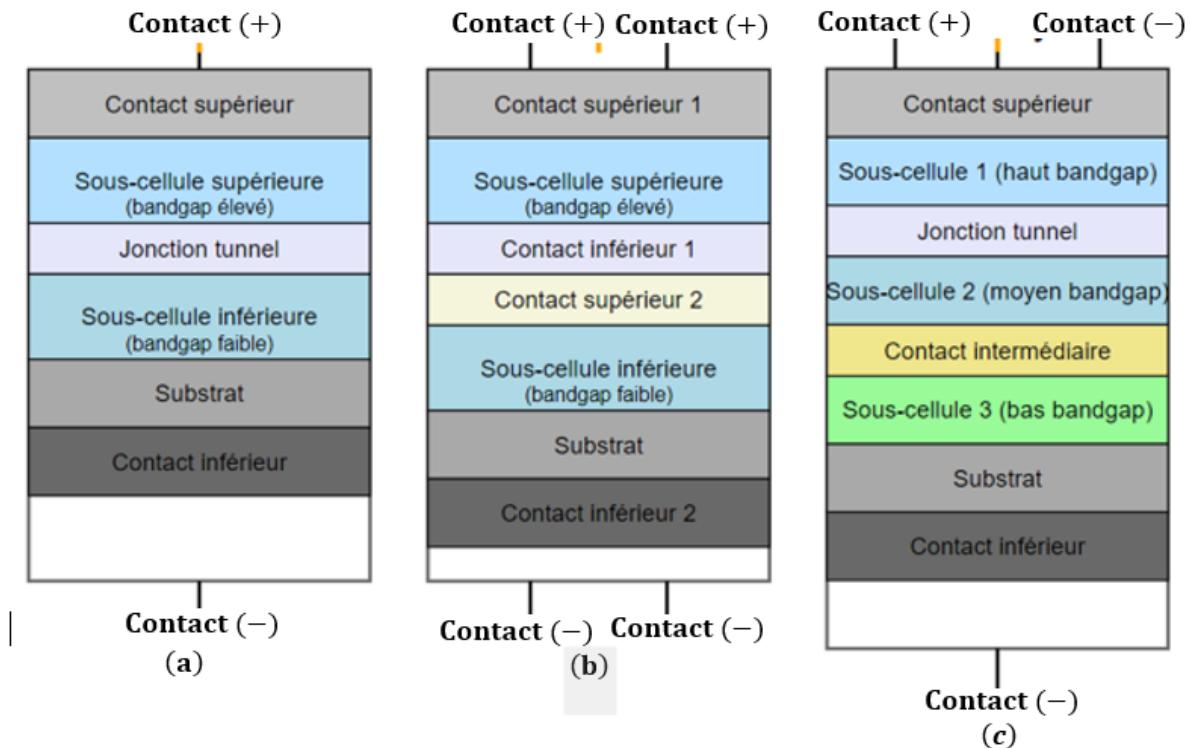


Figure 2.1 : Structure des cellules solaires tandem : (a) structure en série (02 terminaux), (b) structure en parallèle (04 terminaux), (c) structure hybride (03 terminaux)

5. Matériaux utilisés et leur impact sur les performances

Le choix des matériaux constitue l'élément central dans la conception des cellules solaires tandem, déterminant directement leurs performances, leur coût et leur durabilité. Une sélection judicieuse des matériaux pour chaque sous-cellule permet d'optimiser l'absorption du spectre solaire et maximiser le rendement global du dispositif.

5.1. Matériaux semi-conducteurs III-V

Les composés semi-conducteurs III-V [36], incluant principalement l'InGaP (1,8-1,9 eV), le GaAs (1,42 eV), le germanium (0,67 eV) et l'InGaAs, constituent la technologie de référence pour les cellules photovoltaïques tandem haute performance. Ces matériaux offrent des propriétés optoélectroniques exceptionnelles avec des rendements quantiques internes proches de 100% [33], permettant une conversion quasi-parfaite des photons en électricité. Leur principal atout réside dans la possibilité d'ajuster précisément les bandes interdites par

modification chimique, optimisant ainsi la capture spectrale de chaque sous-cellule, tout en présentant une excellente stabilité thermique et une résistance aux radiations idéale pour les applications spatiales.

Malgré leurs performances remarquables qui leur permettent de détenir les records mondiaux de rendement photovoltaïque (plus de 47% sous concentration [33]), ces matériaux souffrent de limitations majeures qui limitent leur déploiement à grande échelle. Les coûts de production prohibitifs liés aux processus de croissance épitaxiale complexes, l'utilisation de matériaux rares comme l'indium et de composés toxiques comme l'arsenic, ainsi que les procédés de fabrication énergivores constituent les principaux obstacles économiques et environnementaux. Ces contraintes expliquent pourquoi, bien que technologiquement supérieurs, les matériaux III-V restent principalement cantonnés aux applications spatiales et de niche où le rapport performance/coût justifie leur utilisation.

5.2. Silicium et combinaisons avec d'autres matériaux

Le silicium, pilier historique du photovoltaïque, connaît un renouveau technologique grâce à son intégration dans des architectures tandem qui exploitent sa maturité industrielle tout en surmontant ses limitations de rendement [37]. Les configurations les plus prometteuses incluent l'association pérovskite/silicium (pérovskite 1,6-1,8 eV / silicium 1,1 eV), l'approche hybride III-V/silicium alliant performance et rentabilité, et les tandems "tout-silicium" utilisant du silicium amorphe hydrogéné sur silicium cristallin. Ces approches hybrides offrent des avantages économiques majeurs en réduisant drastiquement les coûts par rapport aux tandems III-V purs, tout en capitalisant sur l'infrastructure industrielle existante et l'expertise manufacturière accumulée sur des décennies.

Malgré leur potentiel à démocratiser les modules photovoltaïques dépassant 30% de rendement [33], ces technologies hybrides font face à des défis techniques considérables. Les difficultés d'interconnexion entre matériaux de natures physico-chimiques différentes nécessitent le développement de couches d'interface spécialisées et de procédés adaptés. La stabilité à long terme des interfaces entre matériaux dissimilaires constitue un enjeu critique pour la viabilité commerciale, particulièrement sous contraintes environnementales variables. L'optimisation des procédés de fabrication pour assurer leur compatibilité avec la production de masse tout en préservant les performances représente le défi industriel clé qui déterminera le succès commercial de ces innovations technologiques.

5.3. Pérovskites et matériaux émergents

Les pérovskites halogénées constituent la révolution technologique majeure de la dernière décennie en photovoltaïque, transformant les perspectives des cellules tandem grâce à leurs propriétés exceptionnelles [38]. Ces matériaux cristallins offrent une bande interdite ajustable de 1,2 à 2,3 eV par simple modification chimique, permettant une optimisation spectrale précise. Ces matériaux présentent des propriétés optoélectroniques exceptionnelles : un coefficient d'absorption supérieur à 10^5 cm^{-1} , des longueurs de diffusion des porteurs dépassant le micromètre, et une mobilité des porteurs de charge de 10-100 $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$. La facilité de traitement en solution permet le dépôt par spin-coating, blade-coating, ou impression jet d'encre à des températures inférieures à 150°C. Leur avantage manufacturier décisif réside dans les procédés de fabrication à basse température et potentiellement bas coût, incluant impression et dépôt en solution, contrastant favorablement avec les méthodes épitaxiales coûteuses des III-V.

L'impact de ces matériaux sur les performances est spectaculaire, avec des tandems pérovskite/silicium atteignant plus de 29% de rendement certifié en quelques années [33], et des architectures "tout-pérovskite" dépassant 27% d'efficacité [33]. La flexibilité compositionnelle remarquable des pérovskites ouvre des perspectives enthousiasmantes en permettant d'envisager des cellules à trois ou quatre jonctions à coût modéré, démocratisant l'accès aux technologies ultra-performantes longtemps réservées aux matériaux III-V onéreux. Cette évolution rapide valide le potentiel de commercialisation massive de ces technologies innovantes et leur capacité à transformer durablement le paysage photovoltaïque mondial.

6. Couches fonctionnelles et matériaux d'interface

Les performances des cellules tandem dépendent de manière critique des matériaux des couches fonctionnelles auxiliaires [39], souvent déterminants pour le succès d'une architecture. Ces couches comprennent les couches de recombinaison spécifiques aux tandems monolithiques (ITO, AZO ou hétérojonctions tunnel), les couches de transport de charges utilisant soit des matériaux organiques (Spiro-OMeTAD, PTAA, PCBM) pour leur facilité de mise en œuvre soit des inorganiques (TiO_2 , SnO_2 , NiO_x) pour leur stabilité, et les électrodes transparentes évoluant de l'ITO/FTO traditionnel vers des solutions innovantes comme les nanofils d'argent ou le graphène. L'impact de ces matériaux d'interface est multifacetté : la transparence optique

conditionne la lumière atteignant la cellule inférieure, la résistance série affecte le facteur de forme, et la sélectivité des contacts influence la tension en circuit ouvert de chaque sous-cellule.

Le choix et l'optimisation de ces matériaux d'interface représentent fréquemment la clé technologique permettant de transformer des concepts prometteurs en dispositifs réellement performants, nécessitant une ingénierie sophistiquée pour minimiser simultanément les pertes optiques et électriques. L'évolution des performances des cellules tandem reste intimement liée aux progrès en science des matériaux et ingénierie des interfaces.

7. Défis technologiques et limitations actuelles

Malgré leur potentiel remarquable, les cellules solaires tandem font face à plusieurs défis technologiques majeurs qui freinent actuellement leur adoption généralisée [40]. Ces obstacles concernent tant la fabrication que la performance à long terme et les aspects économiques.

7.1. Défis de fabrication et d'intégration

La complexité des structures multi-jonctions génère trois défis de fabrication majeurs impactant rendements et coûts. L'accord de maille cristalline, crucial pour les tandems monolithiques, nécessite des solutions comme couches tampons graduées, substrats virtuels ou collage direct pour limiter contraintes et dislocations. L'interconnexion électrique via jonctions tunnel doit combiner très faible résistance, excellente transparence et stabilité thermochimique, particulièrement complexe pour les matériaux hybrides. Les contraintes de procédés imposent une fabrication séquentielle préservant les couches inférieures, exigeant compatibilité thermique et maîtrise de l'alignement industriel.

7.2. Limitations de performance

Malgré des rendements théoriques très élevés, les cellules tandem font face à plusieurs limitations pratiques. Les limitations optiques incluent pertes par réflexion et absorption parasites aux interfaces, absorption incomplète due à l'optimisation complexe des épaisseurs, et transparence imparfaite des couches intermédiaires. Les limitations électriques résultent du courant limité par la sous-cellule la moins performante, des recombinaisons interfaciales réduisant le rendement, et de la résistance série accrue par la superposition des couches. La dégradation en conditions réelles provient de la forte sensibilité au spectre lumineux selon les conditions climatiques et des effets thermiques liés aux différences de coefficients thermiques générant des contraintes mécaniques entre sous-cellules.

7.3. Défis de stabilité et fiabilité

La durabilité à long terme constitue un obstacle majeur pour les technologies tandem, particulièrement celles intégrant des matériaux émergents. La stabilité intrinsèque des matériaux pose des défis critiques avec les pérovskites halogénées instables face à l'humidité, chaleur et UV, certains organiques se dégradant sous illumination prolongée, et la diffusion d'éléments entre couches altérant les propriétés électroniques temporellement. La stabilité mécanique est compromise par les différences de coefficients de dilatation thermique induisant contraintes lors des cycles thermiques, provoquant délaminations ou microfissures. Les mécanismes de vieillissement spécifiques incluent migrations ioniques dans les pérovskites, dégradation des interfaces sous champ électrique, et photodégradation des matériaux organiques, constituant ensemble un défi majeur pour la viabilité commerciale à long terme de ces technologies avancées.

7.4. Obstacles économiques et industriels

Malgré leurs performances supérieures, les cellules tandem font face à des obstacles économiques majeurs pour concurrencer les technologies établies. Les coûts de fabrication élevés résultent des procédés de croissance épitaxiale très coûteux pour les III-V, de la complexité accrue multipliant les étapes de fabrication, et des rendements de production plus faibles. L'analyse économique révèle que le surcoût des tandems doit être compensé par une production énergétique supérieure sur la durée de vie, mais le rapport coût/watt reste défavorable pour de nombreuses applications terrestres, l'impact du rendement élevé étant dilué dans le coût système complet. Les défis d'industrialisation nécessitent le passage à l'échelle des procédés laboratoire, le développement d'équipements spécifiques pour la production de masse, et l'intégration difficile dans les chaînes de production existantes, constituant ensemble un verrou économique et industriel considérable.

8. Perspectives et voies de recherche actuelles

Face aux défis identifiés, plusieurs pistes prometteuses sont explorées pour surmonter les obstacles technologiques et économiques [41]. Les approches alternatives d'interconnexion incluent les tandems à 4 terminaux évitant les contraintes d'accord de courant et les architectures "spectrum splitting" utilisant filtres optiques plutôt qu'empilement direct. L'innovation matériaux se concentre sur les pérovskites à stabilité améliorée (compositions mixtes,

encapsulation, additifs), les couches de transport et électrodes transparentes haute mobilité/faible absorption, et les jonctions tunnel innovantes à base d'oxydes ou matériaux bidimensionnels. Les innovations de procédés visent le dépôt basse température, les méthodes d'impression et roll-to-roll pour réduction des coûts, et les techniques de recyclage des matériaux rares ou toxiques.

Malgré ces défis, les progrès récents des cellules tandem pérovskite/silicium et tout-pérovskite suggèrent une commercialisation progressive prochaine. Les premières applications commerciales cibleront probablement des niches (spatial, CPV, applications portables, BIPV) avant une généralisation conditionnée à la résolution des obstacles coût/stabilité. Le développement de cellules tandem commercialement viables constitue une voie particulièrement prometteuse pour dépasser les rendements actuels et accélérer la transition énergétique mondiale.

9. Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons exploré les cellules solaires tandem, une technologie photovoltaïque avancée qui transcende les limites théoriques des cellules à jonction unique en exploitant synergiquement plusieurs matériaux aux bandes interdites complémentaires. L'analyse des différentes configurations (2T, 3T, 4T) et des combinaisons matériaux (III-V, silicium, pérovskites) révèle une flexibilité remarquable pour optimiser l'utilisation du spectre solaire, tandis que l'étude des couches fonctionnelles et matériaux d'interface démontre leur rôle déterminant pour débloquer les performances théoriques de ces architectures complexes. Bien que des défis subsistent concernant la stabilité, les coûts de fabrication et l'industrialisation, les progrès fulgurants récents et les perspectives de recherche prometteuses positionnent ces technologies comme la voie privilégiée vers le photovoltaïque ultra-performant, constituant un catalyseur essentiel pour l'accélération de la transition énergétique mondiale.

Chapitre 3

Modélisation mathématique des cellules solaires tandem

1. Introduction

Ce chapitre présente une approche systématique de la modélisation électrique des cellules solaires tandem à travers les circuits électriques équivalents, en partant des fondements du modèle à une diode pour progresser vers la complexité des structures multi-jonctions. Nous débuterons par un rappel du modèle à une diode, référence incontournable pour la représentation électrique des cellules photovoltaïques, avant d'examiner les différentes méthodes d'extraction des paramètres essentiels de ce modèle.

L'extension de cette modélisation électrique aux architectures tandem constitue le cœur de notre développement. En nous appuyant sur les principes physiques déjà établis dans les chapitres précédents, nous développerons les circuits équivalents pour les différentes configurations possibles : série, parallèle et hybride. Une attention particulière sera portée à la modélisation électrique des interfaces entre sous-cellules, élément critique pour la représentation du comportement global du dispositif.

2. Modèle à une diode pour cellules simples

Le modèle à une diode constitue la base fondamentale de la modélisation électrique des cellules photovoltaïques. Ce modèle a été largement développé et détaillé dans le chapitre 1 de ce mémoire, où nous avons établi les fondements théoriques du circuit équivalent d'une cellule solaire simple jonction.

Pour rappel, le circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque basé sur le modèle à une diode comprend une source de courant représentant le photocourant, une diode modélisant la jonction p-n, une résistance série traduisant les pertes ohmiques dans les contacts et le matériau semi-conducteur, et une résistance parallèle (ou shunt) représentant les courants de fuite.

Cette base théorique solide nous permet maintenant d'aborder les méthodes d'extraction de ces paramètres essentiels, étape préalable indispensable à l'extension du modèle vers les architectures tandem plus complexes.

3. Méthodes d'extraction des paramètres

Pour utiliser le modèle à une diode, il est nécessaire de déterminer les cinq paramètres (I_{ph}, I_0, n, R_S et R_{SH}) qui caractérisent la cellule solaire. Plusieurs méthodes peuvent être employées :

3.1. Méthode analytique

Cette approche utilise des points caractéristiques de la courbe I-V (comme I_{SC} , V_{OC} , I_{mp} , V_{mp}) pour établir un système d'équations permettant d'extraire les paramètres du modèle.

Par exemple, on peut utiliser les équations suivantes :

- Au courant de court-circuit :

$$I_{SC} = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{-R_S I_{SC}}{n V_T} \right) - 1 \right] - \frac{R_S I_{SC}}{R_{SH}} \quad (3.1)$$

- À la tension en circuit ouvert :

$$0 = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V_{OC}}{n V_T} \right) - 1 \right] - \frac{V_{OC}}{R_{SH}} \quad (3.2)$$

- Au point de puissance maximale :

$$I_{mp} = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V_{mp} - R_S I_{mp}}{n V_T} \right) - 1 \right] - \frac{V_{mp} + R_S I_{mp}}{R_{SH}} \quad (3.3)$$

- La condition de puissance maximale implique que :

$$\frac{d}{dV} (VI) = 0 \text{ au point } (V_{mp}, I_{mp}) \quad (3.4)$$

- La pente au voisinage de $V = 0$ donne une estimation de R_{SH} :

$$\left(\frac{dI}{dV} \right)_{V=0} \approx -\frac{1}{R_{SH}} \quad (3.5)$$

3.2. Méthodes numériques

Les méthodes numériques offrent une approche plus robuste pour l'extraction des paramètres, particulièrement lorsque les méthodes analytiques atteignent leurs limites. Ces techniques permettent de résoudre le système d'équations non linéaires du modèle à une diode en minimisant l'écart entre les données expérimentales et le modèle théorique.

La méthode de Newton-Raphson [42] est largement utilisée pour sa précision et sa vitesse de convergence élevée dans la résolution d'équations non linéaires caractéristiques des cellules photovoltaïques. Cette méthode itérative permet de déterminer les paramètres en résolvant le système d'équations dérivé du modèle électrique. L'algorithme de Levenberg-Marquardt [43] constitue une méthode particulièrement efficace pour les problèmes de moindres carrés non linéaires, combinant les avantages de l'algorithme de Gauss-Newton [44] et la méthode du gradient [45]. Cette approche est plus stable que la méthode de Gauss-Newton seule et trouve une solution même avec des conditions initiales éloignées du minimum optimal.

D'autres techniques numériques avancées peuvent également être employées, notamment les algorithmes génétiques [46], l'optimisation par essaim particulaire (PSO) [47], ou les méthodes de gradient conjugué [48]. Il existe plusieurs articles de revue qui analysent de manière exhaustive les différentes méthodes numériques pour l'extraction des paramètres des cellules photovoltaïques [49_51]. Le choix de la méthode dépend de la complexité du problème, de la disponibilité des données expérimentales et des exigences de précision. L'avantage principal des méthodes numériques réside dans leur capacité à traiter simultanément l'ensemble des points de mesure de la caractéristique I-V, permettant ainsi une extraction plus précise des paramètres et une meilleure représentation du comportement réel de la cellule solaire.

4. Extension du modèle pour les cellules tandem

4.1. Configuration en série des cellules tandem

Dans la configuration en série, qui est la plus courante, les sous-cellules sont connectées électriquement en série. Le circuit équivalent d'une cellule tandem à deux jonctions en série est illustré à la figure 3.1.

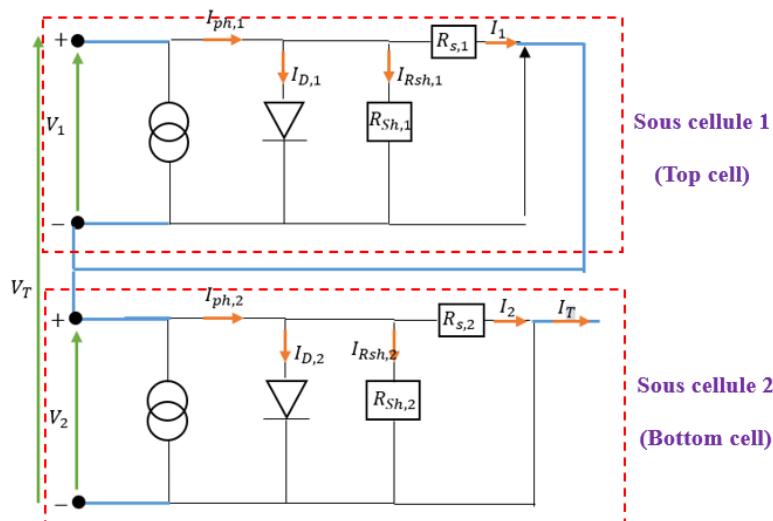


Figure 3.1 : Circuit équivalent d'une cellule tandem à deux jonctions en configuration série

Chaque sous-cellule est modélisée par une source de courant photogénéré ($I_{ph,1}$ et $I_{ph,2}$), une diode représentant la jonction P-N (avec les courants $I_{D,1}$ et $I_{D,2}$), une résistance série ($R_{S,1}$ et $R_{S,2}$) modélisant les pertes résistives des contacts et du matériau, et une résistance shunt ($R_{sh,1}$ et $R_{sh,2}$) représentant les courants de fuite parasites. La configuration série impose que le même courant I_T traverse les deux cellules, tandis que la tension totale de sortie correspond à la somme des tensions individuelles ($V_T = V_1 + V_2$).

Cette configuration est appelée "configuration série à deux terminaux" car elle ne présente que deux contacts électriques externes (+ et -), contrairement aux configurations à trois ou quatre terminaux où chaque sous-cellule possède ses propres contacts indépendants. La liaison série est réalisée par la connexion physique directe entre la cathode (borne négative) de la cellule supérieure et l'anode (borne positive) de la cellule inférieure, formant ainsi une jonction tunnel ou une couche de recombinaison intermédiaire qui permet le passage des porteurs de charge d'une cellule à l'autre. Cette interconnexion interne élimine le besoin de contacts métalliques intermédiaires, simplifiant la fabrication et réduisant les pertes résistives.

Cette configuration série peut être facilement généralisée à un nombre quelconque n de sous-cellules en empilant successivement des matériaux à gaps énergétiques décroissants. Le circuit équivalent devient alors une chaîne de n sous-circuits identiques connectés en série, où chaque sous-cellule i est caractérisée par ses propres paramètres ($I_{ph,i}$, $I_{D,i}$, $R_{S,i}$, $R_{sh,i}$). La tension totale s'exprime comme $V_T = \sum_{i=1}^n V_i$, permettant d'atteindre des tensions de circuit ouvert très élevées.

Pour cette configuration, la caractéristique I-V est donnée par le système d'équations suivant :

$$I = I_{ph,1} - I_{0,1} \left[\exp \left(\frac{V_1 - R_{S,1}I}{n_1 V_T} \right) - 1 \right] - \frac{V_1 + R_{S,1}I}{R_{sh,1}} \quad (3.6)$$

$$I = I_{ph,2} - I_{0,2} \left[\exp \left(\frac{V_2 - R_{S,2}I}{n_2 V_T} \right) - 1 \right] - \frac{V_2 + R_{S,2}I}{R_{sh,2}} \quad (3.7)$$

$$V = V_1 + V_2 \quad (3.8)$$

Où les indices 1 et 2 se réfèrent respectivement à la première et à la seconde sous-cellule.

Cette configuration présente une contrainte importante : le courant qui traverse l'ensemble du dispositif est limité par la sous-cellule générant le courant le plus faible. C'est ce qu'on appelle

la "limitation par le courant" (current matching). Pour optimiser l'efficacité d'une cellule tandem en série, il est donc crucial d'ajuster les propriétés de chaque sous-cellule pour qu'elles génèrent des courants similaires.

Si les sous-cellules ne sont pas correctement adaptées en courant, la caractéristique I-V peut présenter des "épaulements" ou des paliers, signes d'une réponse spectrale déséquilibrée.

4.2. Configuration en parallèle

Dans la configuration en parallèle, les sous-cellules sont connectées électriquement en parallèle. Le circuit équivalent est représenté à la figure 3.2.

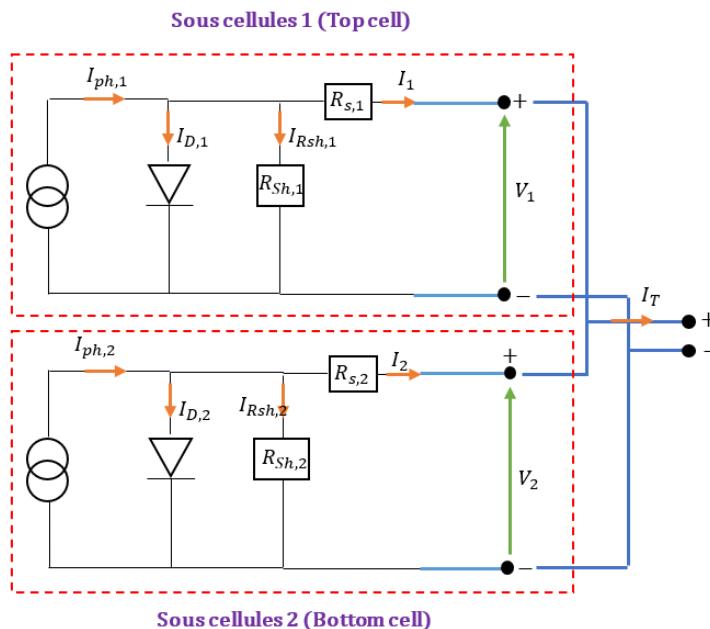


Figure 3.2 : Circuit équivalent d'une cellule tandem à deux jonctions en configuration parallèle

Comme pour la configuration en série, chaque sous-cellule est modélisée pour son circuit équivalent. La configuration parallèle impose que la même tension $V = V_1 = V_2$ traverse les deux cellules, tandis que le courant total de sortie correspond à la somme des courants individuels ($I_T = I_1 + I_2$). La configuration en parallèle présente l'avantage de ne pas être limitée par la sous-cellule générant le courant le plus faible. La tension totale est limitée par la cellule présentant la plus faible tension de circuit ouvert, d'où l'importance de l'appariement des tensions (voltage Matching) pour optimiser les performances du dispositif tandem, bien que cette contrainte soit généralement moins critique que l'appariement des courants en série.

Cette configuration est appelée "configuration parallèle à quatre terminaux" car elle nécessite quatre contacts électriques externes distincts, contrairement à la configuration série à deux terminaux. La liaison parallèle est réalisée par la connexion externe des terminaux positifs ensemble et des terminaux négatifs ensemble, permettant ainsi à chaque sous-cellule de fonctionner de manière indépendante tout en partageant la même tension de sortie. Cette interconnexion externe nécessite des contacts métalliques séparés pour chaque cellule, complexifiant la fabrication mais offrant une flexibilité opérationnelle considérable.

Cette configuration parallèle peut être théoriquement généralisée à un nombre quelconque n de sous-cellules en connectant en parallèle des matériaux à gaps énergétiques différents. Le circuit équivalent devient alors un ensemble de n sous-circuits identiques connectés en parallèle, où chaque sous-cellule i est caractérisée par ses propres paramètres $(I_{ph,i}, R_{S,i}, R_{sh,i}, I_{D,i})$. Le courant total s'exprime comme $I_T = \sum_{i=1}^n I_i$, permettant d'additionner les contributions de courant de chaque jonction.

Pour cette configuration, la caractéristique I-V est donnée par le système d'équations suivant :

$$I_1 = I_{ph,1} - I_{0,1} \left[\exp \left(\frac{V - R_{S,1} I_1}{n_1 V_T} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_{S,1} I_1}{R_{SH,1}} \quad (3.9)$$

$$I_2 = I_{ph,2} - I_{0,2} \left[\exp \left(\frac{V - R_{S,2} I_2}{n_2 V_T} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_{S,2} I_2}{R_{SH,2}} \quad (3.10)$$

$$I = I_1 + I_2 \quad (3.11)$$

4.3. Configuration hybride

Pour les cellules tandem comportant plus de deux jonctions, des configurations hybrides série-parallèle peuvent être utilisées. Par exemple, dans une cellule à quatre jonctions, deux paires de sous-cellules peuvent être connectées en série, puis ces deux paires connectées en parallèle entre elles. Ces configurations hybrides offrent plus de flexibilité dans l'adaptation des différentes sous-cellules et peuvent être modélisées en combinant les équations des configurations série et parallèle.

La figure 3.3 représente le schéma électrique équivalent d'une cellule solaire tandem hybride constituée de trois sous-cellules organisées selon une architecture série-parallèle particulière. Cette configuration innovante combine de manière astucieuse les avantages des connexions série et parallèle au sein d'un même dispositif photovoltaïque.

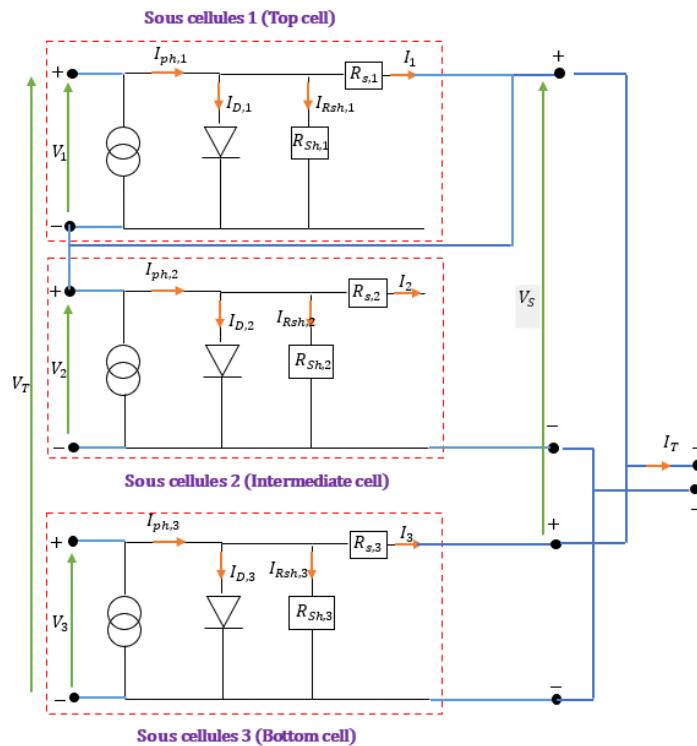


Figure 3.3 : Circuit équivalent d'une cellule tandem à deux jonctions en configuration hybride

L'architecture hybride se caractérise par une organisation en deux étages distincts. Les sous-cellules 1 et 2, situées dans la partie supérieure du dispositif, sont connectées en série entre elles. Cette connexion série impose que ces deux cellules partagent le même courant, créant ainsi une contrainte d'appariement des courants entre elles selon la relation $I_1 = I_2$. La tension aux bornes de cet ensemble série correspond à la somme des tensions individuelles, soit $V_s = V_1 + V_2$.

La sous-cellule 3, positionnée en tant que cellule inférieure, est connectée en parallèle avec l'ensemble série formé par les cellules 1 et 2. Cette connexion parallèle impose une contrainte de tension commune, où la tension aux bornes de la cellule 3 doit égaler la tension de sortie de l'ensemble série, soit $V_3 = V_s = V_1 + V_2$. Le courant total du dispositif correspond alors à la somme du courant traversant l'ensemble série et du courant généré par la cellule 3, selon l'expression $I_T = I_s + I_3$, où $I_s = I_1 = I_2$.

Cette configuration est qualifiée d'hybride précisément parce qu'elle combine deux modes de connexion différents au sein d'un même dispositif. Elle présente simultanément les caractéristiques d'une connexion série pour les cellules supérieures et d'une connexion parallèle pour la cellule inférieure. Cette dualité crée un système de contraintes mixtes où les cellules 1 et 2 doivent respecter un appariement de courants entre elles, tandis que la cellule 3 doit s'adapter à la contrainte de tension imposée par l'ensemble série supérieur.

La particularité de cette architecture réside dans sa configuration à trois terminaux, contrairement aux configurations purement série (deux terminaux) ou purement parallèle (quatre terminaux). Ces trois terminaux correspondent au terminal positif de la cellule 1, au terminal négatif de la cellule 3, et au terminal intermédiaire qui constitue le point de connexion entre l'ensemble série et la cellule parallèle. Cette configuration à trois terminaux résulte de l'interconnexion spécifique où le terminal négatif des cellules 1-2 en série est connecté au terminal négatif de la cellule 3, créant ainsi un nœud commun qui réduit le nombre de terminaux externes nécessaires.

4.4. Modélisation des interfaces entre sous-cellules

Dans les cellules tandem monolithiques, les interfaces entre sous-cellules jouent un rôle crucial. Ces interfaces peuvent être modélisées par des jonctions tunnel ou des couches de recombinaison.

4.4.1. Jonctions tunnel

Une jonction tunnel est une jonction P-N fortement dopée qui permet aux électrons de passer de la bande de conduction d'une sous-cellule à la bande de valence de la sous-cellule adjacente par effet tunnel quantique. Son comportement peut être modélisé par une résistance non linéaire avec la caractéristique courant-tension suivante :

$$J_{tunnel} = J_{peak} \frac{\left(\frac{V}{V_{peak}}\right)}{\sqrt{1 + \left(\frac{V}{V_{peak}}\right)^2}} \exp \left[1 - \frac{\left(\frac{V}{V_{peak}}\right)}{\sqrt{1 + \left(\frac{V}{V_{peak}}\right)^2}} \right] \quad (3.12)$$

Où J_{tunnel} est la densité de courant traversant la jonction tunnel, J_{peak} est la densité de courant maximale, V_{peak} est la tension correspondant au pic de courant et V est la tension appliquée à la jonction tunnel

Pour les simulations pratiques, on peut souvent simplifier ce modèle en utilisant une résistance série supplémentaire R_{tunnel} entre les sous-cellules, à condition que la jonction tunnel opère dans sa région linéaire.

4.4.2. Couches de recombinaison

Dans certaines technologies de cellules tandem, notamment celles à base de pérovskites, des couches de recombinaison sont utilisées au lieu des jonctions tunnel. Ces couches facilitent la recombinaison des électrons d'une sous-cellule avec les trous de l'autre sous-cellule.

Le comportement électrique d'une couche de recombinaison peut être modélisé par un terme de recombinaison supplémentaire dans les équations du modèle :

$$J_{rec} = q d R_{SRH} \quad (3.13)$$

Où J_{rec} est la densité de courant de recombinaison, q est la charge élémentaire, d est l'épaisseur de la couche de recombinaison et R_{SRH} est le taux de recombinaison Shockley-Read-Hall, donné par :

$$R_{SRH} = \frac{np - n_i^2}{\tau_p(n + n_1) + \tau_n(p + p_1)} \quad (3.14)$$

Avec n et p les concentrations d'électrons et de trous, n_i la concentration intrinsèque de porteurs, τ_n et τ_p les durées de vie des électrons et des trous.

Les quantités n_1 et p_1 sont des concentrations statistiques qui représentent les concentrations d'électrons et de trous lorsque le niveau de Fermi coïncide avec le niveau d'énergie du piège (E_t). Ces termes sont définis comme :

$$n_1 = n_i \exp\left(\frac{E_t - E}{k_B T}\right) \quad (3.15)$$

$$p_1 = n_i \exp\left(\frac{E_i - E_t}{k_B T}\right) \quad (3.16)$$

Où E_i est le niveau intrinsèque (proche du milieu de la bande interdite).

5. Conclusion du chapitre

Ce chapitre a permis de construire une modélisation électrique cohérente des cellules solaires tandem, en s'appuyant sur le modèle à une diode et en l'étendant aux configurations série, parallèle et hybride.

Chapitre 4

Simulations, analyse des performances et optimisation

1. Introduction

Les cellules tandem Pérovskite/Silicium représentent une voie technologique prometteuse pour dépasser les limites d'efficacité des cellules photovoltaïques conventionnelles, combinant les avantages spectraux complémentaires de ces deux matériaux semiconducteurs.

Ce chapitre développe une approche de simulation numérique systématique pour analyser et optimiser les performances des cellules tandem Pérovskite/Silicium. L'utilisation de Python comme plateforme de simulation permet de modéliser avec précision le comportement électrique des différentes configurations et d'explorer leurs potentiels d'optimisation. Trois architectures distinctes sont étudiées : la configuration série (2T) privilégiant l'efficacité par l'addition des tensions, la configuration parallèle (4T) optimisant les courants par connexion indépendante, et la configuration hybride (3T) exploitant une approche architecturale flexible combinant les avantages des deux précédentes.

La méthodologie proposée s'articule autour de la modélisation électrique spécifique à chaque configuration, suivie de simulations paramétriques générant automatiquement les courbes caractéristiques I-V et P-V. Cette approche permet l'extraction systématique des paramètres de performance clés et l'identification des stratégies d'optimisation les plus appropriées pour chaque architecture. L'analyse comparative qui en résulte vise à orienter les choix technologiques selon les exigences applicatives et à établir les bases pour le développement futur de cellules tandem haute performance.

2. Choix de Python pour la simulation de cellules solaires tandem

Python s'est imposé comme un outil de choix pour la simulation et la modélisation des cellules solaires tandem, en raison de son écosystème scientifique riche, de sa flexibilité, et de ses capacités d'intégration avec d'autres environnements de calcul. Son adoption croissante dans le domaine du photovoltaïque repose avant tout sur des bibliothèques puissantes et spécialisées telles que *pvlib*, *Solcore*, *NumPy*, *SciPy*, *Matplotlib* ou encore *Pandas*. Ces outils permettent de représenter précisément la structure des cellules, de résoudre les équations complexes de

transport de charges, de modéliser l'absorption optique dans les couches actives et de visualiser les résultats à l'aide de graphiques personnalisés. Ils constituent ainsi une base solide pour développer des modèles précis et modulaires des cellules tandem.

Un autre avantage majeur de Python est sa capacité à s'intégrer aisément à d'autres langages et logiciels, ce qui est particulièrement utile pour les simulations multi-physiques. Par exemple, l'intégration avec du code écrit en Fortran ou C++ permet d'exécuter des calculs intensifs de manière efficace, tandis que des connexions à des logiciels de simulation optique comme FDTD ou TMM élargissent les possibilités de modélisation. De plus, Python permet l'importation et l'exportation de données à partir d'autres environnements, et sa compatibilité avec des outils de calcul parallèle ou distribué facilite l'exécution de simulations à grande échelle.

Sur le plan du développement scientifique, Python est particulièrement adapté grâce à sa syntaxe claire et à sa nature interprétée, qui favorisent le prototypage rapide. Cela permet aux chercheurs d'explorer facilement de nouveaux modèles physiques, d'ajuster les paramètres, et de passer de manière fluide de l'expérimentation interactive à des simulations automatisées. Sa documentation intégrée et la large communauté de chercheurs et développeurs contribuent à un environnement de travail structuré, efficace et facilement partageable.

Contrairement à une idée reçue, Python offre également de bonnes performances grâce à des bibliothèques optimisées comme *NumPy*, à des compilateurs just-in-time comme *Numba*, et à la prise en charge du calcul parallèle (via *multiprocessing*, *Dask*, *joblib*) ou sur GPU (via *CuPy*, *TensorFlow*). Ces ressources sont essentielles dans la simulation de cellules tandem, qui implique souvent des calculs lourds combinant effets optiques, électriques et thermiques.

Enfin, Python occupe une position dominante dans le domaine de l'intelligence artificielle et de l'apprentissage automatique, ce qui ouvre de nouvelles perspectives pour la recherche en photovoltaïque. Il permet, par exemple, d'optimiser les performances des cellules via des techniques d'optimisation avancées (algorithmes génétiques, réseaux de neurones, optimisation bayésienne), de créer des modèles substituts pour réduire les temps de calcul, et d'analyser finement les sensibilités des différents paramètres. Il offre aussi des outils puissants pour explorer et visualiser des ensembles de données multidimensionnels complexes.

En matière de reproductibilité scientifique, Python propose des outils robustes tels que les environnements virtuels (conda, pip), les notebooks Jupyter pour documenter les simulations,

et les plateformes de versionnage comme Git. Cette capacité à documenter, reproduire et partager les simulations et analyses constitue un avantage décisif pour la collaboration et la validation des résultats dans la communauté scientifique. En somme, la richesse fonctionnelle, la performance, et l'ouverture de Python en font un langage de programmation incontournable pour la recherche avancée sur les cellules solaires tandem.

3. Choix de la Technologie Tandem Pérovskite/Silicium

Le choix de la technologie tandem pérovskite/silicium représente l'une des approches les plus prometteuses dans le domaine du photovoltaïque de nouvelle génération. Cette combinaison tire parti des avantages complémentaires de deux matériaux distincts : les pérovskites hybrides organiques-inorganiques et le silicium cristallin.

Les pérovskites photovoltaïques sont des matériaux cristallins de structure ABX_3 , où A représente généralement un cation organique (méthylammonium MA^+ , formamidinium FA^+) ou inorganique (césium Cs^+), B un cation métallique (plomb Pb^{2+} , étain Sn^{2+}), et X un halogénure (iode I^- , brome Br^- , chlore Cl^-). La composition la plus étudiée est le $MAPbI_3$, mais les formulations mixtes comme $FA_{0.85}MA_{0.15}PbI_{2.55}Br_{0.45}$ offrent une meilleure stabilité et des performances optimisées.

L'architecture tandem pérovskite/silicium peut être réalisée selon deux approches principales : monolithique (2-terminaux) ou mécanique (4-terminaux). Dans la configuration monolithique, les deux sous-cellules sont connectées en série via une jonction tunnel recombinante, nécessitant un appariement précis des courants (voir Figure 4.1(a)). Dans la configuration mécanique 4-terminaux, les deux sous-cellules sont connectées en parallèle et fonctionnent de manière indépendante, permettant une optimisation séparée de chaque cellule sans contrainte d'appariement de courant et offrant ainsi une plus grande flexibilité dans la conception et l'optimisation des performances (voir Figure 4.1(b)).

Dans la sous-cellule supérieure utilise une pérovskite à large gap énergétique de composition $FA_{0.8}Cs_{0.2}Pb(I_{0.6}Br_{0.4})_3$ avec un E_g d'environ 1,65 eV, permettant une absorption optimale dans la gamme 300-750 nm. Cette pérovskite est positionnée au-dessus pour absorber les photons de haute énergie. La sous-cellule inférieure constituée de silicium cristallin ($E_g = 1,12$ eV) capture efficacement les photons de plus faible énergie transmis par la pérovskite dans la gamme 750-1100 nm.

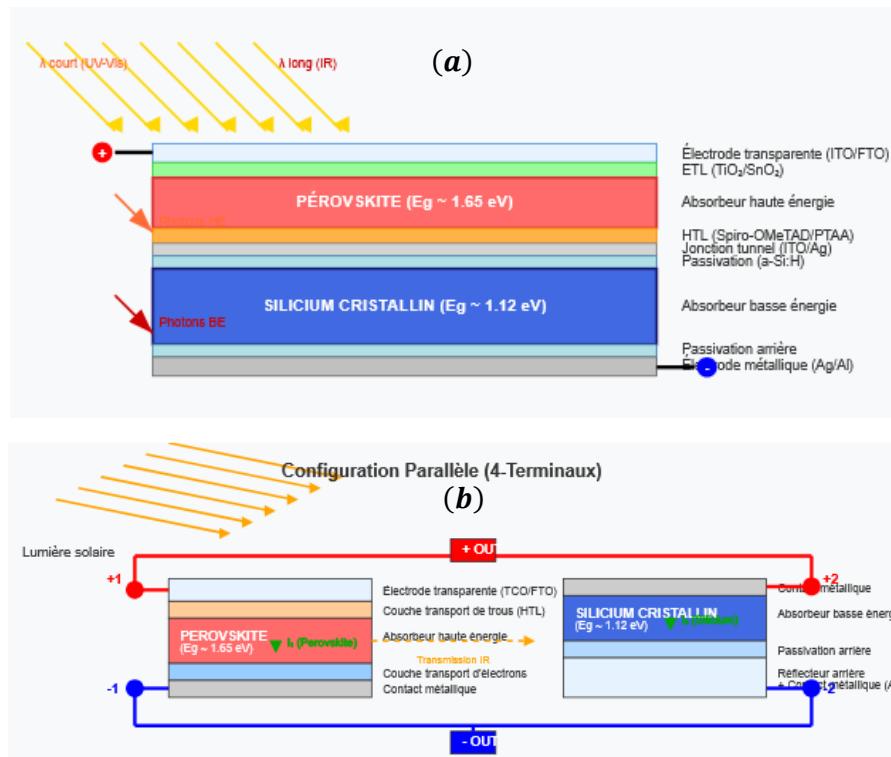


Figure 4.1 : Cellule solaire tandem pérovskite/silicium en configuration : (a) série (2 terminaux), (b) parallèle (04 terminaux)

Pour une approche plus avancée dans le domaine des cellules solaires multi-jonctions, nous avons proposé une structure tri-jonction à trois terminaux avec trois sous-cellules optimisées spectralement. Cette architecture innovante combine deux pérovskites à gaps énergétiques différents avec une cellule silicium pour maximiser l'utilisation du spectre solaire. La sous-cellule supérieure utilise une pérovskite à large gap énergétique de composition $FA_{0.8}Cs_{0.2}Pb(I_{0.6}Br_{0.4})_3$ avec un E_g d'environ 1,9 eV, permettant une absorption optimale dans la gamme 300-650 nm (gamme UV). La sous-cellule intermédiaire emploie une pérovskite à gap moyen $FA_{0.9}MA_{0.1}PbI_3$ avec un E_g de 1,5 eV, optimisée pour l'absorption dans la gamme 500-820 nm (visible). Enfin, la sous-cellule inférieure constituée de silicium cristallin capture efficacement les photons de plus faible énergie dans la gamme 700-1200 nm (rouge et IR). Cette configuration est illustrée sur la Figure 4.2.

La configuration à trois terminaux présente une architecture électrique sophistiquée où le terminal 1 correspond à la cathode commune connectée au contact arrière du silicium, le terminal 2 constitue la connexion intermédiaire située entre les deux pérovskites via une couche de recombinaison en ITO, et le terminal 3 représente l'anode supérieure au niveau du contact frontal de la pérovskite à large gap. Cette disposition permet le mode de fonctionnement suivant

: un mode série partiel où les sous-cellules pérovskites sont connectées en série puis mises en parallèle avec le silicium

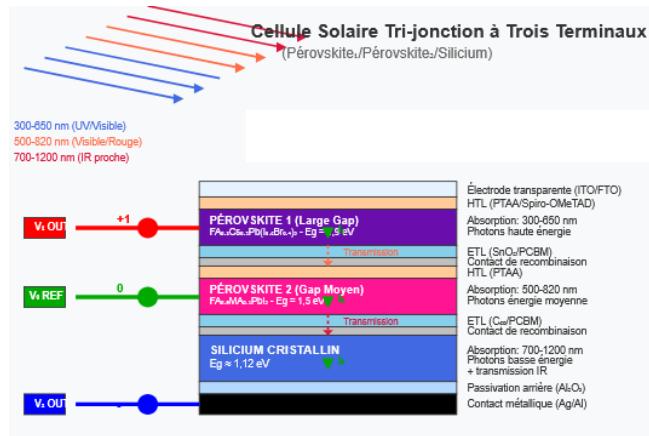


Figure 4.2 : Cellule solaire tandem pérovskite/silicium en configuration hybride (03 terminaux)

4. Procédure de Simulation Électrique pour Cellules Tandem Pérovskite/Silicium

Cette procédure de simulation se concentre exclusivement sur la modélisation électrique des cellules tandem pérovskite/silicium, en s'appuyant sur les schémas électriques équivalents et leurs équations caractéristiques. Cette approche permet d'analyser et de comparer les performances des trois configurations principales (série, parallèle et hybride 3T) dans des conditions fixes (25°C, spectre AM1.5G) tout en tenant compte des résistances série, parallèle et d'interconnexion.

Le modèle électrique adopte le formalisme classique des diodes à une exponentielle modifiée pour tenir compte des résistances série et parallèle de chaque sous-cellule, ainsi que des résistances d'interconnexion spécifiques aux jonctions tunnel. Ces résistances d'interconnexion, notées $R_{inter,i}$, représentent les pertes résistives au niveau des couches de recombinaison entre sous-cellules et constituent un paramètre critique pour l'évaluation comparative des différentes architectures.

Pour la configuration série, le courant traversant chaque sous-cellule s'exprime par :

$$I_{Pk} = I_{ph,Pk} - I_{0,Pk} \left[\exp \left(\frac{V_{Pk} - (R_{S,Pk} + R_{inter})I_{Pk}}{n_{Pk}V_T} \right) - 1 \right]$$

$$-\frac{V_{Pk} + (R_{S,Pk} + R_{inter})I_{Pk}}{R_{sh,Pk}} \quad (4.1)$$

$$I_{Si} = I_{ph, Si} - I_{0, Si} \left[\exp \left(\frac{V_{Si} - (R_{S, Si} + R_{inter})I_{Si}}{n_{Si}V_T} \right) - 1 \right] - \frac{V_{Si} + (R_{S, Si} + R_{inter})I_{Si}}{R_{sh, Si}} \quad (4.2)$$

Les Bilans globaux se présente comme suit :

Tension totale :

$$V_{tandem} = V_{Pk} + V_{Si} + R_{inter}I_{tandem} \quad (4.3)$$

Courant total :

$$I_{tandem} = I_{Pk} = I_{Si} \quad (4.4)$$

Puissance totale :

$$P_{tandem} = V_{tandem}I_{tandem} \quad (4.5)$$

où R_{inter} représente la résistance de la jonction tunnel de recombinaison entre les deux sous-cellules qui est unique dans ce cas. Les indices Pk et Si font références aux sous-cellules de pérovskite et silicium, respectivement.

Pour la configuration parallèle, Chaque cellule a ses propres contacts électriques indépendants et il n' y a pas de jonction tunnel physique entre les sous-cellules :

$$I_{Pk} = I_{ph,Pk} - I_{0,Pk} \left[\exp \left(\frac{V_{Pk} - R_{S,Pk}I_{Pk}}{n_{Pk}V_T} \right) - 1 \right] - \frac{V_{Pk} + R_{S,Pk}I_{Pk}}{R_{sh,Pk}} \quad (4.6)$$

$$I_{Si} = I_{ph, Si} - I_{0, Si} \left[\exp \left(\frac{V_{Si} - R_{S, Si}I_{Si}}{n_{Si}V_T} \right) - 1 \right] - \frac{V_{Si} + R_{S, Si}I_{Si}}{R_{sh, Si}} \quad (4.7)$$

Les Bilans globaux se présente comme suit :

Courant total :

$$I_{tandem} = I_{Pk} + I_{Si} \quad (4.8)$$

Tension totale :

$$V_{tandem} = V_{Pk} = V_{Si} \quad (4.9)$$

Puissance totale :

$$P_{tandem} = V_{tandem} I_{tandem} \quad (4.10)$$

La cellule tandem en configuration série partielle (3T) présente une architecture où les pérovskites sont connectées en série entre elles, puis l'ensemble est mis en parallèle avec la cellule silicium. Cette topologie nécessite un traitement électrique spécifique avec redistribution des courants. Donc, l'architecture de connexion se présente comme suit :

- **Stack série pérovskite :** Large gap (terminal 3) → Gap moyen (terminal 2)
- **Parallélisation :** Stack pérovskite || Cellule silicium (terminal 1)

Pour le terminal supérieur (pérovskite large gap $Pk1, Eg = 1.9 \text{ eV}$) :

$$I_{Pk1} = I_{ph,Pk1} - I_{0,Pk1} \left[\exp \left(\frac{V_{Pk1} - R_{eff,Pk1} I_{Pk1}}{n_{Pk1} V_T} \right) - 1 \right] - \frac{V_{Pk1} + R_{eff,Pk1} I_{Pk1}}{R_{sh,Pk1}} \quad (4.11)$$

Pour le terminal intermédiaire (pérovskite gap moyen $Pk2 = Eg = 1.5 \text{ eV}$) :

$$I_{Pk2} = I_{ph,Pk2} - I_{0,Pk2} \left[\exp \left(\frac{V_{Pk2} - R_{eff,Pk2} I_{Pk2}}{n_{Pk2} V_T} \right) - 1 \right] - \frac{V_{Pk2} + R_{eff,Pk2} I_{Pk2}}{R_{sh,Pk2}} \quad (4.12)$$

Pour le terminal inférieur (silicium $Si, Eg = 1.12 \text{ eV}$) :

$$I_{Si} = I_{ph,si} - I_{0,si} \left[\exp \left(\frac{V_{Si} - R_{s,si} I_{Si}}{n_{Si} V_T} \right) - 1 \right] - \frac{V_{Si} + R_{s,si} I_{Si}}{R_{sh,si}} \quad (4.13)$$

Les Bilans globaux se présente comme suit :

Courant total :

$$I_{stack,pk} = I_{Pk1} = I_{Pk2}, I_{tandem} = I_{Si} + I_{stack,pk} \quad (4.14)$$

Tension totale :

$$V_{stack,pk} = V_{Pk1} + V_{Pk2} + I_{stack,pk} R_{inter,pk}, V_{tandem} = V_{stack,pk} = V_{Si} \quad (4.15)$$

Puissance totale :

$$P_{tandem} = V_{Si}(I_{Si} + I_{stack,Pk}) \quad (4.16)$$

Où $R_{eff,i} = R_{s,i} + R_{inter}$ ($i = Pk1, Pk2$) représente la résistance série effective incluant les résistances d'interconnexion, et la circulation des courants suit la logique série-parallèle de l'architecture.

Les simulations 2T, 4T et hybrides sont réalisées dans les Conditions de Test Standard (STC) définies par les normes internationales IEC 61215 et ASTM E948. Ces conditions standardisées comprennent une irradiance solaire de 1000 W.m^{-2} correspondant au spectre AM 1.5G (Air Mass 1.5 Global), une température de cellule maintenue à 25°C (298.15 K), et une masse d'air atmosphérique de 1.5 qui représente les conditions d'éclairement au niveau du sol avec le soleil à 48.2° au-dessus de l'horizon. Ces paramètres de référence permettent une comparaison standardisée des performances photovoltaïques et correspondent aux conditions optimales d'ensoleillement terrestre.

L'implémentation Python utilisera la méthode Newton-Raphson avec une tolérance de 10^{-6} A pour résoudre les systèmes d'équations non-linéaires. Le programme générera automatiquement les courbes I-V et P-V pour chaque configuration, permettant l'extraction des paramètres de performance : V_{OC} , I_{SC} , FF et efficacité maximale.

5. Simulation de la configuration série

L'analyse des résultats de simulation de la cellule tandem Pérovskite/Silicium révèle des performances prometteuses et met en évidence les caractéristiques spécifiques de cette configuration. Le Tableau 4.1 [52] présente les paramètres du modèle électrique équivalent utilisé pour simuler les cellules individuelles, montrant que les deux matériaux partagent certaines caractéristiques identiques tout en présentant des différences significatives. Le facteur d'idéalité (n) est fixé à 1 pour les deux cellules, indiquant un comportement de diode idéale dominé par la recombinaison dans la région de charge d'espace. Le photocourant (I_{ph}) est également identique à 18 mA pour les deux cellules, suggérant une génération de porteurs équivalente sous les conditions d'illumination simulées, tandis que la résistance parallèle (R_{sh}) est maintenue à $1000 \Omega.\text{cm}^2$ pour les deux matériaux, reflétant une faible conductance de fuite.

Cependant, des différences notables apparaissent dans les paramètres clés. La résistance série (R_s) présente une valeur de $8,5 \Omega.\text{cm}^2$ pour la Pérovskite contre $4 \Omega.\text{cm}^2$ pour le Silicium, cette différence pouvant être attribuée aux défis technologiques actuels liés aux contacts et à la

conductivité des couches de transport dans les cellules à base de Pérovskite. Le courant de saturation inverse (I_0) diffère également de manière significative avec $1 \times 10^{-15} \text{ mA.cm}^{-2}$ pour la Pérovskite et $5 \times 10^{-12} \text{ mA.cm}^{-2}$ pour le Silicium, indiquant des mécanismes de recombinaison différents entre les deux matériaux.

Paramètres	Symbole	Pérovskite	Silicium
Facteur d'idéalité	n	1	1
Courant de saturation inverse	I_0	$1 \ 10^{-19} \text{ mA.cm}^{-2}$	$5 \ 10^{-12} \text{ mA.cm}^{-2}$
Photocourant	I_{ph}	18 mA	18 mA
Resistance série	R_s	$8.5 \ \Omega \cdot \text{cm}^2$	$4 \ \Omega \cdot \text{cm}^2$
Résistance parallèle	R_{sh}	$1000 \ \Omega \cdot \text{cm}^2$	$1000 \ \Omega \cdot \text{cm}^2$
Résistance d'interconnexion	R_{inter}	$0.01 \ \Omega \cdot \text{cm}^2$	

Tableau 4.1 : Paramètres du modèle électrique équivalent des cellules solaires Pérovskite et Silicium utilisées dans la simulation de la cellule tandem Pérovskite/silicium 2T et 4T

La Figure 4.3 illustre de manière comparative les performances des cellules individuelles et de la configuration tandem, révélant plusieurs aspects cruciaux du comportement électrique. Les courbes I-V des cellules individuelles montrent que la cellule de Silicium présente une tension de circuit ouvert d'environ 0,75 V et un courant de court-circuit proche de 17,5 mA/cm², tandis que la cellule de Pérovskite affiche une tension de circuit ouvert supérieure d'environ 1,0 V, mais avec un facteur de forme légèrement dégradé en raison de sa résistance série plus élevée. La configuration tandem en série présente des caractéristiques remarquables avec une tension de circuit ouvert d'environ 1,75 V, correspondant approximativement à la somme des tensions individuelles et confirmant l'addition des tensions en configuration série, tandis que le courant reste limité par la cellule ayant le plus faible photocourant, démontrant la contrainte fondamentale des cellules tandem en série. Le graphique de la Figure 4.3 met également en évidence le point de puissance maximale (MPP) de la cellule tandem avec une puissance de 25,7 mW/cm² à une tension d'environ 1,568 V.

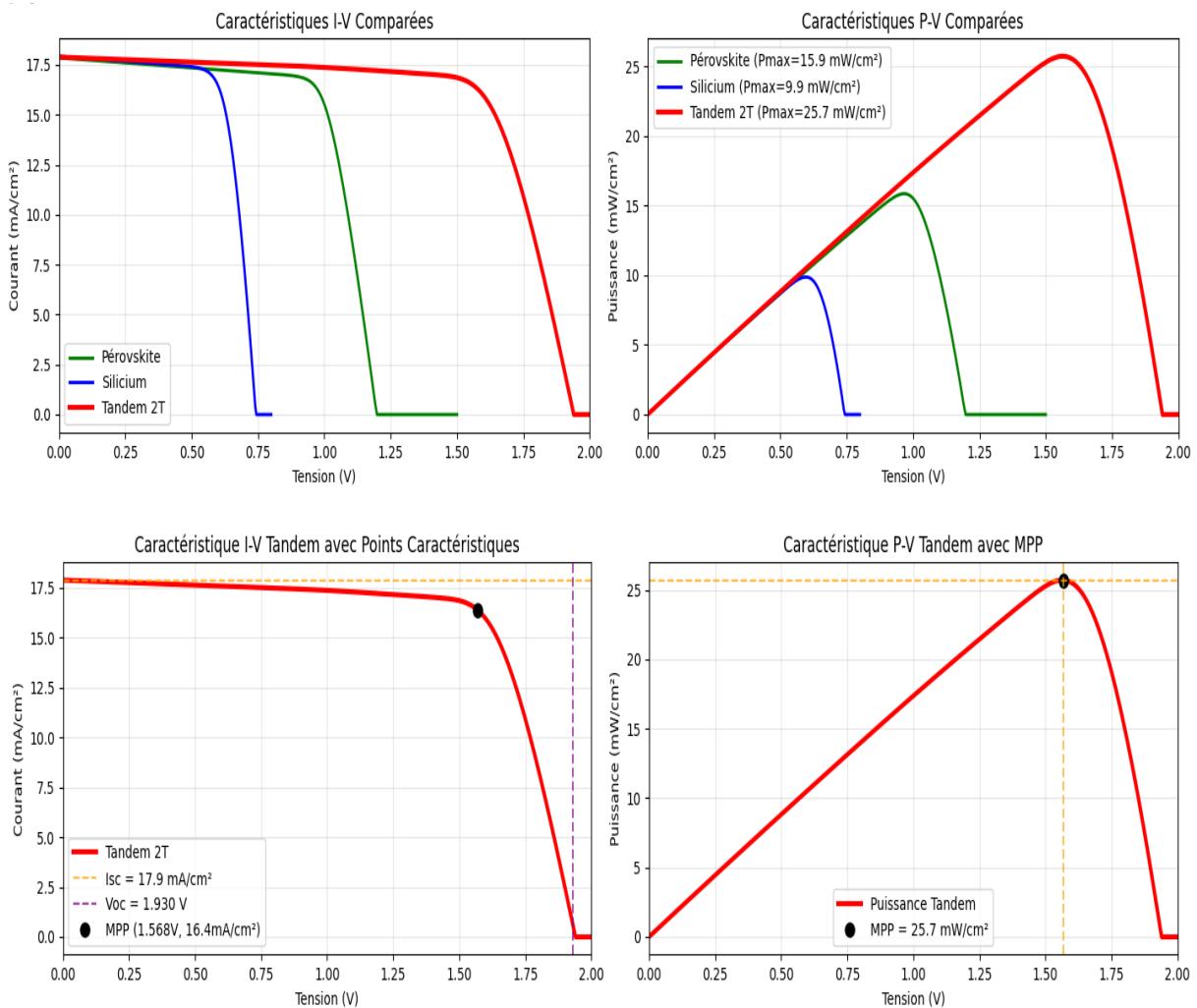


Figure 4.3 : Caractéristiques I-V et P-V simulées pour les cellules solaires individuelles Pérovskite, Silicium et Tandem 2T.

Le Tableau 4.2 synthétise les paramètres de performance de la cellule tandem, révélant des résultats particulièrement prometteurs. Le courant de court-circuit (Isc) atteint 17,89 mA/cm², valeur cohérente avec la limitation par la cellule ayant le plus faible photocourant, tandis que la tension de circuit ouvert (Voc) s'élève à 1,930 V, légèrement inférieure à la somme théorique due aux pertes résistives et aux effets de couplage. La tension au MPP (Vmpp) de 1,568 V représente environ 81% de la tension de circuit ouvert, et le courant au MPP (Impp) de 16,41 mA/cm² correspond à environ 92% du courant de court-circuit. Le facteur de forme (FF) de 0,745 constitue une valeur satisfaisante qui témoigne de la qualité de la jonction et de l'optimisation des résistances parasites dans la configuration tandem, tandis que l'efficacité (η) de 25,7% représente une performance remarquable qui surpassé significativement les cellules individuelles.

Courant de court-circuit (I_{sc})	17.89 mA/cm ²
Tension de circuit ouvert (V_{oc})	1.930 V
Puissance maximale (P_{max})	25.7 mW/cm ²
Tension au MPP (V_{mpp})	1.568 V
Courant au MPP (I_{mpp})	16.41 mA/cm ²
Facteur de forme (FF)	0.745
Efficacité (η)	25.7 %

Tableau 4.2 : Paramètres de performance électrique de la cellule solaire tandem

Pérovskite/Silicium en configuration série extraits des caractéristiques I-V et P - V simulées

Ces résultats confirment les avantages théoriques de l'approche tandem avec une augmentation significative de l'efficacité représentant une amélioration substantielle par rapport aux cellules individuelles, une meilleure utilisation du spectre solaire grâce à la combinaison Pérovskite/Silicium qui permet une exploitation plus complète du spectre lumineux, et l'addition des tensions permise par la configuration série pour atteindre des tensions de fonctionnement élevées. Il convient de souligner que l'excellente performance obtenue résulte notamment de l'équilibrage optimal des photocourants réalisé dans la simulation, où les deux cellules présentent un I_{ph} identique de 18 mA selon le Tableau 4.1, évitant ainsi la limitation typique des cellules tandem en série par désaccord de courant. Néanmoins, certaines limitations sont identifiées, notamment l'impact de la résistance série plus élevée de la Pérovskite qui influence le facteur de forme global, et la complexité de fabrication où l'optimisation simultanée des deux cellules représente un défi technologique. Les résultats suggèrent des axes d'amélioration incluant principalement la réduction de la résistance série de la cellule Pérovskite et l'optimisation de l'interconnexion série pour minimiser les pertes, l'équilibrage des photocourants étant déjà optimalement réalisé dans cette configuration. Cette analyse démontre le potentiel significatif des cellules tandem Pérovskite/Silicium pour dépasser les limites d'efficacité des technologies photovoltaïques conventionnelles, tout en identifiant les défis technologiques à relever pour une commercialisation réussie.

6. Simulation de la configuration parallèle

L'analyse des résultats de simulation de la cellule tandem Pérovskite/Silicium en configuration parallèle révèle les caractéristiques spécifiques de cette approche architecturale. Il convient de préciser que les simulations ont été menées en utilisant les mêmes paramètres électriques et

photoélectriques des sous-cellules Pérovsuite et Silicium que ceux définis précédemment dans le Tableau 3.1 pour la configuration série, permettant ainsi une cohérence dans la modélisation des matériaux photovoltaïques.

La Figure 4.4 présente les caractéristiques I-V et P-V de cette configuration 4T, illustrant le comportement électrique particulier de la configuration parallèle. Les courbes I-V montrent que la cellule de Pérovsuite conserve sa tension de circuit ouvert d'environ 1,0 V tandis que la cellule de Silicium maintient sa tension caractéristique d'environ 0,75 V, chaque sous-cellule fonctionnant de manière indépendante dans cette configuration.

La configuration parallèle présente un comportement électrique fondamental où la tension de fonctionnement de l'ensemble correspond à la tension commune imposée par l'interconnexion parallèle. La Figure 4.4 révèle que la courbe rouge de la cellule tandem 4T atteint une tension de circuit ouvert de 1,194 V, résultant de l'équilibrage des tensions entre les deux sous-cellules connectées en parallèle. Cette tension intermédiaire reflète l'influence mutuelle des deux cellules dans la configuration parallèle, où chaque sous-cellule doit s'adapter au point de fonctionnement commun imposé par l'interconnexion.

Les courbes de puissance présentées dans la Figure 4.4 montrent que la cellule tandem 4T développe une puissance maximale concentrée autour de 20,4 mW/cm² à une tension de fonctionnement d'environ 0,621 V. Cette caractéristique de puissance révèle l'optimisation spécifique de la configuration parallèle, où le point de puissance maximale résulte de l'équilibrage entre les contributions des deux sous-cellules fonctionnant à leur point optimal respectif sous la contrainte de tension commune.

Le Tableau 4.3 synthétise les paramètres de performance électrique de la cellule tandem en configuration parallèle, révélant des caractéristiques remarquables de cette approche. Le courant de court-circuit (I_{sc}) atteint 35,78 mA/cm², démontrant la capacité de la configuration parallèle à additionner efficacement les contributions en courant des deux sous-cellules. Cette valeur élevée illustre l'un des avantages principaux de l'interconnexion parallèle, permettant d'exploiter pleinement les capacités de génération de courant de chaque matériau photovoltaïque.

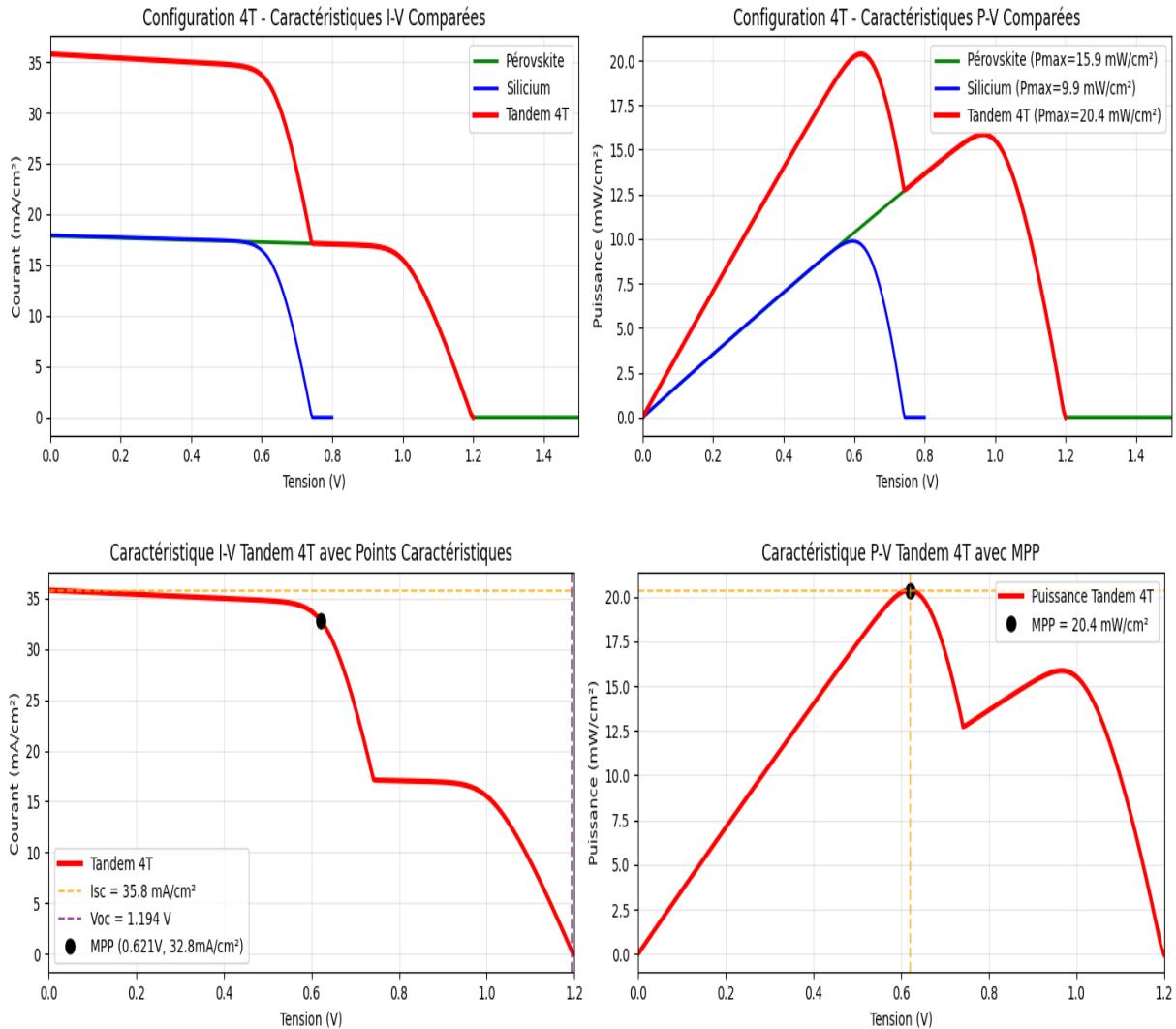


Figure 4.4 : Caractéristiques I-V et P-V simulées pour les cellules solaires individuelles Pérovskite, Silicium et Tandem 4T.

La tension de circuit ouvert (V_{oc}) s'établit à 1,194 V selon le Tableau 4.3, reflétant l'équilibrage des tensions entre les sous-cellules dans la configuration parallèle. Cette tension résulte de l'interaction complexe entre les caractéristiques électriques des deux matériaux connectés en parallèle, où chaque cellule influence le point de fonctionnement global. La puissance maximale (P_{max}) de 20,4 mW/cm² est atteinte avec une tension au MPP (V_{mpp}) de 0,621 V et un courant au MPP (I_{mpp}) de 32,8 mA/cm², illustrant l'optimisation du point de fonctionnement pour cette configuration spécifique.

L'efficacité de 20,4% obtenue selon le Tableau 4.3 témoigne des performances significatives de la configuration parallèle, démontrant la capacité de cette approche à surpasser les performances des cellules individuelles. Cette efficacité résulte de l'exploitation optimisée des

propriétés complémentaires des matériaux Pérovskite et Silicium dans le cadre de l'interconnexion parallèle. Le facteur de forme (FF) de 0,477 révèle les défis spécifiques de cette configuration, cette valeur indiquant les pertes liées à la complexité de l'interconnexion parallèle et aux défis d'optimisation simultanée des deux sous-cellules.

Courant de court-circuit (I_{sc})	35.78 mA/cm ²
Tension de circuit ouvert (V_{oc})	1.194 V
Puissance maximale (P_{max})	20.4 mW/cm ²
Tension au MPP (V_{mpp})	0.621 V
Courant au MPP (I_{mpp})	32.8 mA/cm ²
Facteur de forme (FF)	0.477
Efficacité (η)	20.4 %

Tableau 4.3 : Paramètres de performance électrique de la cellule solaire tandem Pérovskite/Silicium en configuration parallèle extraits des caractéristiques I-V et P-V simulées

L'analyse des résultats révèle que la configuration parallèle offre des avantages spécifiques, notamment la capacité à générer des courants élevés de 35,78 mA/cm², ce qui peut être particulièrement bénéfique pour des applications nécessitant des densités de courant importantes. La flexibilité opérationnelle de la configuration 4T permet théoriquement un contrôle et une optimisation indépendante de chaque sous-cellule, offrant des possibilités d'adaptation aux conditions d'exploitation variables. Cette caractéristique ouvre la voie à des stratégies d'optimisation dynamique où chaque sous-cellule peut être ajustée individuellement pour maximiser les performances globales.

7. Simulation de la configuration hybride 3T

L'analyse des résultats de simulation de la cellule tandem Pérovskite1/Pérovskite2/Silicium en configuration hybride 3T révèle les caractéristiques spécifiques de cette architecture innovante combinant connexions série et parallèle. Cette configuration présente une approche originale où les deux cellules Pérovskite sont connectées en série entre elles, puis cet ensemble série est mis en parallèle avec la cellule Silicium, créant ainsi une architecture hybride à trois terminaux qui tire parti des avantages des deux types de connexions.

Le Tableau 4.4 présente les paramètres du modèle électrique équivalent des trois sous-cellules utilisées dans cette configuration hybride. Les paramètres révèlent une stratégie d'optimisation

sophistiquée avec deux cellules Pérovskite aux caractéristiques différencierées : la Pérovskite Pk1 présente un photocourant de 8 mA et une résistance série de $6 \Omega \cdot \text{cm}^2$, tandis que la Pérovskite Pk2 affiche un photocourant supérieur de 12 mA avec une résistance série optimisée à $5 \Omega \cdot \text{cm}^2$. Cette différenciation permet d'optimiser la contribution de chaque cellule Pérovskite dans la chaîne série. La cellule Silicium conserve ses paramètres caractéristiques avec un photocourant de 18 mA et une résistance série de $4 \Omega \cdot \text{cm}^2$, assurant une contribution parallèle optimale. Les courants de saturation inverse varient significativement entre les matériaux, avec $5 \times 10^{-17} \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ pour Pk1, $10^{-17} \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ pour Pk2, et $5 \times 10^{-12} \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ pour le Silicium, reflétant les propriétés intrinsèques de recombinaison de chaque matériau.

Paramètres	Symbole	Pérovskite Pk1	Pérovskite Pk2	Silicium
Facteur d'idéalité	n	1	1	1
Courant de saturation inverse	I_0	$5 \times 10^{-17} \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$	$10^{-17} \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$	$5 \times 10^{-12} \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$
Photocourant	I_{ph}	8 mA	12 mA	18 mA
Résistance série	R_s	$6 \Omega \cdot \text{cm}^2$	$5 \Omega \cdot \text{cm}^2$	$4 \Omega \cdot \text{cm}^2$
Résistance parallèle	R_{sh}	$800 \Omega \cdot \text{cm}^2$	$900 \Omega \cdot \text{cm}^2$	$1000 \Omega \cdot \text{cm}^2$
Résistance d'interconnexion	R_{inter}	$0.01 \Omega \cdot \text{cm}^2$		

Tableau 4.4 : Paramètres du modèle électrique équivalent des cellules solaires Pérovskite1, Pérovskite2 et Silicium utilisées dans la simulation de la cellule tandem Pérovskite/silicium 3T

La Figure 4.5 illustre les caractéristiques I-V et P-V des cellules individuelles et de la configuration tandem 3T, révélant le comportement électrique complexe de cette architecture hybride. Les courbes I-V des cellules Pérovskite individuelles montrent des tensions de circuit ouvert distinctes, avec des profils de courant différenciés reflétant leurs paramètres photoélectriques spécifiques. La cellule Silicium maintient ses caractéristiques propres avec une tension de circuit ouvert d'environ 0,75 V et un profil de courant robuste. La courbe de la configuration tandem 3T présente un comportement électrique unique résultant de la combinaison série-parallèle, avec une forme caractéristique qui reflète l'influence simultanée des connexions série entre les Pérovskites et de la connexion parallèle avec le Silicium.

Les courbes de puissance de la Figure 4.5 révèlent que la configuration tandem 3T développe une puissance maximale d'environ $13,7 \text{ mW/cm}^2$ selon le Tableau 4.5. Cette performance

réulte de l'optimisation complexe entre la contribution série des deux Pérovskites et l'apport parallèle de la cellule Silicium. Le point de puissance maximale est atteint à une tension de fonctionnement de 0,580 V, valeur qui reflète l'équilibrage entre les contraintes de tension imposées par la connexion série des Pérovskites et l'influence de la connexion parallèle avec le Silicium.

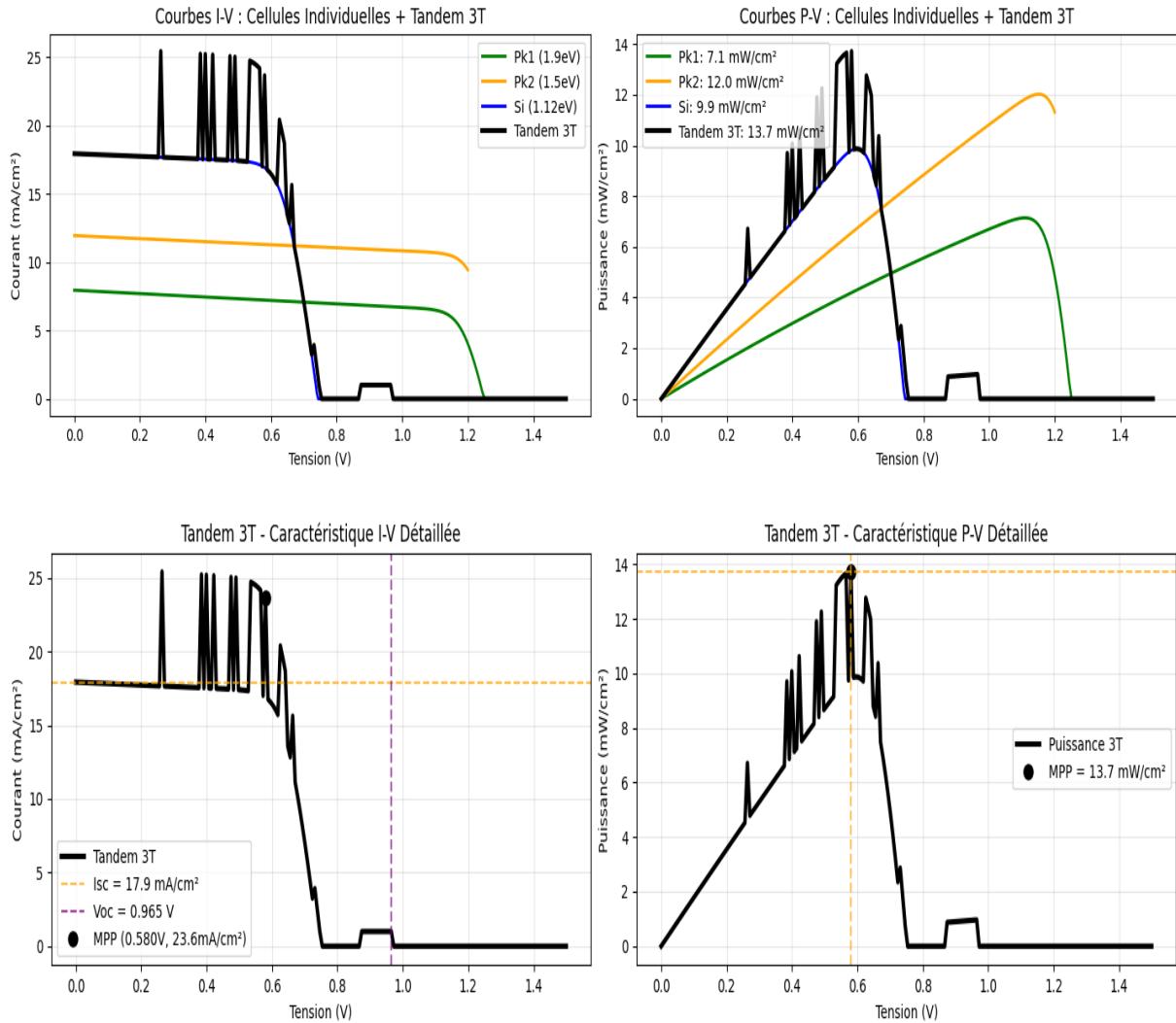


Figure 4.5 : Caractéristiques I-V et P-V simulées pour les cellules solaires individuelles Pérovskite1, Pérovskite2, Silicium et Tandem 3T.

Le Tableau 4.5 synthétise les paramètres de performance de la cellule tandem 3T, révélant les caractéristiques spécifiques de cette architecture hybride. Le courant de court-circuit (I_{sc}) s'élève à 17,93 mA/cm², valeur qui résulte de la combinaison complexe des contributions série et parallèle des différentes sous-cellules. Cette valeur reflète l'optimisation du système où le courant de la branche série Pérovskite (limité par la cellule ayant le plus faible photocourant) s'additionne au courant de la cellule Silicium en parallèle. La tension de circuit ouvert (V_{oc})

atteint 0,965 V, valeur intermédiaire qui témoigne de l'équilibrage entre les tensions des différentes branches de l'architecture hybride.

Courant de court-circuit (I_{sc}):	17.93 mA/cm ²
Tension de circuit ouvert (V_{oc})	0.965 V
Puissance maximale (P_{max})	13.7 mW/cm ²
Tension au MPP (V_{mpp})	0.580 V
Courant au MPP (I_{mpp})	23.6 mA/cm ²
Facteur de forme (FF)	0.793
Efficacité (η)	13.7 %

Tableau 4.5 : Paramètres de performance électrique de la cellule solaire tandem Pérovsuite1/Pérovsuite2/Silicium en configuration parallèle extraits des caractéristiques I-V et P-V simulées

La puissance maximale (P_{max}) de 13,7 mW/cm² est obtenue avec une tension au MPP (V_{mpp}) de 0,580 V et un courant au MPP (I_{mpp}) de 23,6 mA/cm² selon le Tableau 3.5. Ces valeurs illustrent le point d'équilibre optimal de la configuration 3T, où les contributions des trois sous-cellules sont harmonisées pour maximiser la puissance extraite. Le facteur de forme (FF) remarquable de 0,793 constitue un point fort de cette configuration, indiquant une excellente qualité des jonctions et une optimisation efficace des résistances parasites dans cette architecture complexe. Cette valeur élevée du facteur de forme témoigne de la pertinence de l'approche hybride pour minimiser les pertes résistives.

L'efficacité de 13,7% obtenue selon le Tableau 4.5, bien que modérée, démontre la faisabilité de l'architecture hybride 3T pour les applications photovoltaïques. Cette performance reflète les défis inhérents à l'optimisation simultanée de trois sous-cellules dans une configuration complexe, où chaque cellule doit fonctionner dans des conditions imposées par l'architecture globale. Le courant au MPP élevé de 23,6 mA/cm² constitue un avantage de cette configuration, particulièrement intéressant pour des applications nécessitant des densités de courant importantes sous tension modérée.

L'analyse des résultats révèle que la configuration hybride 3T présente des caractéristiques uniques qui la distinguent des architectures conventionnelles. La capacité à combiner les avantages de la connexion série entre les Pérovsites et de la connexion parallèle avec le Silicium offre une flexibilité d'optimisation intéressante. Le facteur de forme élevé de 0,793

constitue un atout majeur de cette configuration, suggérant que l'architecture hybride peut effectivement minimiser les pertes tout en exploitant les propriétés complémentaires des différents matériaux. Cette approche ouvre la voie à des stratégies d'optimisation sophistiquées où chaque sous-cellule peut contribuer de manière optimale selon ses caractéristiques propres, tout en bénéficiant des synergies créées par l'architecture hybride série-parallèle.

8. Analyse paramétrique comparative

L'analyse comparative des trois configurations de cellules tandem Pérovskite/Silicium révèle des performances distinctes selon leurs architectures électriques. La configuration série domine avec une efficacité exceptionnelle de 25,7% et une tension élevée ($V_{oc} = 1,930$ V), résultant de l'addition des tensions individuelles des sous-cellules. Cette supériorité énergétique s'accompagne cependant d'un courant limité ($I_{sc} = 17,89$ mA/cm²), contraint par la cellule ayant le plus faible photocourant, rendant l'équilibrage des sous-cellules critique pour cette architecture.

La configuration parallèle se distingue par son courant exceptionnel ($I_{sc} = 35,78$ mA/cm²) résultant de l'addition des courants individuels, offrant un avantage décisif pour les applications nécessitant des densités de courant importantes. Néanmoins, elle présente une efficacité moindre (20,4%) et le facteur de forme le plus faible ($FF = 0,477$), révélant des défis d'optimisation liés aux pertes d'adaptation entre sous-cellules connectées en parallèle. Sa tension intermédiaire ($V_{oc} = 1,194$ V) reflète l'équilibrage imposé par la connexion parallèle.

La configuration hybride 3T présente un profil unique avec le facteur de forme le plus élevé ($FF = 0,793$), témoignant d'une excellente optimisation des résistances parasites malgré la complexité architecturale. Cependant, elle affiche l'efficacité la plus faible (13,7%) et la tension la plus basse ($V_{oc} = 0,965$ V), conséquences de l'interaction complexe entre les branches série et parallèle. Son comportement particulier au point de puissance maximale, où l' I_{mpp} dépasse l' I_{sc} , illustre les interactions non linéaires caractéristiques de cette architecture.

Cette analyse démontre que le choix optimal dépend des exigences applicatives : la configuration série s'impose pour l'efficacité maximale et les applications haute tension, la configuration parallèle excelle pour les systèmes nécessitant des courants élevés, tandis que la configuration hybride 3T offre une flexibilité architecturale prometteuse pour des développements futurs malgré ses performances actuelles limitées.

9. Optimisation des configurations

Les stratégies d'optimisation des cellules tandem Pérovskite/Silicium diffèrent fondamentalement selon l'architecture électrique adoptée, chaque configuration présentant des défis spécifiques nécessitant des approches d'optimisation adaptées. L'évolution remarquable des rendements, passant de 3,8% en 2009 à 29,1% pour les tandems pérovskite-silicium actuels [53], témoigne de l'efficacité de ces stratégies d'optimisation continues et de leur importance cruciale pour le développement de cette technologie photovoltaïque.

Pour la configuration série, l'optimisation se concentre principalement sur l'équilibrage des photocourants entre les sous-cellules pérovskite et silicium, qui constitue le défi majeur de cette architecture limitée par la cellule ayant le plus faible courant. La jonction de recombinaison entre les deux sous-cellules représente une composante clé nécessitant une ingénierie précise pour minimiser les pertes de recombinaison et optimiser le transfert de charge.

L'optimisation de la configuration parallèle vise principalement à améliorer le facteur de forme en réduisant les pertes d'adaptation entre sous-cellules, cette architecture présentant le défi spécifique de l'harmonisation des caractéristiques électriques des deux matériaux connectés en parallèle. Les stratégies se concentrent sur l'optimisation des résistances série et parallèle pour minimiser les pertes ohmiques, particulièrement critiques dans cette configuration où les courants s'additionnent. Le développement d'électrodes communes efficaces constitue un enjeu technique majeur, nécessitant des matériaux et des géométries optimisés pour assurer une collecte homogène des porteurs sur toute la surface active. L'adaptation des points de fonctionnement optimal de chaque sous-cellule représente un défi d'optimisation critique pour maximiser la puissance extraite, impliquant souvent des compromis entre les performances individuelles des sous-cellules et la performance globale du dispositif.

La configuration hybride 3T bénéficie de stratégies d'optimisation sophistiquées exploitant sa flexibilité architecturale unique, permettant une gestion indépendante des deux branches série et parallèle pour un contrôle fin des points de fonctionnement. Cette architecture ouvre la voie à l'utilisation d'électronique de puissance adaptative capable d'optimiser en temps réel les conditions de fonctionnement selon l'éclairement et les conditions environnementales. L'optimisation des interconnexions complexes nécessite une ingénierie précise pour minimiser les résistances parasites tout en maintenant l'isolation électrique entre les différentes branches. Le développement d'algorithmes de suivi du point de puissance maximale spécifiques à cette

architecture constitue un domaine d'innovation prometteur, exploitant la possibilité de contrôler indépendamment les différentes sections du dispositif.

10. Conclusion du chapitre

Ce chapitre a développé une approche de simulation numérique complète pour l'analyse des cellules tandem Pérovsuite/Silicium, utilisant Python pour modéliser les trois configurations étudiées : série (2T), parallèle (4T) et hybride (3T). La génération automatique des courbes I-V et P-V a permis d'extraire les paramètres de performance et de révéler des comportements électriques distincts.

L'analyse comparative a démontré la supériorité de la configuration série avec 25,7% d'efficacité, l'avantage de la configuration parallèle pour les applications haute intensité ($35,78 \text{ mA/cm}^2$), et le potentiel prometteur de la configuration hybride 3T avec son facteur de forme exceptionnel de 0,793. Les stratégies d'optimisation identifiées - équilibrage des photocourants pour la série, harmonisation électrique pour la parallèle, et exploitation de la flexibilité architecturale pour l'hybride - constituent des axes cruciaux pour l'amélioration des performances.

Cette approche de simulation offre un outil puissant pour orienter les choix technologiques selon les applications visées et guider le développement futur des cellules tandem haute performance.

Conclusion Générale

Ce mémoire a proposé une étude des cellules solaires tandem à travers une approche interdisciplinaire combinant modélisation mathématique et simulation numérique. Dans le contexte des défis de la transition énergétique et de l'urgence climatique, ce modeste travail vise à mieux comprendre les cellules tandem et leurs potentialités pour améliorer l'efficacité photovoltaïque.

Notre travail s'est articulé autour de quatre axes complémentaires qui ont permis d'établir une compréhension complète des cellules solaires tandem. L'étude des fondamentaux photovoltaïques a posé les bases théoriques nécessaires, révélant les contraintes inhérentes aux cellules à simple jonction et justifiant l'intérêt des architectures multi-jonctions. L'analyse comparative des différentes configurations tandem a mis en évidence leurs avantages spécifiques et les défis technologiques associés, particulièrement en termes de matériaux et d'interfaces.

Le développement d'un modèle électrique complet constitue une contribution méthodologique majeure. Ce modèle, étendu aux architectures série, parallèle et hybride, offre un outil de prédiction robuste pour l'évaluation des performances des cellules tandem sous diverses conditions opérationnelles.

L'implémentation numérique en Python et l'étude de cas sur les cellules tandem Pérovskite/Silicium ont démontré la validité et l'efficacité de notre approche. Les simulations développées permettent une génération automatique des courbes caractéristiques I-V et P-V, ainsi qu'une extraction systématique des paramètres de performance.

L'analyse paramétrique comparative a révélé des performances distinctes selon l'architecture électrique adoptée. La configuration série présente l'efficacité la plus élevée (25,7%) avec une tension remarquable ($V_{oc} = 1,930$ V), confirmant sa supériorité pour les applications haute performance. La configuration parallèle se distingue par son courant exceptionnel ($I_{sc} = 35,78$ mA/cm²), idéale pour les systèmes nécessitant des densités de courant importantes, malgré une efficacité moindre (20,4%). La configuration hybride 3T, bien qu'affichant l'efficacité la plus faible (13,7%), présente le facteur de forme le plus élevé ($FF = 0,793$), témoignant d'un potentiel d'optimisation architectural unique.

Ces résultats quantitatifs confirment que le choix optimal dépend des exigences applicatives spécifiques et ont conduit à l'élaboration de stratégies d'optimisation adaptées à chaque configuration, exploitant leurs avantages intrinsèques tout en minimisant leurs limitations respectives.

Les stratégies d'optimisation développées exploitent les spécificités de chaque architecture : l'équilibrage des photocourants pour la configuration série, l'amélioration du facteur de forme et la réduction des pertes d'adaptation pour la configuration parallèle, et l'exploitation de la flexibilité architecturale pour la configuration hybride 3T avec ses possibilités de contrôle adaptatif en temps réel.

Ce travail apporte une contribution modeste à la compréhension des cellules solaires tandem en proposant des outils de modélisation et de simulation pour l'étude de ces architectures. Les méthodologies développées peuvent servir de support aux chercheurs et ingénieurs pour l'analyse des configurations tandem.

Les perspectives ouvertes par ce mémoire sur le plan théorique suggèrent plusieurs axes de développement futurs. L'extension des modèles développés pourrait inclure l'étude d'autres matériaux émergents comme les pérovskites à composition mixte, l'intégration de phénomènes physiques plus complexes tels que les effets de transport hot-carrier, ou encore l'analyse de configurations tandem à plus de deux jonctions. La modélisation des effets de vieillissement et de dégradation des interfaces pérovskite/silicium constitue également une perspective théorique intéressante pour une meilleure prédition du comportement à long terme de ces dispositifs.

Références bibliographiques

[1] A. E. Becquerel, « Recherches sur les effets de la radiation chimique de la lumière solaire au moyen des courants électriques », *Comptes Rendus des Séances de l'Académie des Sciences*, vol. 9, 1839, pp. 145–149 et 561–567.

[2] C. E. Fritts, « On a New Form of Selenium Photocell », *American Journal of Science*, Third Series, vol. 26, no. 156, 1883, pp. 465–468.

[3] D. M. Chapin, C. S. Fuller, et G. L. Pearson, « A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power », *Journal of Applied Physics*, vol. 25, no. 5, 1954, pp. 676–677. doi:10.1063/1.1721711

[4] S. Arya et P. Mahajan, *Solar Cells: Types and Application*, 1re éd., Springer, Singapore, 2023.

[5] M. A. Green, « Silicon photovoltaic modules: a brief history of the first 50 years », *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 13, no. 5, 2005, pp. 447–455.

[6] H. Mathieu et H. Fanet, *Physique des semiconducteurs et des composants électroniques*, 6e éd., Dunod, 2009.

[7] M. A. Green, *Third Generation Photovoltaics: Advanced Solar Energy Conversion*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2003.

[8] A. Shah, *Solar Cells and Modules*, 1re éd., Springer, Cham, 2020.

[9] Connaissance des Énergies, « Solaire photovoltaïque : fonctionnement, panneau et centrale », *Connaissance des Énergies*, [en ligne]. Disponible sur : <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-photovoltaïque> (consulté en mai 2025).

[10] Acsolue Énergie, « Au cœur de la cellule solaire : pour comprendre l'effet photovoltaïque, dopage du silicium cristallin, production d'électricité », *Acsolue Énergie*, 1 août 2021. Disponible sur : <https://acsolue-energie.fr/2021/08/01/au-coeur-de-la-cellule-solaire-pour-comprendre-leffet-photovoltaïque-dopage-du-silicium-cristallin-production-delectricite/> (consulté en mai 2025).

[11] Sunflower Solar, « Quelle est la différence entre polycristallin, monocristallin et amorphe », *Sunflower Solar*, [en ligne]. Disponible sur : https://www.sunflower-solar.com/index_fr.php?act=content&scheduler_id=3629 (consulté en mai 2025).

[12] D. Reaux, *Cellules photovoltaïques à hétérojonctions de silicium (a-Si H/c-Si) : modélisation des défauts et de la recombinaison à l'interface*, thèse de doctorat, Université Paris-Saclay, France, 2017.

[13] M. A. Green, *Solar Cells: Operating Principles, Technology and System Applications*, Prentice-Hall, 1982.

[14] A. Luque et S. Hegedus (dir.), *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, 1re éd., John Wiley & Sons, Ltd, 2010.

[15] Min, K. H., Kim, T., Kang, M. G., Song, H., Kang, Y., Lee, H., Kim, D., Park, S., & Lee, S. H. (2020). An Analysis of Fill Factor Loss Depending on the Temperature for the Industrial Silicon Solar Cells. *Energies*, 13(11), 2931.

[16] R. Messenger et H. “Amir” Abtahi, *Photovoltaic Systems Engineering*, 4e éd., CRC Press, 2017.

[17] Lin, H., Wang, G., Su, Q., Han, C., Xue, C., Yin, S., Fang, L., Xu, X., & Gao, P. (2024). Unveiling the mechanism of attaining high fill factor in silicon solar cells. *Progress In Photovoltaics Research And Applications*, 32(6), 359-371.

[18] Cotfas, D. T., Cotfas, P. A., & Machidon, O. M. (2018). Study of Temperature Coefficients for Parameters of Photovoltaic Cells. *International Journal Of Photoenergy*, 2018, 1-12.

[19] W. Shockley et H. J. Queisser, « Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells », *Journal of Applied Physics*, vol. 32, no. 3, 1961, pp. 510–519.

[20] D. Lincot, *Énergie solaire photovoltaïque et transition énergétique*, Collège de France, 2022. Disponible sur : <https://books.openedition.org/cdf/14107> (consulté en mai 2025).

[21] Steinhauser, B., Niewelt, T., Richter, A., Eberle, R., & Schubert, M. C. (2021). Extraordinarily High Minority Charge Carrier Lifetime Observed in Crystalline Silicon. *Solar RRL*, 5(11).

[22] Martí, A., & Araújo, G. L. (1996). Limiting efficiencies for photovoltaic energy conversion in multigap systems. *Solar Energy Materials And Solar Cells*, 43(2), 203-222.

[23] Al-Ashouri, A., Köhnen, E., Li, B., Magomedov, A., Hempel, H., Caprioglio, P., Márquez, J. A., Vilches, A. B. M., Kasparavicius, E., Smith, J. A., Phung, N., Menzel, D., Grischek, M., Kegelmann, L., Skroblin, D., Gollwitzer, C., Malinauskas, T., Jošt, M., Matič, G., . . . Albrecht, S. (2020). Monolithic perovskite/silicon tandem solar cell with > ; 29 % efficiency by enhanced hole extraction. *Science*, 370(6522), 1300-1309.

[24] Nozik, A. (2002). Quantum dot solar cells. *Physica E Low-dimensional Systems And Nanostructures*, 14(1-2), 115-120.

[25] Luque, A., & Martí, A. (2009). The Intermediate Band Solar Cell : Progress Toward the Realization of an Attractive Concept. *Advanced Materials*, 22(2), 160-174.

[26] Li, Y. (2012). Molecular Design of Photovoltaic Materials for Polymer Solar Cells : Toward Suitable Electronic Energy Levels and Broad Absorption. *Accounts Of Chemical Research*, 45(5), 723-733.

[27] Pedro Pérez-Higueras, Eduardo F. Fernández, High Concentrator Photovoltaics: Fundamentals, Engineering and Power Plants, 1st edition, Springer Cham, 2015

[28] Green, M. A., Ho-Baillie, A., & Snaith, H. J. (2014). The emergence of perovskite solar cells. *Nature Photonics*, 8(7), 506-514.

[29] Peters, I. M., Gallegos, C. D. R., Lüer, L., Hauch, J. A., & Brabec, C. J. (2023). Practical limits of multijunction solar cells. *Progress In Photovoltaics Research And Applications*, 31(10), 1006-1015.

[30] Zhang, Q., Chen, X., Lim, E. L., Shi, L., & Wei, Z. (2025). Advancing All-Perovskite Two-Terminal Tandem Solar Cells : Optimization of Wide- and Narrow-Bandgap Perovskites and Interconnecting Layers. *Energy & Environmental Science*.

[31] Li, J., Aierken, A., Liu, Y., Zhuang, Y., Yang, X., Mo, J. H., Fan, R. K., Chen, Q. Y., Zhang, S. Y., Huang, Y. M., & Zhang, Q. (2021). A Brief Review of High Efficiency III-V Solar Cells for Space Application. *Frontiers In Physics*, 8.

[32] Dimroth, F., Grave, M., Beutel, P., Fiedeler, U., Karcher, C., Tibbets, T. N. D., Oliva, E., Siefer, G., Schachtner, M., Wekkeli, A., Bett, A. W., Krause, R., Piccin, M., Blanc, N.,

Drazek, C., Guiot, E., Ghyselen, B., Salvetat, T., Tauzin, A., . . . Schwarzburg, K. (2014). Wafer bonded four-junction GaInP/GaAs//GaInAsP/GaInAs concentrator solar cells with 44.7 % efficiency. *Progress In Photovoltaics Research And Applications*, 22(3), 277-282. <https://doi.org/10.1002/pip.2475>

[33] Green, M. A., Dunlop, E. D., Siefer, G., Yoshita, M., Kopidakis, N., Bothe, K., & Hao, X. (2022). Solar cell efficiency tables (Version 61). *Progress In Photovoltaics Research And Applications*, 31(1), 3-16.

[34] Heydarian, M., Heydarian, M., Schygulla, P., Reichmuth, S. K., Bett, A. J., Hohl-Ebinger, J., Schindler, F., Hermle, M., Schubert, M. C., Schulze, P. S. C., Borchert, J., & Glunz, S. W. (2023). Recent progress in monolithic two-terminal perovskite-based triple-junction solar cells. *Energy & Environmental Science*, 17(5), 1781-1818.

[35] Hu, S., Wang, J., Zhao, P., Pascual, J., Wang, J., Rombach, F., Dasgupta, A., Liu, W., Truong, M. A., Zhu, H., Kober-Czerny, M., Drysdale, J. N., Smith, J. A., Yuan, Z., Aalbers, G. J. W., Schipper, N. R. M., Yao, J., Nakano, K., Turren-Cruz, S., . . . Snaith, H. J. (2024). Steering perovskite precursor solutions for multijunction photovoltaics. *Nature*, 639(8053), 93-101.

[36] Yamaguchi, M., Lee, K., Schygulla, P., Dimroth, F., Takamoto, T., Ozaki, R., Nakamura, K., Kojima, N., & Ohshita, Y. (2021). Approaches for High-Efficiency III-V/Si Tandem Solar Cells. *Energy And Power Engineering*, 13(12), 413-427.

[37] Saif, O. M., Zekry, A. H., Abouelatta, M., & Shaker, A. (2023). A Comprehensive Review of Tandem Solar Cells Integrated on Silicon Substrate : III/V vs Perovskite. *Silicon*, 15(15), 6329-6347.

[38] Brinkmann, K. O., Becker, T., Zimmermann, F., Kreusel, C., Gahlmann, T., Theisen, M., Haeger, T., Olthof, S., Tückmantel, C., Günster, M., Maschwitz, T., Göbelmann, F., Koch, C., Hertel, D., Caprioglio, P., Peña-Camargo, F., Perdigón-Toro, L., Al-Ashouri, A., Merten, L., . . . Riedl, T. (2022). Perovskite–organic tandem solar cells with indium oxide interconnect. *Nature*, 604(7905), 280-286.

[39] Park, I. J., An, H. K., Chang, Y., & Kim, J. Y. (2023). Interfacial modification in perovskite-based tandem solar cells. *Nano Convergence*, 10(1).

[40] Chu, Q., Sun, Z., Hah, J., Moon, K., Cheng, B., Wang, D., Xiao, P., Zhou, Y., Petrozza, A., Yang, G., Wang, H., & Wong, C. (2023). Progress, challenges, and further trends of all perovskites tandem solar cells : A comprehensive review. *Materials Today*, 67, 399-423.

[41] Hasan, S. A. U., & Yi, J. (2023). Research Perspective for Perovskite/Silicon Tandem Solar Cells. *Energy Technology*, 12(2).

[42] Reis, N. L. R. D., Camacho, N. J. R., & Novacki, N. D. F. (2017). The Newton Raphson Method in the Extraction of Parameters of PV Modules. *Renewable Energy And Power Quality Journal*, 15(5).

[43] Dkhichi, F., Oukarfi, B., Fakkar, A., & Belbounaguia, N. (2014). Parameter identification of solar cell model using Levenberg–Marquardt algorithm combined with simulated annealing. *Solar Energy*,

[44] Ortizconde, A., Garciasanchez, F., & Muci, J. (2005). New method to extract the model parameters of solar cells from the explicit analytic solutions of their illuminated characteristics. *Solar Energy Materials And Solar Cells*, 90(3), 352-361.

[45] Ismaeel, A. A. K., Houssein, E. H., Oliva, D., & Said, M. (2021). Gradient-Based Optimizer for Parameter Extraction in Photovoltaic Models. *IEEE Access*, 9, 13403-13416.

[46] Zagrouba, M., Sellami, A., Bouaïcha, M., & Ksouri, M. (2010). Identification of PV solar cells and modules parameters using the genetic algorithms : Application to maximum power extraction. *Solar Energy*, 84(5), 860-866.

[47] Hmamou, D. B., Elyaqouti, M., Arjdal, E., Chaoufi, J., Saadaoui, D., Lidaighbi, S., & Aqel, R. (2021). Particle swarm optimization approach to determine all parameters of the photovoltaic cell. *Materials Today Proceedings*, 52, 7-12.

[48] Chaib, Y., & Mehamdia, A. E. (2024). Global convergence of hybrid conjugate gradient method and its application to nonparametric estimation. *Mathematical Foundations Of Computing*, 8(2), 296-309.

[49] Dev, A., Kumar, V., Pathak, D., Tummala, A. S. L. V., Sharma, S., Kuppan, V., & Kumar, V. (2024). Improved Extraction of Parameters of Solar PV Cell Diode Model using Marine Walrus Inspired Optimization Algorithm. *IEEE Access*, 12, 181217-181231.

[50] Li, S., Gong, W., & Gu, Q. (2021). A comprehensive survey on meta-heuristic algorithms for parameter extraction of photovoltaic models. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 141, 110828.

[51] Fahim, S. R., Hasanien, H. M., Turky, R. A., Aleem, S. H. E. A., & Čalasan, M. (2022). A Comprehensive Review of Photovoltaic Modules Models and Algorithms Used in Parameter Extraction. *Energies*, 15(23), 8941.

[52] Baptiste MARTEAU, Intégration en dispositifs tandem des cellules PV à contacts passivés : Vers une technologie d'interface multifonctionnelle et universelle, thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes, France (2023).

[53] Zhang, H., Ji, X., Yao, H., Fan, Q., Yu, B., & Li, J. (2022). Review on efficiency improvement effort of perovskite solar cell. *Solar Energy*, 233, 421-434.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.01.060>

Résumé

Ce mémoire présente une étude théorique et numérique des cellules solaires tandem pérovskite/silicium. L'objectif principal consiste à développer des modèles électriques pour trois configurations distinctes : série, parallèle et hybride. La méthodologie repose sur l'implémentation d'algorithmes de simulation en Python permettant la génération automatique des courbes caractéristiques I-V et P-V, ainsi que l'extraction des paramètres de performance. L'analyse comparative révèle des performances distinctes selon l'architecture électrique adoptée, la configuration série dominant en efficacité et tension, la configuration parallèle excellant en courant, et la configuration hybride présentant le meilleur facteur de forme. Ces résultats conduisent à l'élaboration de stratégies d'optimisation spécifiques à chaque architecture.

Mots clés : Cellules solaires tandem, Pérovskite/Silicium, Modélisation électrique, Python, Simulation numérique, Optimisation.

Abstract

This thesis presents a theoretical and numerical study of perovskite/silicon tandem solar cells. The main objective is to develop electrical models for three distinct configurations: series, parallel, and hybrid. The methodology relies on the implementation of Python simulation algorithms enabling automatic generation of I-V and P-V characteristic curves, as well as performance parameter extraction. Comparative analysis reveals distinct performances according to the electrical architecture adopted, with series configuration dominating in efficiency and voltage, parallel configuration excelling in current, and hybrid configuration presenting the best fill factor. These results lead to the development of optimization strategies specific to each architecture.

Keywords: Tandem solar cells, Perovskite/Silicon, Electrical modeling, Python, Numerical simulation, optimization.

ملخص

هذه المذكرة تقدم دراسة نظرية ورقمية للخلايا الشمسية الترافقية من نوع بيروفسكايتس/سيليسيوم. يتمثل الهدف الرئيسي في تطوير نماذج كهربائية لثلاثة تكوينات متميزة: التسلسلي، التوازي، الهجين. تعتمد المنهجية على تنفيذ خوارزميات محاكاة باستخدام لغة Python، مما يتيح التوليد الآلي للمنحنيات المميزة V-I وV-P، إضافة إلى استخراج معاملات الأداء.

يكشف التحليل المقارن عن تباين في الأداء حسب البنية الكهربائية المعتمدة، حيث تتفوق البنية التسلسلية من حيث الكفاءة والجهد، بينما تتميز البنية المتوازية بإنتاج تيار أعلى، وتنظر البنية الهجينة أفضل عامل امتلاء. تساهم هذه النتائج في صياغة استراتيجيات تحسين خاصة بكل بنية، مما يدعم تصميم خلايا شمسية أكثر كفاءة وتوافقاً مع التطبيقات المختلفة.

الكلمات المفتاحية: الخلايا الشمسية الترافقية، بيروفسكايتس/سيليسيوم، النماذج الكهربائية، Python، المحاكاة الرقمية، استراتيجيات التحسين.