

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

جامعة أبوبكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



## **MEMOIRE**

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

**En** : Génie mécanique

**Spécialité** : Energies Renouvelables en Mécanique

**Par** : Tahraoui Mehdi / Sahoui Yasser

### **Sujet**

**Optimisation du rendement photovoltaïque d'une  
cellule solaire à base d'Arséniure de Gallium  
« GaAs »**

Soutenu publiquement, le 30 /06 /2022 , devant le jury composé de :

|                       |     |                       |              |
|-----------------------|-----|-----------------------|--------------|
| M. Azzi Ahmed         | Pr  | Université de Tlemcen | Président    |
| Mme. Mostafaoui Amina | MAB | Université de Tlemcen | Examinatrice |
| Mme. Benhabib Ioubna  | MAB | Université de Tlemcen | Encadrante   |
| M. Saim Rachid        | Pr  | Université de Tlemcen | Co-Encadrant |

Année universitaire : 2021/2022

# Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail :*

- *A mes parents, en témoignage de leur affection, et leurs encouragements tout le long de mes études.*
- *A mes sœurs qui me sont très chères.*
- *A mon frère*
- *A tous mes amis*
- *A toutes la promotion énergie renouvelable : 2021/2022*

**MEHDI**

# Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail :*

*A mes parents, en témoignage de leur affection, et leurs  
encouragements, à tous mes amis et à toute la promotion  
énergie renouvelable.*

**YASSER**

# ***Remerciements***

*En préambule à ce mémoire, nous souhaitons adresser tous nos remerciements au bon dieu qui nous a donné la volonté et le courage pour la réalisation de notre projet ainsi aux personnes qui nous ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire*

*Nos remerciements s'adressent tout d'abord à notre encadrante Me **BENHABIB LOUBNA ET Mr SAIM RACHID** pour l'aide et temps qu'ils ont bien voulu nous consacrer et sans qui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour.*

*Aussi, nous adressons nos remerciements à Mr **AZZI AHMED** d'avoir accepté de présider notre travail, ainsi Me **MOSTAFAOUI Amina** de vouloir examiner notre mémoire.*

***Nous remercions également :***

*Aux enseignants de la section génie mécanique et toute la promo d'énergie renouvelable*

## ملخص

الطاقة الشمسية الكهروضوئية هي تحول مباشر لجزء من الإشعاع الشمسي إلى طاقة كهربائية. يتم تحويل الطاقة هذا عن طريق خلية شمسية تعتمد كفاءتها على نطاق الطيف الشمسي الممتص. في الوقت الحاضر، يتم استخدام الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة بشكل متزايد بشكل أساسي بسبب تكلفتها المنخفضة. يتكون هذا العمل من محاكاة ونمذجة خلية شمسية بناءً على مادة GaAs. تم إجراء المحاكاة بواسطة الأداة الرياضية Matlab. بدأت الدراسة بتأثير ثلاثة معلمات على خصائص  $I(V)$  و  $P(V)$  للخلية، وهي العامل المثالي ومعامل الامتصاص وكثافة الإلكترون. سمحت لنا النتائج التي تم الحصول عليها بنمذجة خلية تعتمد على GaAs بعائد 29.8%. ثم استمرت محاكاتها بدراسة حقيقية تكون درجات حرارتها وشدتها الشمسية في شهري يناير وديسمبر لعام 2021 في منطقة تلمسان. أو العائد لينخفض قليلاً ليصبح 24.3%.

**الكلمات الرئيسية:** الخلايا الشمسية ؛ GaAs ؛ محاكاة، كهروضوئية

## Résumé

L'énergie solaire photovoltaïque est une transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule solaire dont le rendement dépend de la gamme du spectre solaire absorbé. De nos jours, les cellules solaires à couches minces sont de plus en plus utilisées principalement en raison de leur faible coût. Ce travail consiste à simuler et modéliser une cellule solaire à base du matériau **GaAs**. La simulation a été réalisée par l'outil mathématique Matlab. L'étude a débuté par l'influence de trois paramètres sur les caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$  de la cellule, qui sont le facteur d'idéalité, le coefficient d'absorption et la densité d'électrons. Les résultats obtenus nous ont permis de modéliser une cellule à base de GaAs avec un rendement de 29.8%. ensuite notre simulation a poursuivi par une étude réel dont les températures et intensités solaires sont celles des mois de janvier et décembre pour l'année 2021 dans la région de Tlemcen. Ou le rendement à légèrement diminuer pour devenir 24.3%

**Mots clés :** cellule solaire ; GaAs ; simulation, photovoltaïque

# Abstract

Photovoltaic solar energy is a direct transformation of part of the solar radiation into electrical energy. This energy conversion is carried out by means of a solar cell whose efficiency depends on the range of the solar spectrum absorbed. Nowadays, thin-film solar cells are increasingly used mainly because of their low cost. This work consists in simulating and modeling a solar cell based on the GaAs material. The simulation was carried out by the mathematical tool Matlab. The study began with the influence of three parameters on the I(V) and P(V) characteristics of the cell, which are the ideal factor, the absorption coefficient and the electron density. The results obtained allowed us to model a cell based on GaAs with a yield of 29.8%. then our simulation continued with a real study whose temperatures and solar intensities are those of January and December for the year 2021 in the Tlemcen region. Or yield to slightly decrease to become 24.3%

**Keywords:** solar cell; GaAs; simulation, photovoltaic

# SOMMAIRE

*Dédicaces*

*Remerciements*

*Résumé*

*Sommaire*

*Liste des figures*

*Liste des tableaux*

*Nomenclature*

Introduction générale..... [1]

## **CHAPITRE I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques**

|  |      |
|--|------|
| Introduction.....                                      | [5]  |
| I. Historique.....                                     | [5]  |
| II. Rayonnement solaire .....                          | [7]  |
| III. Effet photovoltaïque .....                        | [9]  |
| IV. Fonctionnement des cellules photovoltaïques.....   | [10] |
| V. Paramètres photovoltaïques.....                     | [12] |
| V.1. Caractéristiques I(V) d'une cellule solaire ..... | [12] |
| V.2. Influence des résistances... ..                   | [15] |
| V.3. Association des cellules.....                     | [16] |
| V.4. Diodes de by-pass.....                            | [18] |
| VI. Problématiques photovoltaïques... ..               | [19] |
| Conclusion.....  | [21] |

## **CHAPITRE II : Filières technologiques des cellules photovoltaïque**

|  |      |
|--|------|
| Introduction... ..   | [23] |
| I. Technologies des cellules solaires... ..                          | [23] |
| I.1. Cellules solaire de première génération .....                   | [24] |
| I.2. Cellules solaire de deuxième génération (couche mince)... ..    | [26] |
| I.3. Technologie des cellules solaires de troisième generation... .. | [32] |
| I.4. Photovoltaïque à concentration... ..                            | [38] |
| II. Exemple de fabrication d'une cellule solaire.....                | [39] |
| Conclusion.....  | [40] |

## **CHAPITRE III : Simulation du modèle d'une cellule solaire en GaAs**

|                                    |      |
|------------------------------------|------|
| Introduction... ..                 | [43] |
| I. Propriétés du GaAs... ..        | [43] |
| I.1. Propriétés structurales... .. | [43] |

|  |      |
|--|------|
| I.2. Structure électronique de bande .....   | [44] |
| I.3. Différentes propriétés du GaAs.....   | [45] |
| I.4. Défauts intrinsèques.....   | [46] |
| I.5. Avantages et inconvénients.....   | [47] |
| II. Modélisation de la cellule solaire GaAs.....                                   | [48] |
| II.1. Structure de la cellule.....   | [48] |
| II.2. Méthode de calcul.....   | [49] |
| III. Interprétation des résultats.....   | [50] |
| III.1. Caractéristiques I(V) et P(V) de la cellule .....                           | [50] |
| III.2. Influence du facteur d'idéalité.....  | [51] |
| III.3. Influence du coefficient d'absorption.....                                  | [51] |
| III.4. Influence de la concentration des électrons.....                            | [52] |
| III.5. Modélisation de la cellule GaAs... ..                                       | [53] |
| III.6. Caractéristiques I(V) et P(V) de la cellule modélisée dans le cas reel..... | [54] |
| Conclusion.....  | [56] |
| <br><b>Conclusion générale</b> .....   | [57] |
| <b>Références</b> .....  | [60] |

# *Liste des figures*

|  |      |
|--|------|
| <b>Figure I.1</b> : Découverte du photovoltaïque .....   | [7]  |
| <b>Figure I.2</b> : Spectre solaire .....  | [9]  |
| <b>Figure I.3</b> :Le principe du photovoltaïque.....  | [10] |
| <b>Figure I.4</b> :Principe de fonctionnement d'une cellule solaire .....  | [11] |
| <b>Figure I.5</b> :La jonction PN... ..  | [12] |
| <b>Figure I.6</b> :Schéma équivalent d'une cellule solaire .....   | [12] |
| <b>Figure I.7</b> :Caractéristiques I(V) –rouge- et P(V) –bleu .....   | [13] |
| <b>Figure I.8</b> :Détermination graphique des résistances Shunt et Série .....  | [16] |
| <b>Figure I.9</b> :Caractéristiques I(V) de Ns cellules en série.....  | [17] |
| <b>Figure I.10</b> : Caractéristiques I(V) de Np cellules en parallèle.....  | [17] |
| <b>Figure I.11</b> :Caractéristique d'un groupement hybride de cellules (Np+Ns).....   | [18] |
| <b>Figure I.12</b> :Implantation des diodes by-pass .....  | [19] |
|  |      |
| <b>Figure II.1</b> :Cellule solaire à base de silicium.....  | [26] |
| <b>Figure II. 2</b> : Comparaison des ions entre le silicium amorphe, poly-c et cristallin.....  | [27] |
| <b>Figure II.3</b> :Cellule Solaire CIGS.....  | [28] |
| <b>Figure II.4</b> :Structure cristalline de L'InP .....   | [30] |
| <b>FigureII.5</b> :Cellule photovoltaïque GaInP.....   | [31] |
| <b>Figure II.6</b> : Courbure montre les différentes technologies et leurs rendements... ..  | [31] |
| <b>Figure II.7</b> : Cellule Solaire Organique.....  | [35] |
| <b>Figure II. 8</b> :(A) Structure typique de la cellule solaire polymère. (B) Niveau de diagramme d'énergie et transport de charge dans une cellule solaire polymère..... | [36] |
| <b>Figure II.9</b> : Cellule à colorant à base de TiO.....   | [37] |
| <b>Figure II.10</b> : Système LCPV Zytech... ..  | [38] |
|  |      |
| <b>Figure III.1</b> : Structure cristalline du GaAs... ..  | [43] |
| <b>Figure III.2</b> : Structure de bande de GaAs... ..   | [44] |
| <b>Figure III.3</b> : Structure de la cellule solaire GaAs... ..   | [48] |
| <b>Figure III.4</b> : Interface de notre programme sur Matlab... ..  | [49] |
| <b>Figure III.5</b> : Caractéristique I(V) de la cellule... ..   | [50] |
| <b>Figure III.6</b> : Caractéristique I(V) de la cellule... ..   | [50] |
| <b>Figure III.7</b> : Influence de n sur I(V) et P(V)à T=298K, $\Phi=1000\text{W/m}^2$ .....   | [51] |
| <b>Figure III.8</b> : Influence de $\alpha$ sur I(V) et P(V) à T=298K, $\Phi=1000\text{W/m}^2$ .....   | [52] |
| <b>Figure III.9</b> : Influence de n0 sur I(V) et P(V) à T=298K, $\Phi=1000\text{W/m}^2$ .....   | [53] |
| <b>Figure III.10</b> : Caractéristiques I(V) et P(V) pour la cellule modélisée à T=298K, $\Phi=1000\text{W/m}^2$ .....   | [54] |
| <b>Figure III.11</b> : variation du rayonnement solaire annuel (année 2021) .....  | [55] |
|  |      |
| <b>Figure III.12</b> : Caractéristiques I(V) et P(V) pour la cellule modélisée ; (a) en Décembre, (b) en Juin... ..  | [55] |

# *Liste des tableaux*

**Tableau II.1** Comparaison des différentes générations de cellules solaires.....[24]

**Tableau III.1** : Quelques propriétés électriques du GaAs.....[45]

**Tableau III.2** : Propriétés chimiques du GaAs... ..[45]

**Tableau III.3** : Quelques propriétés thermiques du GaAs... ..[46]

**Tableau III.4** : Propriétés optiques du GaAs... ..[46]

**Tableau III.5** : Propriétés mécaniques du GaAs... ..[46]

**Tableau III.6** : Comparaison entre théorie et expérimental... ..[48]

**Tableau III.7** : Propriétés de la cellule GaAs... ..[49]

**Tableau III.8** : Comparaison entre cellule théorique et cellule modélisée .....[54]

# *Nomenclature*

|  |                                     |
|--|-------------------------------------|
| <b>PV</b>  | Photovoltaïque                      |
| <b>DSSC</b>  | Dye Sensitize Solar Cells           |
| <b>CIGS</b>  | Cuivre, indium, gallium et sélénium |
| <b>TCO</b>   | Oxydes conducteurs transparents     |
| <b>ITO</b>   | Oxyde d'étain dopé Indium           |
| <b>FTO</b>   | Oxyde d'étain dopé Fluor            |
| <b>AM</b>  | Air Mass                            |
| <b>ZCE</b>   | Zone de charge d'espace             |
| <b><math>V_{co}</math></b>                         | Tension en circuit ouvert           |
| <b><math>I_{cc}</math></b>                         | Courant court-circuit               |
| <b>MPP</b>   | Maximal power point                 |
| <b><math>V_{opt}</math> (<math>V_{mp}</math>)</b>  | Tension optimal                     |
| <b><math>I_{opt}</math> (<math>I_{mpp}</math>)</b> | Courant optimal                     |
| <b><math>P_m</math></b>                            | Puissance maximal                   |
| <b>FF</b>  | Facteur de forme                    |
| <b><math>\eta</math></b>                           | Le rendement                        |
| <b><math>P_{in}</math></b>                         | Puissance lumineuse incidente       |
| <b>EQE</b>   | Rendement quantique externe         |
| <b>IQE</b>   | Rendement quantique interne         |
| <b>K</b>   | Constant de boltzmann               |
| <b><math>I_{ph}</math></b>                         | Photo-courant                       |
| <b><math>R_s</math></b>                            | Résistance série                    |
| <b><math>R_{sh}</math></b>                         | Résistance shunt                    |
| <b><math>I_d</math></b>                            | Courant délivré                     |
| <b><math>I_{sc}</math></b>                         | Courant court-circuit               |

# **INTRODUCTION GENERALE**

## Introduction générale

Les cellules solaires sont des dispositifs à semi-conducteur qui transfèrent la lumière en énergie électrique utilisable. Ces dispositifs ont été initialement étudiés dès 1839 par Antoine- César Becquerel qui a remarqué que si la lumière brille sur des diodes cela induit un courant électrique. Depuis la création de la première cellule solaire rentable, la recherche sur la technologie et l'amélioration de l'efficacité des cellules solaires a augmenté rapidement. L'accent mis récemment sur l'utilisation des énergies renouvelables et le besoin de puissance dans les régions éloignées telles que l'espace a mis cette recherche dans le premier rang.

Le rendement des cellules solaires photovoltaïques est intimement lié aux propriétés des matériaux dont ils sont faits, et de nombreux problèmes de science des matériaux rencontrés dans la compréhension des cellules solaires existantes et le développement des cellules plus efficaces, moins coûteuses et plus stables.

Chaque matériau semi-conducteur dans un environnement électronique approprié est capable d'exposer des propriétés qui peuvent correctement être appelées « photovoltaïques », c'est-à-dire la production d'un courant électrique et une différence de potentielle sous l'illumination absorbé. Ce qui peut être considéré comme surprenant c'est que si peu de matériaux sont connus qui sont capables de former des dispositifs photovoltaïques avec un rendement suffisant pour les rendre d'un intérêt potentiel pour des applications pratiques. Il est encore à noter que seuls les matériaux suivants ont montré une efficacité solaire supérieure à dix pour cent: silicium *Si*, arséniure de gallium *GaAs*, le phosphore d'indium *InP*, le tellure de cadmium *CdTe*, de cuivre di séléniure d'indium *CuInSe<sub>2</sub>* et le sulfure cuivreux *CuS*.

L'efficacité des cellules solaires s'est améliorée au fil du temps en augmentant le nombre de jonctions. Chaque jonction est capable d'extraire l'énergie d'une partie du spectre solaire. Une nouvelle voie pour améliorer l'efficacité consiste à utiliser des matériaux photovoltaïques à base d'alliage tels que l'arséniure de gallium (GaAs).

Les cellules solaires à base de GaAs ont des avantages significatifs supplémentaires. En comparaison avec les cellules solaires en silicium, Le GaAs possède des propriétés électroniques qui sont supérieures à celles du silicium. La vitesse de saturation des électrons est plus élevée et leur mobilité est une plus grande. Relativement aux cellules de silicium, un autre avantage de GaAs est dans le fait qu'il présente un gap d'énergie direct, ce qui signifie qu'il peut être utilisé

## **Introduction générale**

pour émettre de la lumière de façon efficace.

Dans ce travail, nous allons optimiser le rendement de la cellule GaAs. Pour cela, nous allons procéder à un modèle qui permettra l'obtention des performances optimales de la cellule. D'où nos résultats sont générés par une simulation qui est mise en place par l'utilisation du logiciel Matlab.

Le mémoire est structuré de quatre chapitres initialisé par une introduction et clôturé par une conclusion générale.

Dans le premier chapitre, nous présentons une généralité sur les cellules photovoltaïque, d'où l'effet photovoltaïque et le fonctionnement d'une cellule solaire avec les différentes filières des cellules photovoltaïques. Ensuite, le deuxième chapitre est consacré à se familiarisé avec le matériau GaAs. Cependant, lors du quatrième chapitre nous évacuerons la partie liées à la simulation de la cellule solaire à base de GaAs et discuter nos résultats obtenus.

# **CHAPITRE I**

## **Généralités sur les systèmes photovoltaïques**

### Introduction

Un système photovoltaïque (PV) est capable de fournir de l'énergie électrique à une charge donnée en convertissant l'énergie solaire par effet photovoltaïque. La structure du système est très souple. Un équipement supplémentaire est nécessaire pour transformer l'énergie en une forme utile ou stocker de l'énergie pour une utilisation future.

Pour ce premier chapitre, nous allons nous intéresser à l'énergie photovoltaïque et le principe de fonctionnement avec les paramètres de la cellule solaire. Ainsi aux problématiques rencontrées.

### I. Historique

En 1839, Edmond Becquerel découvre l'effet photoélectrique, le principe physique à la base de la production d'énergie solaire photovoltaïque. [1]

En 1953, le physicien Gerald Pearson et le chimiste Calvin Fuller, des laboratoires Bell, arrivent à réaliser la première cellule solaire à base de silicium. Cette cellule est capable de transformer les rayons du soleil en électricité. Pendant ce temps, un autre scientifique des mêmes laboratoires, Daryl Chapin, fait des recherches sur la possibilité de produire de l'énergie dans les zones humides où les batteries traditionnelles se dégradent rapidement. Il s'intéresse alors au photovoltaïque comme alternative et reprend la découverte de Pearson et Fuller. Après plusieurs améliorations il parvient à réaliser en 1954 une cellule solaire avec une efficacité de 6 %, soit au-dessus de l'efficacité limite qu'il s'était donnée pour que la cellule soit une source d'énergie intéressante (5,7 %). Mais face au prix très élevé du silicium, cette technologie peine à apparaître dans le monde industriel. [2]

En 1954, les laboratoires Bell présentent la première cellule photovoltaïque qui alimente des appareils électriques domestiques. Les panneaux photovoltaïques trouvent leur première application dans le cadre de la course à l'espace. L'armée américaine veut les utiliser dans le cadre d'un projet secret : les satellites. La Navy, qui s'est vu donner la responsabilité d'envoyer le premier satellite américain, équipe son satellite, le Vanguard I, d'une batterie électrochimique et de panneaux solaires. Il est lancé le 17 mars 1958. Alors que la batterie s'épuise en 1 semaine environ, les cellules solaires continuent à produire de l'électricité pendant des semaines. Malgré ce succès, la Nasa refuse de voir le photovoltaïque comme une solution suffisamment efficace pour les satellites.

## Généralités sur les systèmes photovoltaïques

Durant les années 1960, l'usage du photovoltaïque pour les satellites se généralise. Embarqués à bord des lanceurs puis déployés en orbite autour de la terre, les panneaux photovoltaïques démontrent leur robustesse et leur fiabilité. Dans le cadre de course à l'espace, le gouvernement a dépensé environ 50 millions de dollars dans la R&D pour l'énergie solaire entre 1958 et 1969.

A partir des années 1970, les panneaux photovoltaïques se développent sur des applications terrestres et maritimes. Ils permettent de fournir de l'énergie à des sites isolés qui ne sont pas desservis par un réseau électrique comme les balises en pleine mer ou les relais de télécommunication en plein désert. Les panneaux photovoltaïques sont utilisés dans les conditions les plus extrêmes. En mer, ils sont exposés aux tempêtes et à la corrosion saline. Dans les déserts, ils subissent des températures extrêmes et des cycles thermiques très exigeants avec des nuits très froides suivies de fortes chaleurs le jour. Le premier bâtiment alimenté uniquement par l'énergie solaire voit le jour à Albuquerque au Nouveau Mexique en 1974. Ce qui semblait impensable est devenu une réalité : l'énergie solaire peut répondre à l'intégralité des besoins énergétiques d'un bâtiment.

Après la signature des accords de Kyoto en 1997, des réflexions sont menées dans les grands pays développés pour trouver des solutions concrètes au problème d'émission de gaz à effet de serre. Il s'agit notamment de réduire notre consommation aux énergies fossiles. Le solaire photovoltaïque est identifié comme l'une des technologies les plus prometteuses [3]. Afin de compenser son coût encore élevé, des mécanismes d'incitations financières sont mis en place au Japon et en Allemagne dès l'année 2000 puis progressivement dans la plupart des grands pays développés. Ces incitations passent souvent par le principe du « tarif d'achat » : l'électricité produite par des panneaux photovoltaïques est achetée à un prix fixe et supérieur à celui du marché pendant une durée suffisante pour assurer la rentabilité de l'investissement. C'est le début du développement du solaire raccordé au réseau.

## Généralités sur les systèmes photovoltaïques

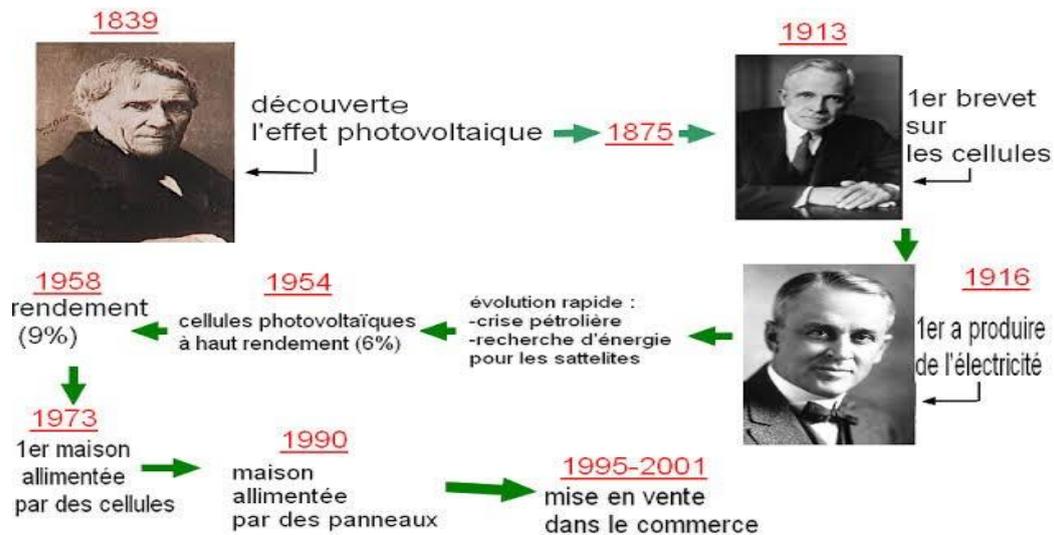


Figure I.1 Découverte du photovoltaïque

Depuis 2012, le solaire photovoltaïque devient compétitif région après région. Si dans un premier temps, seules les régions bénéficiant d'un fort ensoleillement et d'un prix de l'électricité élevé, comme la Californie ou l'Italie, étaient concernées, ce sont aujourd'hui toutes les régions du monde qui connaissent un développement du photovoltaïque pour produire une électricité propre, moins chère, au plus près du lieu de consommation et par le consommateur lui-même.

Les mécanismes d'incitation ont permis d'accélérer la croissance de l'industrie photovoltaïque. Le nombre de panneaux solaires en production dans le monde a été multiplié par 2500 entre 1996 et 2016. Cette croissance exponentielle du marché mondial a favorisé l'apparition de nouveaux fabricants et a conduit à des investissements massifs en recherche et développement. Ces efforts ont permis d'améliorer le rendement des panneaux et d'optimiser les procédés de fabrication.

## II. Rayonnement solaire

Le soleil est l'étoile centrale du système solaire dans lequel se trouve la Terre. Il a la forme d'une grande boule de gaz incandescente, dont la composition chimique est principalement composée d'hydrogène et d'hélium, mais aussi d'autres éléments qui s'y trouvent dans une moindre mesure, comme l'oxygène, le carbone, le fer, le néon, l'azote, le silicium, le magnésium et le soufre.

## Généralités sur les systèmes photovoltaïques

L'énergie du Soleil parvient à la Terre sous forme de rayonnement solaire. Des réactions nucléaires ont lieu à l'intérieur du Soleil, au cours desquelles l'hydrogène est transformé en hélium par un processus de fusion, accompagné d'une libération de grandes quantités d'énergie, où la température atteint 15 millions de °C. Une partie de cette énergie arrive sur Terre sous forme de chaleur et de lumière et permet tous les processus, de la photosynthèse à la production d'électricité dans les systèmes photovoltaïques. [4]

Dans des conditions optimales, la surface de la terre peut obtenir 1 000 W/m<sup>2</sup>, alors que la valeur réelle dépend de l'emplacement, c'est-à-dire de la latitude, des paramètres climatologiques de l'emplacement tels que la fréquence de la couverture nuageuse et de la brume, de la pression atmosphérique, etc. [5]

Cependant, en considérant l'ensoleillement et la productivité des systèmes photovoltaïques, il est nécessaire de comprendre les concepts suivants :

- **Irradiation**, densité moyenne de la puissance de rayonnement solaire, qui est égale au rapport entre la puissance du rayonnement solaire et la surface du plan perpendiculaire à la direction de ce rayonnement (W/m<sup>2</sup>).
- **Rayonnement**, qui représente la quantité de rayonnement solaire qui est rayonnée sur la surface unitaire à un moment donné (Wh/m<sup>2</sup>) ou (J/m<sup>2</sup>). En plus de l'exprimer en valeurs horaires, elle est souvent exprimée en rayonnement quotidien, mensuel ou annuel, selon l'intervalle de temps.

Le rayonnement solaire s'affaiblit lors de sa traversée de l'atmosphère terrestre en raison de l'interaction avec les gaz et les vapeurs de l'atmosphère et arrive à la surface de la terre sous forme directes et diffuses. Dans le cas d'une surface inclinée, le rayonnement rejeté ou réfléchi doit être ajouté au rayonnement direct et diffus. Le rayonnement rejeté peut être réfléchi par le sol ou l'eau.

Le spectre standard à la surface de la Terre est appelé AM1.5G (le G signifie global et inclut à la fois le rayonnement direct et diffus) ou AM1.5D (qui inclut uniquement le rayonnement direct). L'intensité du rayonnement AM1.5D peut être approchée en réduisant le spectre AM0 de 28 % (18 % dû à l'absorption et 10 % à la diffusion) [6]. Le spectre global est supérieur de 10 % au spectre direct.[7]

$$AM = \frac{1}{\sin\theta} \quad (I.1)$$

## Généralités sur les systèmes photovoltaïques

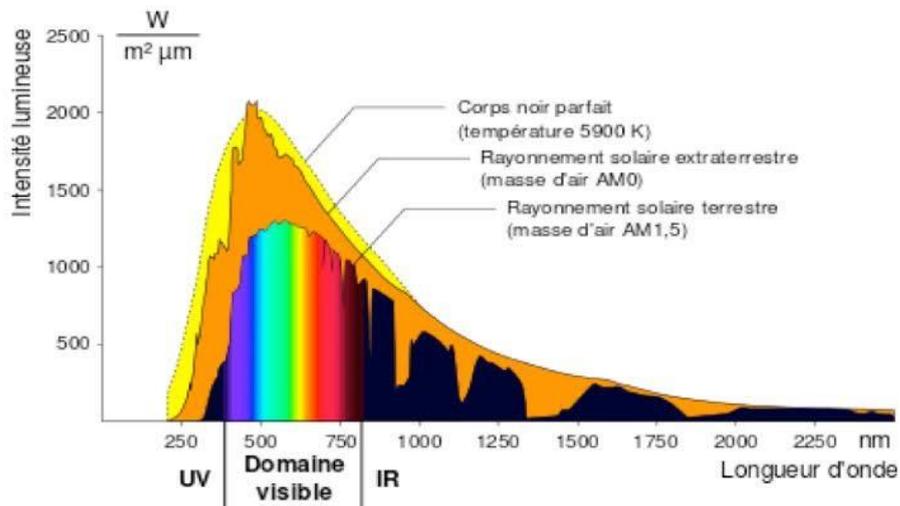


Figure I.2 Spectre solaire

### III. Effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est le phénomène qui associe les mécanismes d'absorption des radiations solaires et l'action d'un champ électrique qui produit une barrière de potentiel dans une jonction. Le rôle de ce champ est de séparer les porteurs générés avant qu'ils ne se recombinent. [8]

Une explication adéquate de l'effet photovoltaïque exige l'application de la théorie quantique de la lumière, laquelle considère que la lumière est constituée d'une énergie discrète constituée de photons [9]. Le processus photovoltaïque varie en fonction du type de technologie solaire, mais il existe quelques étapes communes à toutes les cellules solaires photovoltaïques.

➤ **Étape 1 :** *La lumière est absorbée par la cellule PV et libère les électrons*

Tout d'abord, la lumière frappe une cellule photovoltaïque et les photons sont absorbés par le matériau semi-conducteur dont elle est faite (généralement du silicium). Cette énergie lumineuse entrante provoque la libération d'électrons dans le matériau, qui deviendront éventuellement l'électricité solaire que vous pourrez utiliser.

➤ **Étape 2 :** *Les électrons commencent à circuler, créant un courant électrique*

Il y a deux couches de matériau utilisées dans les cellules photovoltaïques, et chacune est spécialement traitée (connue sous le nom de « dopage ») pour créer un champ électrique, ce qui signifie qu'un côté a une charge positive nette et l'autre a une charge négative nette. Ce

## Généralités sur les systèmes photovoltaïques

champ électrique fait circuler des électrons libres dans une direction à travers la cellule solaire, générant un courant électrique.

➤ **Étape 3** : Le courant électrique est capté et combiné avec d'autres cellules solaires

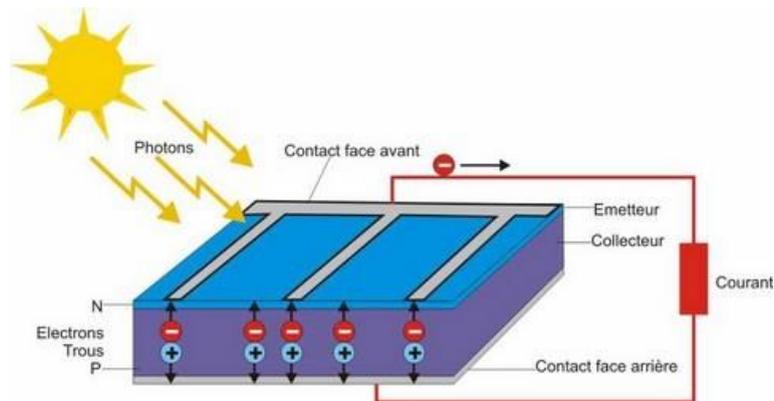
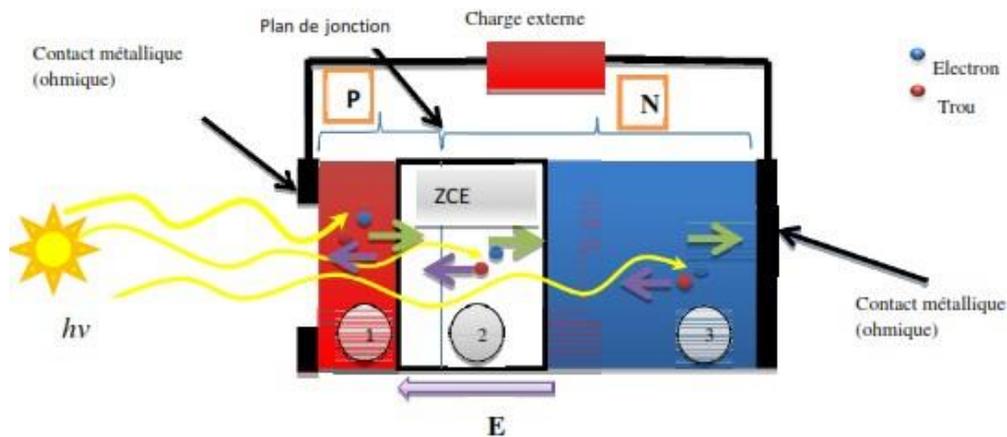


Figure I.3 Principe du photovoltaïque [11]

### IV. Fonctionnement des cellules photovoltaïques

Une cellule solaire (également appelée cellule photovoltaïque ou cellule PV) est définie comme un appareil électrique qui convertit l'énergie lumineuse en énergie électrique grâce à l'effet photovoltaïque. Une cellule solaire est essentiellement une diode à jonction p-n. Les cellules solaires sont une forme de cellule photoélectrique, définie comme un dispositif dont les caractéristiques électriques – telles que le courant, la tension ou la résistance – varient lorsqu'elles sont exposées à la lumière.

## Généralités sur les systèmes photovoltaïques



**Figure I.4** Principe de fonctionnement d'une cellule solaire [8]

Lorsque la lumière atteint la jonction p-n, les photons lumineux peuvent facilement pénétrer dans la jonction, à travers une très fine couche de type p. L'énergie lumineuse, sous forme de photons, fournit suffisamment d'énergie à la jonction pour créer un certain nombre de paires électron-trou. La lumière incidente rompt la condition d'équilibre thermique de la jonction. Les électrons libres dans la région d'appauvrissement peuvent rapidement arriver du côté de type n de la jonction. De même, les trous dans l'appauvrissement peuvent rapidement arriver du côté de type p de la jonction. Une fois, les électrons libres nouvellement créés arrivent du côté de type n, ne peuvent plus traverser la jonction en raison du potentiel de barrière de la jonction.

De même, les trous nouvellement créés une fois arrivés du côté de type p ne peuvent plus traverser la jonction devenue du même potentiel de barrière de la jonction. Au fur et à mesure que la concentration d'électrons devient plus élevée d'un côté, c'est-à-dire du côté de type n de la jonction et que la concentration de trous augmente d'un autre côté, c'est-à-dire du côté de type p de la jonction, la jonction p-n se comportera comme une petite cellule de batterie. Une tension est établie qui est connue sous le nom de tension photo. Si nous connectons une petite charge à travers la jonction, il y aura un petit courant qui la traversera [12].

## Zone de charge d'espace : jonction des couches p-n

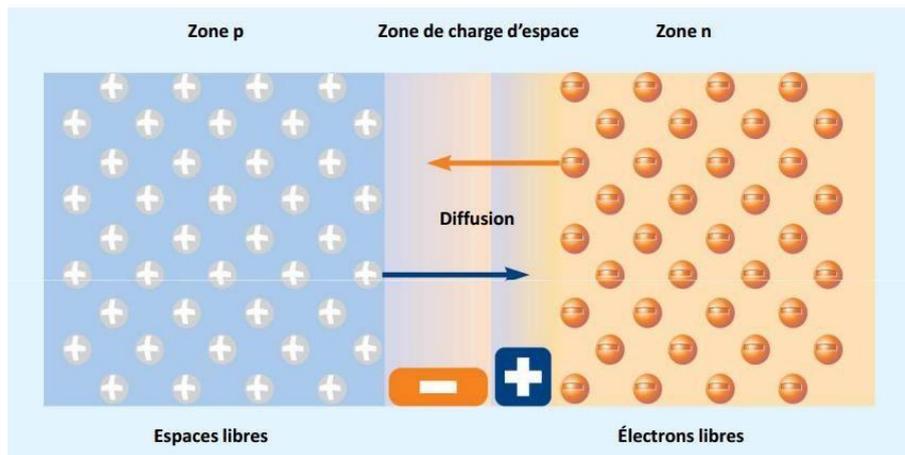


Figure I.5 Jonction PN [13]

## V. Paramètres photovoltaïques

### V.1. Caractéristiques I(V) d'une cellule solaire

Si l'on considère le cas simple d'une cellule idéale à jonction donneur-accepteur soumise à un flux lumineux, celle-ci fonctionne comme un générateur de courant. Sa caractéristique est comparable à celle d'une cellule photovoltaïque en silicium. Son schéma équivalent est représenté (figure I.6) par une diode idéale montée en parallèle avec une source de courant. Les résistances séries  $R_s$  et shunt  $R_p$  modélisent les pertes engendrées par la résistivité des couches et la présence de courant de fuite.

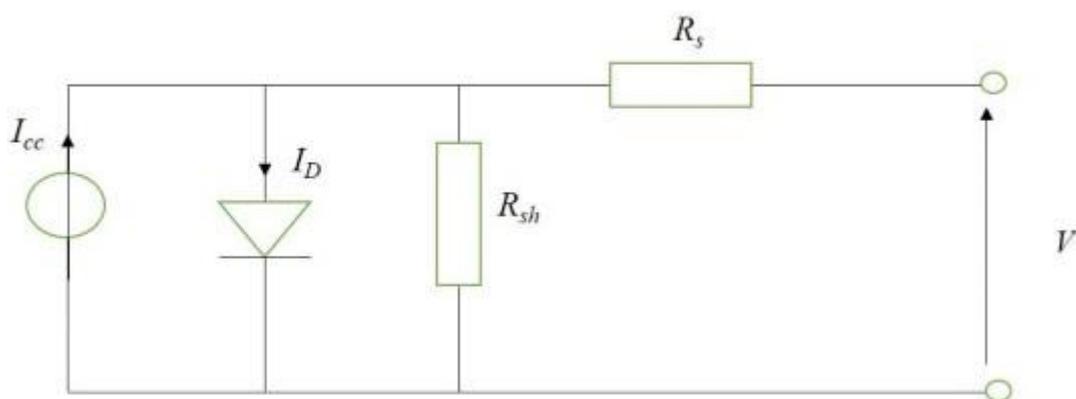


Figure I.6 Schéma équivalent d'une cellule solaire

Les performances de la cellule solaire sont présentées à travers la caractéristique courant-tension I(V). Cette dernière apporte une lecture claire des paramètres caractérisant la cellule

## Généralités sur les systèmes photovoltaïques

solaire, comme le rendement de la cellule, les différents types des résistances parasites et le facteur de forme. Ces caractéristiques peuvent être utilisées pour contrôler et commander les paramètres physiques de la cellule tels que le dopage et l'épaisseur des couches. Le courant est mesuré en fonction de la tension appliquée sous obscurité et sous ensoleillement, la lumière permet de décaler la courbe I-V vers le bas dans le quatrième quadrant, car le courant photoélectrique provoque la production de l'énergie. [8]

Toute cellule photovoltaïque est caractérisée par une courbe courant-tension (I-V) représentant l'ensemble des configurations électriques que peut prendre la cellule. Trois grandeurs physiques définissent cette courbe.

- **Tension à circuit ouvert  $V_{co}$**  Cette valeur représenterait la tension générée par une cellule éclairée non raccordée.
- **Puissance maximale MPP** (en anglais : maximal power point) obtenu pour une tension et un courant optimaux :  $V_{opt}$ ,  $I_{opt}$  (parfois appelés aussi  $V_{mpp}$ ,  $I_{mpp}$ ).

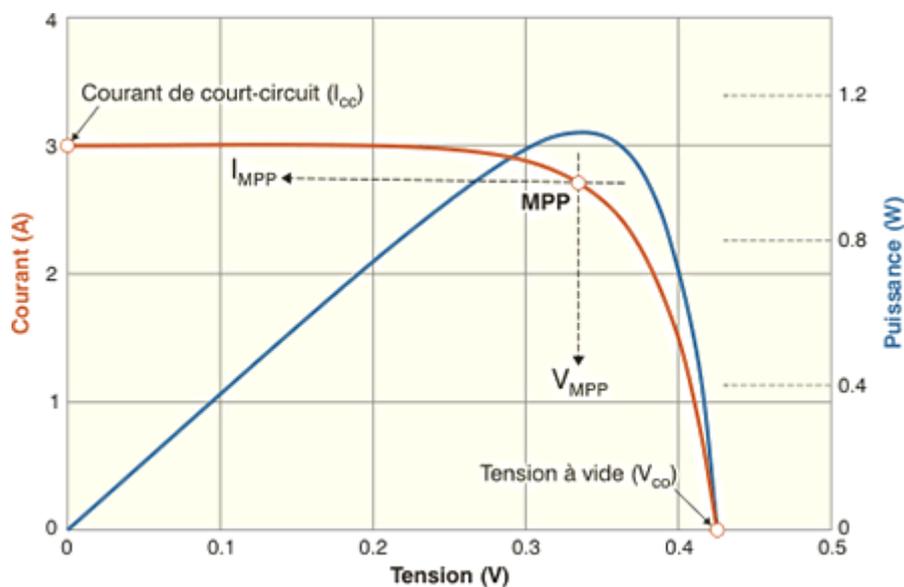


Figure I.7 Caractéristiques I(V) –rouge- et P(V) –bleu-

Pour permettre une comparaison de l'efficacité de différentes cellules, on définit ces caractéristiques dans des conditions de test bien précises (STC = Standard Test Conditions). Ces conditions sont : émission lumineuse de 1 000 W/m<sup>2</sup>, température de 25 °C, conditions spectrales Air Mass 1.5 (composition du spectre identique au spectre solaire lorsqu'il traverse

## Généralités sur les systèmes photovoltaïques

une épaisseur et demie d'atmosphère, ce qui correspond à un angle d'incidence de  $41.8^\circ$  par rapport à l'horizontale). Actuellement, les cellules présentent des valeurs de l'ordre de 0.5V-3.5A-2.1 Wc.

Les relations caractérisantes le fonctionnement de la cellule sont présentées comme suit [14] :

Le courant  $I$  délivré par la cellule est donné par la loi de Kirchhoff :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad I.2$$

De même, la tension aux bornes de la diode  $V_D$  est décrite comme étant la somme des tensions aux bornes de la cellule et aux bornes de la résistance en série:

$$V_D = V + R_s I \quad I.3$$

La caractéristique de la diode est décrite par l'équation de Schockley comme :

$$I_D = I_0 \exp\left(\frac{qV_D}{nkT} - 1\right) \quad I.4$$

En remplaçant les équations I.3, I.4 dans la première équation, on obtient la caractéristique de la cellule réelle sous éclaircissement (tenant compte d'autres paramètres) comme étant :

$$I = I_{ph} - I_0 \exp\left(\frac{q(V + R_s I)}{nkT} - 1\right) - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad I.5$$

Hors, dans l'obscurité les expériences ont montrées que la cellule suit le comportement d'une diode, ainsi la caractéristique d'une cellule idéale se représente par la relation suivante :

$$I = I_0 \exp\left(\frac{qV}{nkT} - 1\right) \quad I.6$$

 **Courant de court-circuit  $I_{sc}$**  : Correspond à l'intensité à une tension nulle aux bornes de la cellule. Elle est fonction de l'intensité lumineuse reçue par la cellule et les longueurs de diffusion des électrons et des trous. D'où :

$$I_{sc} = I_{ph} \quad I.7$$

## Généralités sur les systèmes photovoltaïques

✚ **Potentiel de circuit ouvert  $V_{OC}$**  : C'est la tension aux bornes de la cellule quand l'intensité dans le circuit est nulle. [15]

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln\left(1 + \frac{I_{ph}}{I_0}\right) \quad I.8$$

✚ **Puissance de fonctionnement  $P_{max}$**  : C'est le maximum de la courbe de puissance qui est essentielle pour évaluer la performance de la cellule.

$$P_m = I_m * V_m \quad I.9$$

✚ **Facteur de forme FF**: Il correspond au rapport entre la puissance maximale et le produit de ( $V_{OC}$ ,  $I_{SC}$ ). [16]

$$FF = \frac{P_m}{I_{sc} * V_{oc}} \quad I.10$$

✚ **Rendement  $\eta$**  : Il représente le rapport par la puissance maximale produite par la cellule et la puissance du rayonnement solaire qui arrive sur la cellule

$$\eta = \frac{P_m}{*S} G \quad I.11$$

### V.2. Influence des résistances

#### ➤ *Influence de la résistance en série $R_s$*

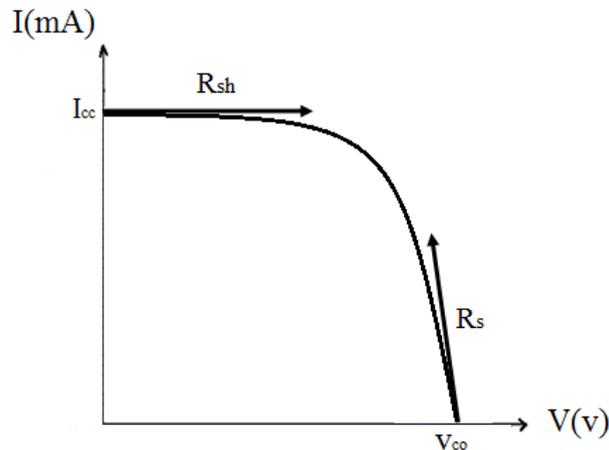
La résistance série caractérise les pertes par effets Joule de la résistance propre du semiconducteur et les pertes à travers les grilles de collectes et les mauvais contacts ohmiques de la cellule. Les contacts semi conducteur-électrodes à résistance élevée abaissent appréciablement la tension et le courant de sortie ce qui va limiter le rendement de conversion. [17]

#### ➤ *Influence de la résistance en parallèle $R_{sh}$*

La résistance parallèle (ou shunt) caractérise les pertes par recombinaison des porteurs dues aux défauts structuraux du matériau épaisseurs des régions N et P et de la zone de charge et d'espace.

## Généralités sur les systèmes photovoltaïques

L'existence de fissures et de défaut de structures complexes devient le siège de phénomène physique assimilable aussi à une résistance parallèle  $R_{sh}$ . L'ordre de grandeur de la résistance parallèle pour une cellule au Si :  $R_{sh} = 10^2$  à  $10^4 \Omega$ .  $R_{sh}$  augmente avec le groupement série de cellules solaires et diminue avec une connexion parallèle. [17]



**Figure I.8** Détermination graphique des résistances Shunt et Série

### V.3. Association des cellules

Dans les conditions standardisées de test, la puissance maximale pour une cellule de  $100 \text{ cm}^2$  (10 sur 10) tourne aux alentours de 1,25 Watt. Cette cellule constitue donc un générateur de très faible puissance, insuffisant pour les applications électriques courantes. Les modules sont donc réalisés par association, en série et/ou en parallèle, de cellules élémentaires. La connexion en série augmente la tension pour un même courant alors que la connexion en parallèle augmente le courant pour une tension identique. Pour que l'électricité générée soit utilisable pour nos applications électriques, il est donc nécessaire d'associer entre elles un grand nombre de cellules.

Les modules (généralement présentés sous forme de panneaux) sont constitués d'un certain nombre de cellules élémentaires placées en série afin de rendre la tension à la sortie utilisable. Ces modules sont ensuite associés en réseau (série-parallèle) de façon à obtenir les tensions/courants désirés.

## Généralités sur les systèmes photovoltaïques

### ➤ Association en série

Par association en série (appelée “String”), les cellules sont traversées par le même courant et la tension résultante correspond à la somme des tensions générées par chacune des cellules.

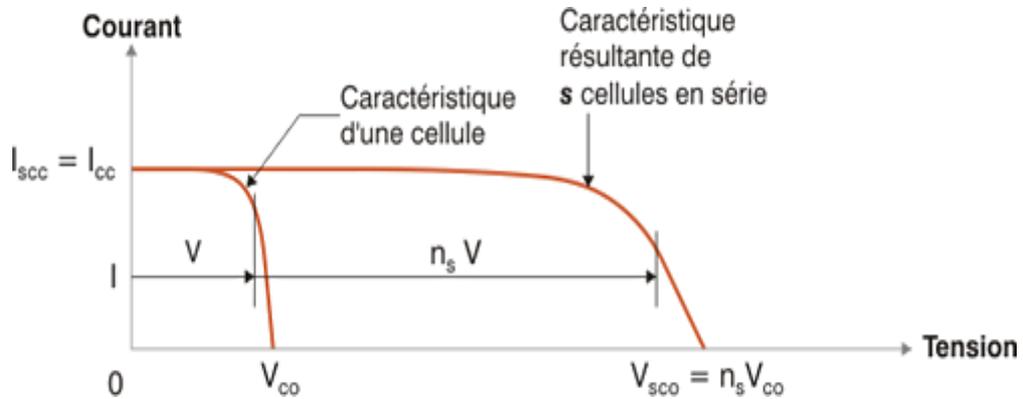


Figure I.9 Caractéristiques I(V) de Ns cellules en série

### ➤ Association en parallèle

Par association en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et le courant résultant correspond à la somme des courants générés par chacune des cellules.

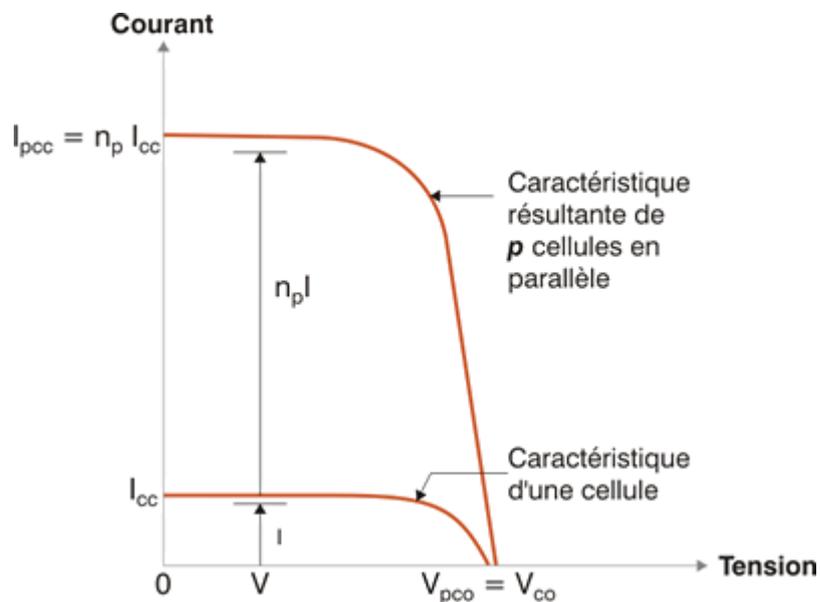


Figure I.10 Caractéristiques I(V) de Np cellules en parallèle

## Généralités sur les systèmes photovoltaïques

### ➤ Association hybride (en série et en parallèle)

Les caractéristiques globales d'une installation se déduisent donc d'une combinaison des caractéristiques des constituants des  $N_s \cdot N_p$ .

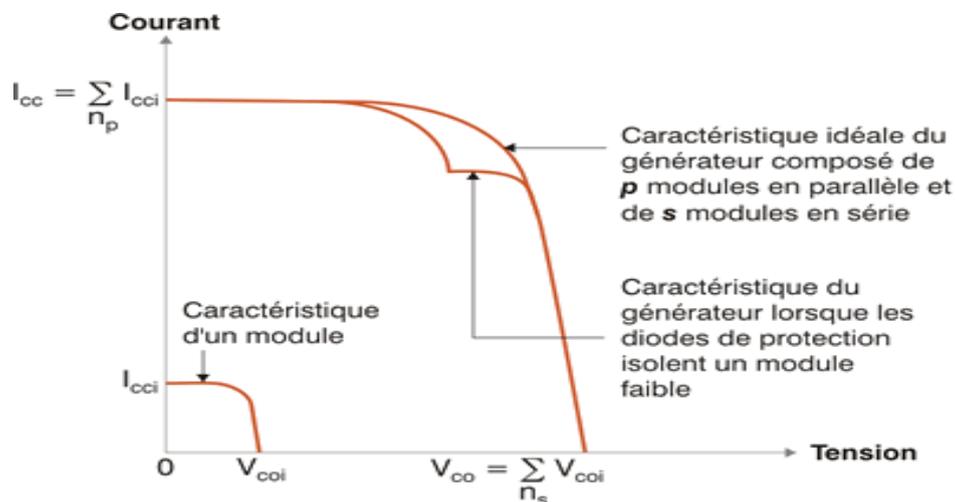


Figure I.11 Caractéristique d'un groupement hybride de cellules ( $N_p + N_s$ )

### V.4. Diodes de by-pass

Il arrive fréquemment que les cellules élémentaires qui composent le module ne présentent pas toutes la même courbe caractéristique au même moment. Les raisons peuvent être multiples : variété inévitable de fabrication, défaillance, différence d'éclairement ou de température (dus par exemple à un ombrage non uniforme du module, un encrassement, ...).

Sous certaines conditions, la cellule la plus faible peut alors se comporter comme une cellule réceptrice, dissipant la puissance générée par la cellule la plus forte. Celle-ci peut même être détruite si la contrainte ou la température devient trop importante. Pour éviter ce phénomène, on place des diodes de by-pass (empêchant tout courant ou tension inverses). Celles-ci sont placées en série lorsque les cellules sont connectées en parallèle et en parallèle lorsque les cellules sont connectées en série.

## Généralités sur les systèmes photovoltaïques



Figure I.12 Implantation des diodes by-pass

L'utilisation de ces by-pass induit néanmoins des perturbations de la courbe caractéristique, modifiant le point de puissance maximal du module :

Pour ne pas induire inutilement ces pertes, il est donc très important que ces diodes de by-pass soient utilisées et placées en cohérence avec les ombres générées par l'environnement du module.

### VI. Problématiques photovoltaïques

La plupart des dommages aux systèmes solaires sont causés par les tempêtes et la neige. Bien que les systèmes soient généralement considérés comme robustes et résistants aux intempéries, de fortes rafales de vent peuvent compromettre la stabilité de l'ensemble du système ou de gros grêlons peuvent briser une vitre collectrice. La foudre ou de fortes pluies peuvent causer des dommages particulièrement graves, car dans ces cas, l'ensemble du système électrique peut être affecté. Pour cela, quelques problématiques sont citées.[18]

#### ♣ Points chauds

Les points chauds sont des zones d'une cellule solaire dans une connexion en série d'un module qui se produisent en raison de l'ombrage. Cette cellule agit comme une résistance ohmique et chauffe, ce qui peut endommager la cellule. Afin de réduire cet effet (il ne peut pas être complètement évité), des diodes dites de dérivation sont installées dans le module.

Un point chaud apparaît comme une tache brunâtre qui peut même traverser la cellule et le panneau arrière du module. Les dérivations, tuyaux, antennes, etc., situés en

## Généralités sur les systèmes photovoltaïques

permanence très près du module sont problématiques, il faut les éviter à tout prix [19]. Les points chauds qui n'ont pas encore laissé de traces évidentes peuvent être localisés en prenant des photos avec une caméra thermique.

### ♣ Performances différentes sur des chaînes avec le même nombre de modules

Si les deux chaînes ne sont pas ombrées et que les conditions sont par ailleurs les mêmes, vous devriez vous inquiéter. Si cela est déterminé peu de temps après l'installation, la chose la plus évidente est qu'un module a été oublié de se connecter [19]. Cela arrive plus souvent que vous ne le pensez. Si l'erreur ne se produit qu'après que le système a fonctionné pendant une longue période, le technicien solaire doit être appelé pour commencer le dépannage. Les causes peuvent être de diverses natures.

### ♣ Performances se dégradent avec le temps

La dégradation normale des modules (diminution de l'efficacité au cours de la durée de vie du module) ne devrait être perceptible qu'après des années, à l'exception des modules à couches minces. Cependant, si les performances chutent après une période plus courte, le système doit être examiné de plus près.

La cause la plus simple peut être l'encrassement des modules, en particulier les systèmes sur les bâtiments agricoles ou à proximité d'usines ou les systèmes ferroviaires peuvent être affectés ici. Sinon, le technicien solaire devra inspecter à nouveau le système. Si aucune erreur ne peut être trouvée, les modules doivent être "flashés" soit par le fabricant, soit par un institut, c'est-à-dire que les performances doivent être déterminées.

### ♣ Dépannage de la boîte de jonction

Le dépannage des boîtes de jonction nécessite des mesures et des calculs actuels pour déterminer si les panneaux photovoltaïques fonctionnent correctement. En mesurant le courant sur des matrices individuelles ou en combinant des mesures de courant, vous pouvez déterminer si une cellule a mal fonctionné.

### ♣ Onduleur en surtension

Bien que ces appareils soient conçus pour résister à des tensions importantes, une surtension trop forte peut faire griller les circuits internes de l'onduleur. Si cela vous arrive, vous devez immédiatement contacter votre installateur afin qu'il prenne en charge ce problème.

## Généralités sur les systèmes photovoltaïques

Votre assurance devrait prendre en charge l'intervention et le remplacement de votre appareil. En effet, il s'agit généralement d'une erreur de la part du réseau Enedis.

### ♣ Panneau solaire qui baisse en rendement

C'est la panne la plus fréquente liée aux panneaux solaires. Si vous constatez que votre production d'électricité a diminué mais que l'onduleur fonctionne correctement, le problème de vos panneaux solaires peut alors provenir :

- D'un simple souci d'ombrage. Votre installation peut être partiellement recouverte de feuilles ou de branches. La végétation peut avoir poussé fortement, et sans que vous vous en rendiez compte, recouvre désormais vos panneaux.
- D'un problème d'étanchéité. Vos panneaux sont peut-être endommagés par des infiltrations.
- D'un encrassement de vos modules. Nous reviendrons plus en détail sur ce point.

Si vous avez vérifié tous ces points, mais que votre rendement continue à être très faible, vous êtes en droit de vous poser des questions. En effet, si vous constatez que votre production solaire est insuffisante par rapport à ce qui a été mentionné sur le devis, votre installation a peut-être un défaut caché ou une malfaçon. Il convient alors de vous tourner vers le SAV de l'installateur, qui pourra venir constater le faible rendement de vos panneaux. Une solution pourra alors être trouvée pour solutionner votre problème.

## Conclusion

Le long de ce chapitre, nous avons effectué une étude bibliographique et théorique de l'énergie photovoltaïque ainsi que la cellule solaire.

Cette initiation va nous permettre la compréhension du principe de la conversion photovoltaïque pour les différentes technologies qui vont être citées dans le chapitre suivant.

# **CHAPITRE II**

## **Filières technologiques des cellules photovoltaïques**

### Introduction

Lorsque la lumière brille sur une cellule photovoltaïque (PV) - également appelée cellule solaire - cette lumière peut être réfléchi, absorbée ou traverser la cellule. La cellule PV est composée d'un matériau semi-conducteur ; le "semi" signifie qu'il peut mieux conduire l'électricité qu'un isolant mais pas aussi bien qu'un bon conducteur comme un métal. Il existe plusieurs matériaux semi-conducteurs différents utilisés dans les cellules photovoltaïques.

L'efficacité d'une cellule PV est simplement la quantité d'énergie électrique sortant de la cellule par rapport à l'énergie de la lumière qui l'éclaire, ce qui indique l'efficacité de la cellule à convertir l'énergie d'une forme à l'autre. La quantité d'électricité produite à partir des cellules PV dépend des caractéristiques (telles que l'intensité et les longueurs d'onde) de la lumière disponible et des multiples attributs de performance de la cellule.

Dans ce second chapitre, nous allons nous focalisé sur les différentes filières photovoltaïques mises en études toutes ces années.

### I. Technologies des cellules solaires

Les technologies des cellules solaires peuvent être divisées en trois générations : cellule solaire de premier génération ( si, cellule solaire monocristallin et polycristallin), cellule solaire de deuxième génération couche mince (a-si, GaAs, GaInP, CIGS, InP, CdTe), cellule solaire de troisième génération jonction unique(Cellules solaires CZTS comprenant les matériaux CZTSe et CZTSSe, Cellules solaires sensibilisées aux colorants, Cellules solaires à points quantiques, Cellules solaires pérovskites, Cellules solaires organiques)

## Filières technologiques des cellules photovoltaïques

**Tableau II.1 Comparaison des différentes générations de cellules solaires [20]**

| Génération       | Matériaux utilisés   | Rendements   | Prix                          | Epaisseur          |
|------------------|--|--|-------------------------------|--------------------|
| 1 <sup>ère</sup> | Silicium mono et poly-cristallin massif  | 26.7%  | Moyen                         | ~200µm             |
| 2 <sup>ème</sup> | Couches minces<br>Silicium amorphe<br>CdTe, CIS, CIGS, CZTS  | 22.6%(CIGS)  | Bas                           | <10µm              |
| 3 <sup>ème</sup> | Couches minces avancées<br>(organiques, DSSC, pérovskites)<br><br>Nouveau concepts (porteurs chauds, concentration, tandem, multijonctions, thermoPV)<br><br>Architectures complexes<br>(Nanofils, nanoparticules, quantum dots) | 22.1%(pérovskites)<br><br>46%(multijonctions)<br><br>17.8%(nanofils) | Elevé mais dépend des techno. | Dépend des techno. |

### I.1. Cellules solaire de première génération

Ce sont des cellules solaires à base de tranches de Si cristallin. Fabriqué à partir de Si cristallin, la technique la plus coûteuse d'obtention de cristal de silicium pur est donc impliquée dans cette technologie. Ces cellules solaires sont utilisées dans le monde entier et elles ont le rendement commercial le plus élevé [20]. Environ 80% du marché des cellules solaires est basé sur cellules solaires monocristallines. Il a été rapporté par Zhao et al (1998) que les cellules solaires polycristallines ayant une structure en nid d'abeille ont une efficacité d'environ 19,8 %. Les cellules solaires polycristallines sont moins efficaces que les cellules solaires cristallines.

#### *Silicium mono*

Pendant près de 18 ans, la meilleure efficacité de la cellule solaire c-Si s'est établie à 25 %; cette cellule solaire de 4 cm<sup>2</sup> était basée sur la technologie dite de cellule solaire PERL.

## Filières technologiques des cellules photovoltaïques

Le silicium est, de loin, le matériau semi-conducteur le plus couramment utilisé dans les cellules solaires, représentant environ 95 % des modules vendus aujourd'hui. C'est également le deuxième matériau le plus abondant sur Terre (après l'oxygène) et le semi-conducteur le plus couramment utilisé dans les puces informatiques. Les cellules de silicium cristallin sont constituées d'atomes de silicium reliés les uns aux autres pour former un réseau cristallin. Ce réseau fournit une structure organisée qui rend la conversion de la lumière en électricité plus efficace.

Les cellules solaires en silicium offrent actuellement une combinaison de rendement élevé, de faible coût et de longue durée de vie. Les modules devraient durer 25 ans ou plus, produisant toujours plus de 80 % de leur puissance d'origine après cette période.

Pour minimiser la recombinaison non radiative aux surfaces due aux contacts, la technologie Si hétérojonction (SHJ) a été adoptée, où une mince couche de Si amorphe hydrogéné intrinsèque est introduit entre l'absorbeur, c-Si, et une couche a-Si n- ou p-dopée, pour dissocier la passivation de la collecte de charge. La cellule de c-Si, qui a maintenant un PCE de 26,7% (surface = 79 cm<sup>2</sup>), est un amalgame de concepts à partir de cellules d'hétérojonction de silicium (SHJ) et de l'interdigitated back contacts (IBC). Les progrès dans les technologies de traitement et le développement continu des matériaux pour l'industrie microélectronique pour obtenir des cristaux de Si de qualité électronique supérieure ont permis de réaliser la cellule c-Si actuelle championne.

L'efficacité de photoluminescence interne déterminée expérimentalement pour le matériau de zone plate c-Si de la plus haute qualité avec une surface passivée est d'environ 20 %. Les Si plaquettes produits commercialement ont un ordre de grandeur d'efficacité interne inférieure [21]. Cette efficacité relativement faible est due à l'écart de bande indirect de Si, qui est une propriété matérielle intrinsèque qui ne peut pas être modifiée pour cette forme de Si; le caractère indirect implique un coefficient d'absorbance plus faible, ce qui signifie que plus de matériel est nécessaire pour absorber toute la lumière du soleil. Cette augmentation du volume du matériau, par rapport à d'autres matériaux absorbants PV, et les longues durées de vie porteuse se traduit par une situation où même de faibles densités de défauts peuvent causer une recombinaison non radiative significative.

## Filières technologiques des cellules photovoltaïques

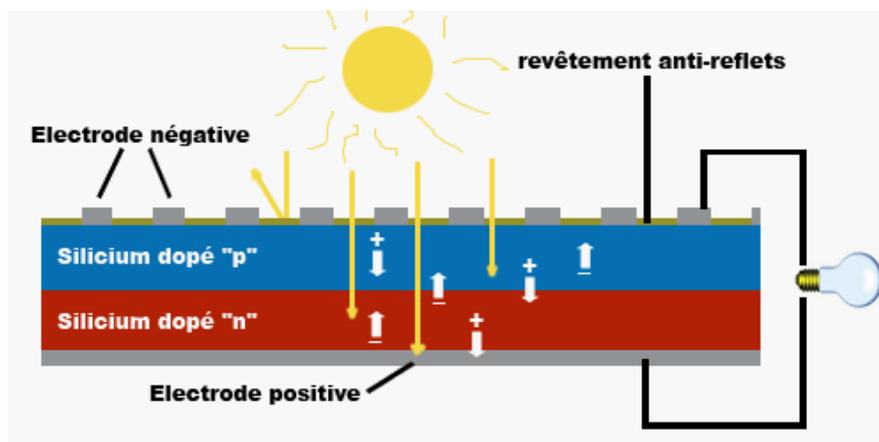


Figure II.1 Cellule solaire à base de silicium

### ✚ *Silicium poly-cristallin*

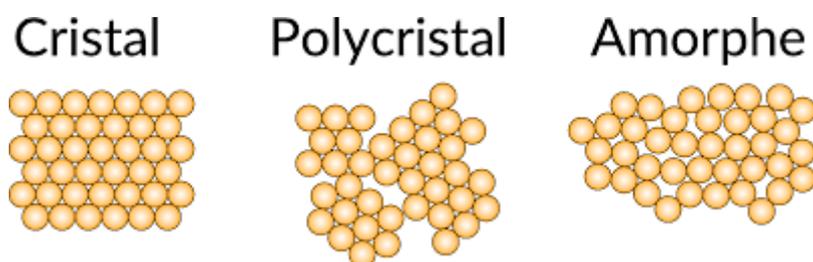
Au lieu d'une seule structure cristalline uniforme, les cellules polycristallines (ou multicristallines) contiennent de nombreux petits grains de cristaux. Ils peuvent être fabriqués en coulant simplement un lingot en forme de cube à partir de silicium fondu, puis scié et emballé comme des cellules monocristallines. Une autre méthode connue sous le nom de croissance par film à définition de bord consiste à étirer un mince ruban de silicium polycristallin à partir d'une masse de silicium fondu. Alternative moins chère mais moins efficace, les cellules PV en silicium polycristallin dominent le marché mondial, représentant environ 70 % de la production PV mondiale en 2015.

### I.2. Cellules solaire de deuxième génération (couche mince)

La technologie des tranches de cristal Si est coûteuse car elle utilise principalement du Si cristallin pur. L'obtention de Si pur est un complexe et processus coûteux. Le coût des cellules solaires peut être réduit si des couches minces de Si (1  $\mu\text{m}$ ) peuvent être déposées. Très peu de silicium est utilisé par la technologie des couches minces par rapport à la technologie à base de plaquettes. R. Chittick a d'abord développé des couches minces déposées de Si amorphe [22]. Ensuite, ses collègues ont publié un rapport sur la première étude systématique et explicative sur la technique de dépôt chimique en phase vapeur assistée par plasma.

### ✚ *Silicium amorphe*

Il n'y a presque pas de progrès dans la technologie PV de Si amorphe hydrogéné, souvent désigné comme a-Si :H (nous utilisons ici « a-Si ») au cours de la dernière décennie, en ce qui concerne l'efficacité réelle de la conversion. On peut supposer que ce manque de progrès est dû au moins en partie aux limitations matérielles intrinsèques de l'absorbeur a-Si (en raison



**Figure II. 2** Comparaison des ions entre le silicium amorphe, poly-c et cristallin

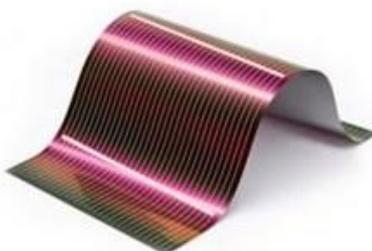
### CIGS

Lorsque nous comparons l'EQE (Efficacité Quantique Externe) des cellules CIGS des dernières années, nous constatons une différence notable à mesure que la performance des cellules s'améliore. L'EQE de la cellule efficace de 19,8 % montre une baisse en dessous de 520 nm. Ceci est dû à l'effet combiné de la longueur de diffusion inadéquate des supports et du filtrage de la couche CdS qui est souvent utilisée dans ces cellules solaires polycristallines. CdS, qui est maintenant souvent remplacé par ZnS, est nécessaire pour la surface, puis l'interface, passivation, qui augmente les Voc mais au prix de Jsc.

Une amélioration majeure de la technologie CIGS a été un changement dans le traitement des ions métalliques alcalins (de Na à K) après le dépôt de la couche CIGS. Le traitement K<sup>+</sup> modifie la composition chimique près de la surface du film CIGS en épuisant Cu et Ga et en implantant une densité K<sup>+</sup> significative, dépôt chimique en bain plus court de CdS (couche CdS plus mince) pour obtenir la passivation et l'inversion de surface nécessaires. Des couches CdS plus minces permettent à plus de < 530 nm de photons d'atteindre le CIGS Absorbant. La couche ZnO utilisée dans les cellules contribue également à la réduction de la perte de photocourant. Le remplacement de ZnO par une bande passante plus large (ZnMg) a encore amélioré l'EQE. Pour le rendement actuel 22,9% de cellule CIGS, Cs a été ajouté comme

## Filières technologiques des cellules photovoltaïques

métal alcalin [23]. La forme de l'EQE normalisée de la cellule CIGS standard championne est maintenant comparable à celle de la cellule c-Si. Cependant, il y a toujours une perte de photocourant due à la couche TCO (Oxydes Conducteurs Transparents) supérieure, une perte, commune à toutes les cellules qui utilisent des fenêtres TCO. Le Voc et le Vmp de la cellule polycristallin-CIGS, qui a un écart de bande, semblable à celui de c-Si, sont maintenant comparable à celle de ce dernier. L'amélioration des Voc et des Vmp des cellules CIGS peut se produire en réduisant davantage la recombinaison de l'interface et en rendant la surface arrière très réfléchissante.



**Figure II.3** Cellule Solaire CIGS

### *Polycristallin-CdTe*

Il y a eu des progrès rapides dans la cellule solaire CdTe polycristallin. Lorsque nous comparons les EQEs des cellules championnes, nous trouvons une tendance similaire à celle des cellules CIGS, c'est-à-dire que l'amélioration significative de l'efficacité photoactuelle pour les photons à haute énergie est corrélée avec l'amélioration PCE. En particulier, les pertes dues à la couche CdS, utilisée pour créer la jonction p-n avec CdTe, ont été pour la plupart éliminées et l'EQE semble être limitée uniquement par l'absorption optique du substrat verre/TCO à de courtes longueurs d'onde. Un espace de bande semi-conducteur peut être modifié par des changements de composition. Bien que normalement le changement dans l'espace de bande soit monotone avec changement dans composition, dans certains cas il y a un badgap minimum à une composition intermédiaire des deux constituants avec des espaces de bande différents. Ce phénomène est appelé « courbure de bande » et se produit dans les systèmes Cd ( $\text{Se}_x\text{Te}_{1-x}$ ) et  $\text{CdTe}_{1-x}\text{S}_x$ ). D'après l'effet connu de « courbure de l'écart de bande » dans les systèmes  $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x/\text{CdTe}_{1-x}\text{S}_x$ , et les rapports suggérant  $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$  dans les premiers modules solaires, il est très élevé probablement que le matériau absorbant dans le dispositif champion actuel n'est pas propre CdTe, mais  $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$  et/ou  $\text{CdTe}_{1-x}\text{S}_x$ .

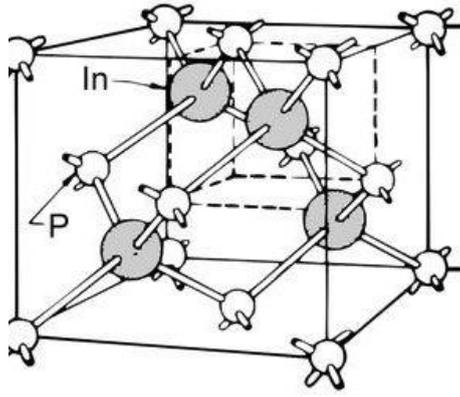
## Filières technologiques des cellules photovoltaïques

L'amélioration de l'efficacité est peut-être due au classement de l'intervalle de bande dans la technologie polycristalline-CdTe, où l'infiltration de Se dans le matériau absorbant produit  $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ , qui, pour une faible teneur en Se, étendra l'absorbance optique aux longueurs d'onde inférieures. Étant propriétaire technologies, l'information sur le processus utilisé pour réduire l'effet de la couche CdS n'est pas disponible dans le domaine public. Cependant, des travaux similaires suggèrent qu'une couche CdS pourrait avoir été Utilisé pour diminuer l'effet de filtrage et l'utilisation de CdSe (qui peut interférer avec le sommet de la couche CdTe pour former  $\text{CdTe}_{1-x}\text{S}_x$ ) avec la couche CdS permet également d'utiliser une couche CdS plus mince [24].

Bien que l'efficacité de photocourant,  $J_{sc}$  est parmi les meilleurs de tous les types de cellules, pertes de  $V_{oc}$  restent.  $V_{oc}$  dans Les cellules CdTe peuvent être  $> 1 \text{ V}$  pour un matériau monocristallin avec des matériaux interfaciaux [25]. Dans le matériau polycristallin, la réduction au minimum de la recombinaison non radiative aux limites du grain et dans le grain en vrac (en raison de défauts) augmentera  $n_{int}$ , ce qui à son tour peut réduire la perte d'exploitation de la cellule. En fait, les cellules polycristallines à base de CdTe ont déjà montré  $V_{oc} > 900 \text{ mV}$  [26] en raison de la réduction de la recombinaison non radiative.

### *InP*

La cellule basée sur l'InP cristallin a maintenant une efficacité de 24,2%, une amélioration significative par rapport au précédent 22,1%. Dans la nouvelle cellule, le  $J_{sc}$  et le  $V_{oc}$  de la cellule ont été améliorés. L'amélioration de l'efficacité du photocourant est due au schéma de dopage à faible intensité utilisé dans la couche émettrice, tandis que l'amélioration du  $V_{oc}$  est due à la couche de confinement arrière [22]. La perte de fonctionnement ainsi que l'efficacité du photocourant dans cette technologie sont encore loin de leurs limites théoriques. Avec un écart PV et propriétés des matériaux similaires à GaAs et GaInP, nous pouvons nous attendre à l'efficacité de cette technologie pour se rapprocher de celle de GaAs dans les années à venir, à condition que la recombinaison interfaciale et parasite absorbance peut être pris en compte.



**Figure II.4** Structure cristalline de L'InP

### ✚ Composés du groupe III-V

L'une des principales raisons de la moindre efficacité d'une cellule solaire est la perte d'énergie dans une cellule solaire en raison du décalage entre l'énergie des photons incidents et la bande interdite d'énergie du matériau utilisé. Si le contenu énergétique des photons incidents sont inférieurs à l'énergie de la bande interdite du matériau, alors les photons ne sont pas absorbés. De plus, si le photon incident a plus d'énergie que l'énergie de la bande interdite du matériau, l'énergie des photons est perdue. Ainsi, en utilisant plusieurs des couches de matériaux photovoltaïques ayant une valeur d'énergie de bande interdite étendue peuvent être utilisées pour une efficacité élevée. type de cellules solaires de génération III-V afin que la perte d'énergie photonique puisse être minimisée et que plus d'énergie photonique puisse être absorbée à partir d'un incident à large spectre solaire sur une cellule solaire. Une cellule solaire multi-jonction composée de plus d'une jonction est donc favorable pour obtenir plus d'efficacité. Selon la théorie de Shockley Queisser, 33,7 % est l'efficacité maximale atteinte théoriquement pour la technologie des cellules solaires à jonction unique lorsque le matériau semi-conducteur utilise une énergie de bande interdite de 1,34 eV et le spectre solaire incident considéré AM1.5 [27]. GaAs est un composé typique du groupe III-V ayant une bande interdite proche d'environ 1,42 eV et c'est un composé hautement matériau approprié pour des cellules solaires à couches minces très efficaces. Des cellules solaires à l'arséniure de gallium de haute qualité avec une rétro réflexion utile de l'énergie photonique et une efficacité de conversion photonique élevée efficace de 27,8 % ont été fabriqués et démontrés par Steiner et al. et une augmentation de la tension en circuit ouvert de 1,1 V a été enregistrée sous le spectre solaire global [28]. InGaP est un semi-conducteur composé d'indium, de gallium et de phosphore, ayant un type de réseau similaire à celui de GaAs [29]. Il a été démontré qu'une

## Filières technologiques des cellules photovoltaïques

cellule solaire InGaP à jonction unique avait une énergie de bande interdite de 1,81 eV et une efficacité de conversion solaire de 20,8 % [30]. Une cellule solaire à jonction unique n'est pas capable d'absorber tous les photons du spectre solaire incident, ainsi des cellules solaires multijonctions ayant deux et trois jonctions dans une cellule solaire sont fabriquées et démontrées pour une plus grande Efficacité.

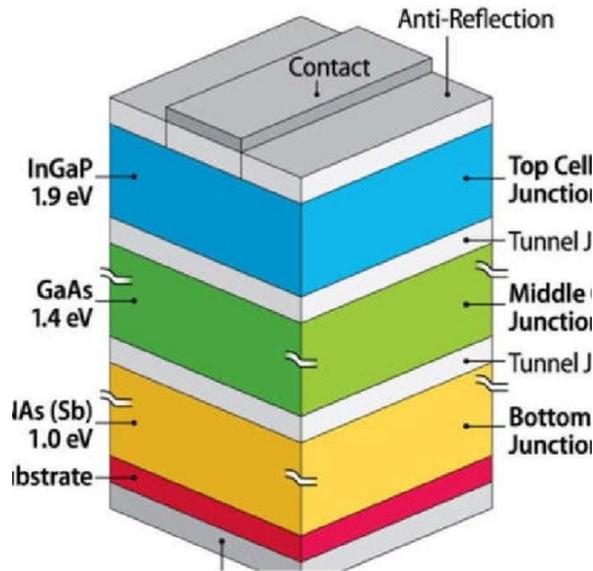


Figure II.5 Cellule photovoltaïque GaInP

La figure suivante (II.6) résume les différentes cellules de la deuxième génération avec leur rendement. OÙ, nous constatons que pour AM1.5, le meilleur rendement est celui d'une cellule GaAs qui est de l'ordre de 27% pour une température de 25°C.

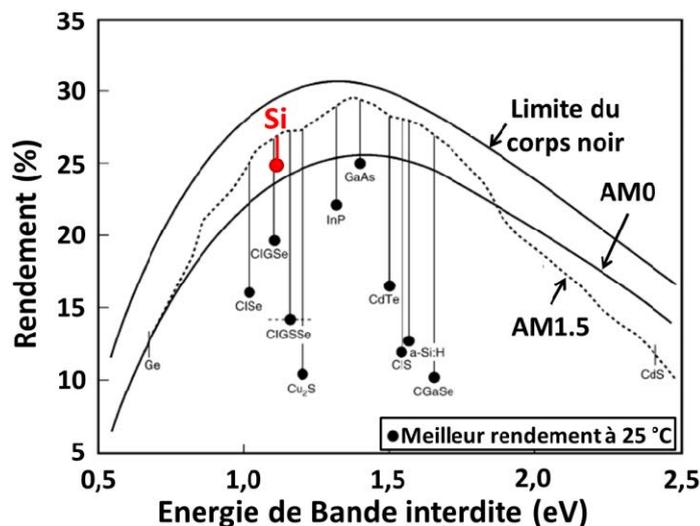


Figure II.6 Courbure montre les différentes technologies et leurs rendements

### I.3. Technologie des cellules solaires de troisième génération

La technologie des cellules photovoltaïques de troisième génération fait référence à une cellule solaire à jonction unique qui peut dépasser la limite de Shockley-Queisser de 31 à 41% d'efficacité énergétique. Les cellules solaires C-Si (première génération) et les cellules solaires à couche mince ont certaines limites pour atteindre une efficacité plus élevée et doivent être établies en tant que technologie photovoltaïque pour remplir toutes les conditions selon le triangle d'or. La technologie des cellules solaires de troisième génération comprend les types de cellules solaires suivants :

#### *Chalcogenides durables ((CZTSS), Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> (CZTS))*

Les cellules solaires durables à base de chalcogenide à couche mince ont montré des progrès substantiels au cours des cinq dernières années et leur meilleur PCE est maintenant ~10 %. En raison des rayons ioniques similaires de Cu<sup>+</sup> et Zn<sup>2+</sup> et les faibles énergies de formation pour les centres de défauts neutres, le [CuZn, ZnCu<sup>+</sup>] complexe de défauts est répandue dans CZTSS/CZTS. Le L'élargissement observé, qui résulte probablement d'une densité importante d'états dans l'intervalle, de la bande de résidus, entraînera une perte de Voc de ces cellules [31].

Compte tenu des effets du traitement par ions alcalins de la couche absorbante dans la CIGS (initialement avec Na, aujourd'hui avec K et Cs), un tel développement peut exister pour les systèmes CZTS et CZTSS. Cependant, ces traitements ne peuvent pas annuler les effets de désordre statique en vrac. Les centres de défauts produits en raison de la vacance de sulfure [32] ont une grande section transversale pour le piégeage des porteurs et la recombinaison subséquente non radiative et sont, par conséquent, connus sous le nom de « défauts mortels », ce qui réduit la tension de sortie de la cellule même lorsqu'elle est présente en petites concentrations. En effet, pour éliminer les « défauts mortels » [32], il faut les changements dans la majorité des matériaux, c'est-à-dire les questions fondamentales relatives aux matériaux. Il peut être utile de regarder au-delà des interfaces CdS/CZTS(S) pour améliorer l'efficacité des photocourants pour les photons à haute énergie, car il y a une perte considérable de photocourant en raison des faibles valeurs EQE <530 nm dans les dispositifs champions. De plus, en raison d'un décalage de la bande « falaise » à l'interface CZTS/CdS, l'accumulation de charge se produit, ce qui entraîne une recombinaison non radiative des trous dans la couche CZTS avec les électrons accumulés dans la couche CdS, qui diminue Nint et se traduit par la faible Voc de la cellule Zn<sub>1-x</sub>CdxS semble être un meilleur

## Filières technologiques des cellules photovoltaïques

choix que CdS, parce que son écart de bande est plus large et le décalage de bande à l'interface peut être accordé en faisant varier le rapport Zn/Cd. L'effet immédiat de la commutation à  $Zn_{1-x}Cd_xS$  est évident à partir de l'EQE des cellules CZTSS dans la région de moins de 520 nm.

### *ABX3 halogénures métalliques Perovskites*

Les cellules solaires à pérovskite sont un type de cellule à couche mince et portent le nom de leur structure cristalline caractéristique. Les cellules de pérovskite sont construites avec des couches de matériaux qui sont imprimées, enduites ou déposées sous vide sur une couche de support sous-jacente, appelée substrat. Ils sont généralement faciles à assembler et peuvent atteindre des rendements similaires au silicium cristallin. En laboratoire, l'efficacité des cellules solaires en pérovskite s'est améliorée plus rapidement que tout autre matériau photovoltaïque, passant de 3 % en 2009 à plus de 25 % en 2020. Pour être commercialement viables, les cellules photovoltaïques en pérovskite doivent devenir suffisamment stables pour survivre 20 ans à l'extérieur. travaillent à les rendre plus durables et à développer des techniques de fabrication à grande échelle et à faible coût.

Les cellules solaires, basées sur ces absorbeurs, ont montré très impressionnant l'évolution de leur PCE au cours des cinq dernières années, par rapport au développement d'autres technologies photovoltaïque [33]. La similitude entre la préparation des couches minces polycristallines de ces matériaux et les méthodes utilisées pour l'électronique organique et/ou les cellules sensibilisées aux colorants, d'une part, et pour d'autres absorbeurs à film mince, comme le CIGS, d'autre part, a contribué à stimuler un effort de recherche énorme, qui a sans aucun doute contribué à l'augmentation fulgurante des performances des cellules.

### *Cellules solaires à Point quantique*

Les cellules solaires à points quantiques conduisent l'électricité à travers de minuscules particules de différents matériaux semi-conducteurs d'à peine quelques nanomètres de large, appelées points quantiques. Les points quantiques offrent une nouvelle façon de traiter les matériaux semi-conducteurs, mais il est difficile de créer une connexion électrique entre eux, ils ne sont donc actuellement pas très efficaces. Cependant, ils sont faciles à transformer en cellules solaires. Ils peuvent être déposés sur un substrat à l'aide d'une méthode de spin-coat, d'un spray ou d'imprimantes rouleau à rouleau comme celles utilisées pour imprimer les journaux.

## Filières technologiques des cellules photovoltaïques

Les points quantiques sont disponibles en différentes tailles et leur bande interdite est personnalisable, ce qui leur permet de collecter la lumière difficile à capturer et de les associer à d'autres semi-conducteurs, comme les pérovskites, pour optimiser les performances d'une cellule solaire multijonction.

Dans ces types de cellules, le transport de la charge entre les points quantiques a été un problème car les surfaces sont souvent couvertes par un écart de bande plus élevé ou isolant organique ligands. La présence de défauts sur les surfaces PQ abaisse également le photovoltage réalisable. « Swarnkar et al » ont utilisé des PQ de pérovskite CsPbI<sub>3</sub> pour préparer des cellules avec PCE > 10 % [34]. Dans ces cellules, les PQ sont coiffés de longs ligands à chaîne alkylique, qui entravent le transport de charge entre les PQ. « Sanehira et coll » [35] ont ajouté une petite quantité d'iodure de formamidinium aux matrices CsPbI<sub>3</sub>, ce qui a réduit la distance entre les articles, ce qui a entraîné une amélioration de transport de charge et de céder l'impressionnant PCE supérieur pour ces cellules; sur la base de cette réalisation, nous voir qu'il y a maintenant beaucoup de place pour l'amélioration de l'efficacité photoactuelle. Il est débat si les pérovskites d'halogénures ABX<sub>3</sub> ont simplement englouti le champ PQ (traditionnellement basé sur III-V ou métal les semi-conducteurs chalcogéniques), ou si les PQ restent une technologie discrète.

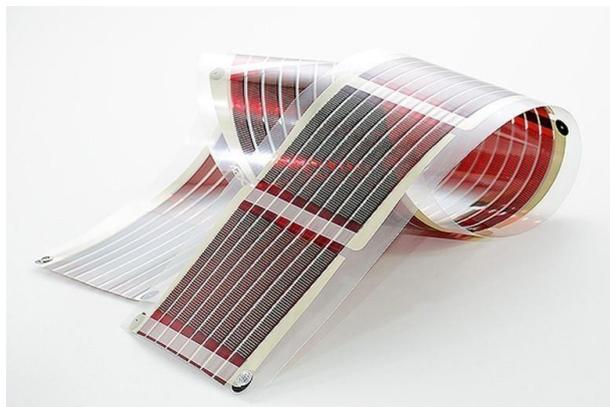
### Cellules solaires Organiques

Les cellules solaires photovoltaïques organiques (OPV) visent à fournir une solution photovoltaïque (PV) abondante sur Terre et à faible production d'énergie. Cette technologie a également le potentiel théorique de fournir de l'électricité à moindre coût que les technologies solaires de première et de deuxième génération. Étant donné que divers absorbeurs peuvent être utilisés pour créer des dispositifs OPV colorés ou transparents, cette technologie est particulièrement attrayante pour le marché du PV intégré au bâtiment. Le photovoltaïque organique a atteint des rendements proches de 11 %, mais les limites de rendement ainsi que la fiabilité à long terme restent des obstacles importants.

Contrairement à la plupart des cellules solaires inorganiques, les cellules OPV utilisent des absorbeurs moléculaires ou polymères, ce qui se traduit par un exciton localisé. L'absorbeur est utilisé conjointement avec un accepteur d'électrons, tel qu'un fullerène, qui a des états d'énergie orbitale moléculaire qui facilitent le transfert d'électrons. Lors de l'absorption d'un photon, l'exciton résultant migre vers l'interface entre le matériau absorbant et le matériau

## Filières technologiques des cellules photovoltaïques

accepteur d'électrons. A l'interface, le décalage énergétique des orbitales moléculaires fournit une force motrice suffisante pour scinder l'exciton et créer des porteurs de charge libres (un électron et un trou).



**Figure II.7** Cellule Solaire Organique

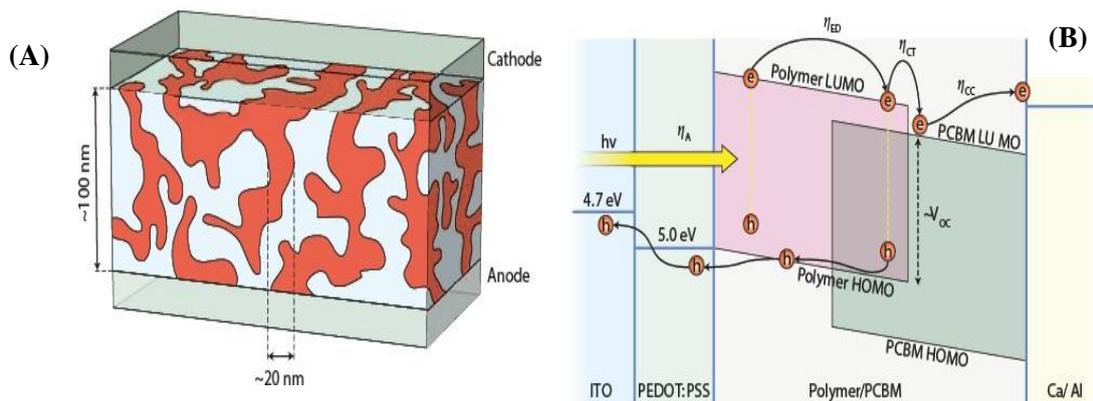
### Cellules solaires polymères

La cellule solaire polymère, également appelée cellule solaire plastique, utilisant des polymères conjugués comme absorbant de lumière, donneur d'électrons, accepteur et/ou matériau de transport de trous, est étudiée depuis 2 décennies [36]. L'efficacité de conversion d'énergie la plus élevée enregistrée est actuellement de 10 % [37]. Afin d'améliorer encore les performances, de nouveaux polymères avec diverses structures moléculaires et leurs applications dans les dispositifs photovoltaïques font l'objet d'investigations intensives.

Au tout début de la cellule solaire polymère, la structure est similaire à la cellule solaire conventionnelle à base de silicium avec une jonction planaire. Les gens s'attendent à ce que cet appareil fonctionne comme une cellule solaire à jonction P – N avec un simple revêtement de matériaux semi-conducteurs organiques de type p et de type n. Cependant, en raison de la courte longueur de diffusion des excitons, la longueur pendant laquelle les excitons reviennent à l'état fondamental, la distance entre les excitons générés et l'interface de jonction doit être suffisamment courte pour générer des porteurs de charge libres. D'autre part, l'absorbeur de lumière doit être suffisamment épais pour récolter autant de lumière incidente. Pour équilibrer ce dilemme, le donneur (type p) et l'accepteur (type n) forment des phases interpénétrées a été développé avec succès pour atteindre des performances élevées. En 1995, le poly(2-méthoxy, 5-(2'-éthylhexyloxy)-1,4-phénylène vinylène) (MEH-PPV) a été mélangé avec du C<sub>60</sub> et ses dérivés pour réaliser la première cellule solaire polymère à haute conversion de puissance, avec une efficacité de 2,9 % sous un éclairage de 20 mW cm<sup>-2</sup> [38]

## Filières technologiques des cellules photovoltaïques

La (figure 8.A) illustre la structure et le principe de fonctionnement de base de la cellule solaire polymère courante d'aujourd'hui. Une cellule solaire polymère typique contient une couche de collecte de lumière à hétérojonction en vrac donneur /accepteur, prise en sandwich entre la couche d'extraction d'électrons et de trous, puis l'anode et la cathode. Le diagramme d'énergie est présenté dans la (Figure 8.B) [36]. Un procédé photovoltaïque contient généralement la génération d'excitons et la production de porteurs libres à partir de photons incidents. Premièrement, le polymère conjugué absorbe la lumière incidente et génère des excitons, qui sont des paires électron-trou liées. Dans les cellules solaires polymères, ces paires ou excitons trou-électron excités se dissocient en porteurs libres dans l'interface donneur / accepteur, puis migrent vers des matériaux d'extraction et de transport de charge, qui sont entraînés par le champ électrique intégré. Ensuite, ces porteurs de charge libres, électrons et trous, seront collectés respectivement dans l'anode et la cathode. Enfin, ces porteurs de charge gratuits seront transférés vers un circuit externe pour effectuer une conversion de la lumière à l'électricité [39]. Ici, le polymère fonctionne comme une couche photoactive pour l'absorption de la lumière et la génération et le transport de charges.



**Figure II. 8 (A)** Structure typique de la cellule solaire polymère. **(B)** Niveau de diagramme d'énergie et transport de charge dans une cellule solaire polymère.

## Filières technologiques des cellules photovoltaïques

### ✚ Cellules solaires à colorant

La cellule solaire à colorant électrochimique a été inventée en 1988 par le professeur Graetzel de Lausanne Polytechnique, en Suisse. La cellule de colorant "Graetzel" utilise des molécules de colorant adsorbées dans des semi-conducteurs d'oxyde nanocristallin. Les cellules à colorant utilisent des matériaux relativement peu coûteux tels que le verre, la poudre de Titania et la poudre de carbone. La cellule de Graetzel est composée d'une couche poreuse de nanoparticules de dioxyde de titane, recouverte d'un colorant moléculaire qui absorbe la lumière du soleil, comme le fait la chlorophylle dans les feuilles vertes. Les cellules solaires de troisième génération sont à la pointe de la technologie solaire. Ces cellules solaires peuvent dépasser la limite théorique d'efficacité de conversion solaire pour un seul matériau à seuil d'énergie. La recherche actuelle vise des rendements de conversion de 30 à 60 % tout en conservant des matériaux et des techniques de fabrication à faible coût. La troisième génération contient un large éventail d'innovations solaires potentielles, notamment des cellules solaires multi-jonctions, des cellules solaires polymères, des cellules nanocristallines à nano fils, des cellules solaires à points quantiques et des cellules solaires à colorant.

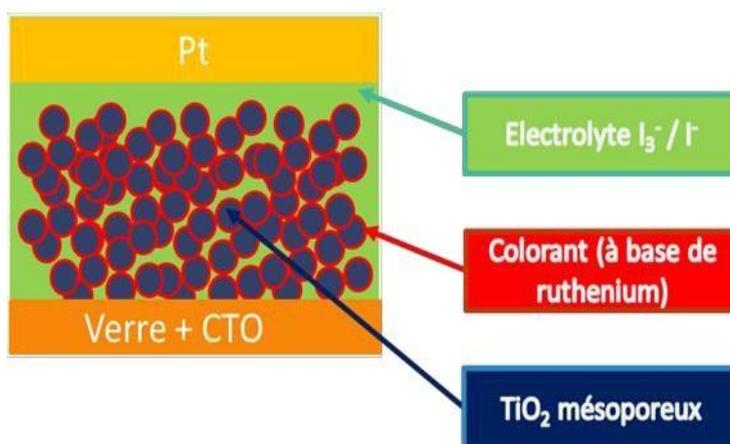


Figure II.9 Cellule à colorant à base de  $\text{TiO}_2$

### ✚ Cellules solaires à double jonction

Les cellules tandem InGaP/GaAs à double jonction ont été démontrées avec une efficacité de 30 %, sous illumination du spectre solaire AM1.5 [40]. Le National Renewable Energy Lab (NREL) a démontré un record mondial d'efficacité de 32,6% de cellule solaire à double jonction sous illumination du spectre solaire AM1.5 [41].

La technologie des cellules solaires à double jonction crée une base pour la technologie des cellules solaires multi-jonctions et les cellules solaires à trois ou quatre jonctions sont conçues

## Filières technologiques des cellules photovoltaïques

pour absorber la plupart des photons lumineux incidents sur une cellule solaire. Avec le développement de nouveaux matériaux et différentes conceptions durables de cellules solaires, une augmentation de l'efficacité absolue de 1 % par an est enregistrée [42].

Cellules solaires à trois jonctions : l'efficacité théorique des cellules solaires multijonctions peut atteindre jusqu'à 86 % [43], empiler un nombre infini de jonctions dans une cellule solaire. En utilisant des semi-conducteurs composés, des cellules solaires multi-jonctions sont développées avec succès. Les trois cellules d'une cellule solaire à trois jonctions absorbent différentes parties du spectre solaire incident. Le rendement le plus élevé obtenu à ce jour est d'environ 39 % pour la triple jonction GaInP/GaInAs/Ge. Cellule solaire sous forte concentration lumineuse de 236 soleils.

### I.4. Photovoltaïque à concentration

Le PV à concentration, également connu sous le nom de CPV, concentre la lumière du soleil sur une cellule solaire à l'aide d'un miroir ou d'une lentille. En concentrant la lumière du soleil sur une petite zone, moins de matériel PV est nécessaire. Les matériaux PV deviennent plus efficaces à mesure que la lumière devient plus concentrée, de sorte que les rendements globaux les plus élevés sont obtenus avec les cellules et modules CPV. Cependant, des matériaux plus coûteux, des techniques de fabrication et une capacité à suivre le mouvement du soleil sont nécessaires, il est donc devenu difficile de démontrer l'avantage de coût nécessaire par rapport aux modules en silicium à grand volume d'aujourd'hui.



**Figure II.10** Système LCPV Zytech [44]

### II. Exemple de fabrication d'une cellule solaire

Nous avons proposé le processus de fabrication d'une cellule solaire en Silicium. Pour cela, sept étapes sont programmées pour ce processus.

#### ➤ *Première étape : purifier le silicium*

Le dioxyde de silicium est placé dans un four à arc électrique et un arc au carbone est appliqué pour libérer l'oxygène. Cela laisse du dioxyde de carbone et du silicium fondu, qui donneront du silicium avec seulement 1% d'impureté, mais même cela n'est pas assez pur pour être utilisé dans les cellules solaires. Des tiges de silicium pur à 99% sont passées plusieurs fois, dans le même sens, à travers une zone chauffée dans un processus appelé la technique de la zone flottante. La répétition de ce processus attire toutes les impuretés à une extrémité de la tige, permettant finalement à cette extrémité impure d'être simplement retirée.

#### ➤ *Deuxième étape : créer du silicium monocristallin*

La méthode la plus courante pour créer du silicium monocristallin est appelée la méthode Czochralski, dans laquelle un germe cristallin de silicium est plongé dans du silicium polycristallin fondu. En faisant tourner ce germe cristallin lorsqu'il est retiré du polycristallin fondu, un lingot ou boule cylindrique est créé.

#### ➤ *Troisième Étape : Couper les tranches de silicium*

La boule de la deuxième étape est découpée en tranches de silicium à l'aide d'une scie circulaire. Le diamant est le meilleur matériau de scie pour ce travail, produisant des tranches de silicium qui peuvent ensuite être coupées davantage pour former des carrés ou des hexagones plus faciles à assembler sur la surface d'une cellule solaire. Les tranches de tranches sont ensuite généralement polies pour éliminer les marques de scie, bien que certains fabricants laissent ces imperfections car on pense que des cellules plus rugueuses peuvent absorber plus efficacement la lumière.

#### ➤ *Quatrième étape : dopage*

Après avoir purifié le silicium à un stade antérieur, le matériau peut maintenant être rajouté d'impuretés. Ce processus est appelé dopage et implique généralement l'utilisation d'un

## Filières technologiques des cellules photovoltaïques

accélérateur de particules pour envoyer des ions phosphoreux dans le lingot. Le contrôle de la vitesse des ions permet de contrôler la profondeur de pénétration. Cette partie du processus peut être ignorée en utilisant la méthode plus traditionnelle d'introduction de bore lors de la découpe des plaquettes.

### ➤ *Cinquième étape : Ajouter des contacts électriques*

Les contacts électriques relient les cellules solaires les unes aux autres et servent de récepteur pour le courant produit. Ces contacts sont minces pour ne pas empêcher la lumière du soleil d'entrer dans la cellule et sont fabriqués à partir de métaux tels que le palladium ou le cuivre. Le métal est soit évaporé sous vide à travers une résine photosensible, soit déposé sur la partie exposée des cellules, qui ont été partiellement recouvertes de cire. Une fois les contacts en place, de fines bandes, généralement de cuivre étamé, sont placées entre les cellules.

### ➤ *Sixième étape : Ajouter le revêtement antireflet*

La nature brillante du silicium signifie qu'il peut refléter jusqu'à 35 % de la lumière du soleil qui le frappe. Un revêtement antireflet est ajouté au silicium afin de réduire la quantité de lumière solaire perdue par réflexion. Le dioxyde de titane et l'oxyde de silicium sont couramment utilisés pour cela, le matériau étant chauffé jusqu'à ce que les molécules bouillent et se déplacent sur le silicium où elles se condensent. Alternativement, une haute tension peut être utilisée pour éliminer les molécules du matériau et les déposer sur le silicium à l'électrode opposée dans un processus appelé « pulvérisation ».

### ➤ *Septième étape : Encapsuler la cellule*

Enfin, les cellules solaires sont encapsulées dans du caoutchouc de silicone ou de l'éthylène-acétate de vinyle et placées dans un cadre en aluminium avec une feuille arrière et un couvercle en verre ou en plastique pour la protection.

## Conclusion

La demande énergétique toujours croissante d'une population mondiale croissante pourrait être satisfaite en utilisant une ou plusieurs technologies énergétiques en plus de l'énergie solaire.

## **Filières technologiques des cellules photovoltaïques**

La cellule solaire remarquable des technologies telles que les cellules solaires à couches minces, les cellules solaires à colorant, les cellules solaires à jonctions multiples, les cellules solaires à pérovskite ont provoqué une évolution dans l'industrie des cellules solaires.

Nous avons évoqué durant ce chapitre les filières technologiques qui semblent être les plus récentes. Dans le prochain chapitre nous déterminerons une technologie de cellule solaire connue qui sera la cellule solaire à base de GaAs.

# **CHAPITRE III**

## **Simulation du modèle d'une cellule solaire en GaAs**

## Introduction

L'arséniure de gallium (GaAs) est un semi-conducteur composé qui a remplacé le silicium dans de nombreuses applications en raison de son rendement élevé.

Les cellules solaires GaAs ont été fabriquées sous diverses formes : couche mince, monocristallin, multicristallin et multijonction.[45]

Durant ce chapitre, nous procédons à présenter le matériau GaAs et ces différentes applications.

### I. Propriétés du GaAs

Le GaAs est composé de deux atomes ; **Ga** (*Galium*) découvert par Paul Émile Lecoq de Boisbaudran en 1875 ; il se situe dans le groupe 13, 4<sup>ème</sup> période. Tandis l'atome **As** (*Arsenic*) qui a été découvert par Albertus Magnus en 1250 ; se positionne dans le groupe 15 et 4<sup>ème</sup> période.

#### I.1. Propriétés structurales

Le cristal de GaAs est composé de deux sous-réseaux, chaque face centrée cubique (fcc) et décalés l'un par rapport à l'autre de la moitié de la diagonale du cube (fcc). Cette configuration est connue sous le nom de sphalérite cubique ou blende de zinc. La figure III.1 montre un cube unité pour GaAs et le tableau 1 montre un extrait de la classification périodique des éléments chimiques.

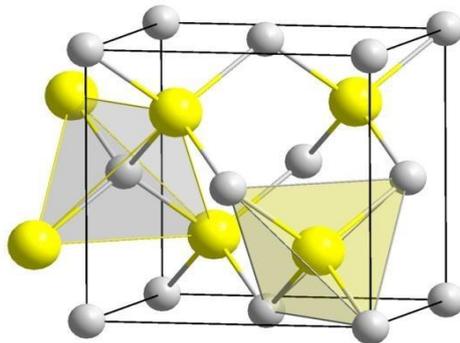


Figure III.1 Structure cristalline du GaAs

## I.2. Structure électronique de bande

Les électrons présentent une masse effective plus petite dans GaAs qui est de 0.068 la masse réelle [46], d'où une mobilité des électrons dans GaAs plus élevée. Cela signifie que GaAs peut être utilisé pour produire un circuit plus rapide.

Étant donné que le maximum de la bande de valence coïncide avec le minimum de la bande de conduction sur l'axe d'impulsion de GaAs (Figure III.2), on l'appelle un semi-conducteur à bande interdite directe. Cela signifie qu'un électron ne doit perdre que de l'énergie et presque pas de quantité de mouvement lorsqu'il se désintègre de la conduction vers le bande de valence. La bande interdite de GaAs fixe la longueur d'onde de la lumière émise à environ 900 nm, ce qui se situe dans la région proche de l'infrarouge.

La plus grande bande interdite permet également aux dispositifs GaAs de fonctionner à des températures plus élevées que d'autres dispositifs comme le silicium. À une température de (-20°C à 100°C) la densité de porteurs libres est minime par rapport à ceux introduits par dopage. Ceci est toujours vrai à des températures élevées. Certains appareils GaAs sont utilisables jusqu'à 400°C et la plupart fonctionnera à des températures compris entre -200°C et 200°C.

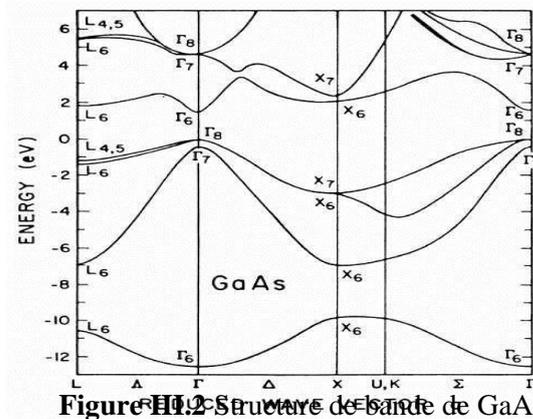
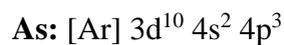
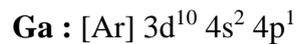


Figure III.2 Structure de bande de GaAs

Cependant, les structures électroniques de bande du Galium et Arsenic sont :



### I.3. Différentes propriétés du GaAs

Le GaAs a une conductivité thermique de  $0,55 \text{ W / cm} \cdot ^\circ \text{C}$ , ce qui représente environ un tiers que du silicium et un dixième de celui du cuivre. En conséquence, la capacité de traitement de l'énergie et donc la densité d'emballage d'un circuit intégré GaAs est limitée par le thermique résistance du substrat. La fiabilité des appareils GaAs est directement liée au Caractéristiques thermiques de la conception de l'appareil, la technique de montage utilisée pour la matrice et les matériaux utilisés pour cette interface. La conductivité thermique du GaAS est liée à la température du matériau sur une large plage de température et varie environ  $1 / t$ , où  $t$  est la Température à Kelvin. Cependant, la conductivité thermique peut être considérée comme linéaire sur un Plage de températures très courte.[47]

Les tableaux ci-dessous représentent un aperçu sur les propriétés électriques, chimiques, thermiques, optiques et mécanique du matériau GaAS.

**Tableau III.1** : Quelques propriétés électriques du GaAs

| <b>Propriétés électriques</b>             |  |
|---|--|
| Concentration de transporteur intrinsèque | $1,79 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$                     |
| Mobilité électronique                     | $\leq 8500 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ |
| Mobilité des trous                        | $\leq 400 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$  |
| Coefficient de diffusion électronique     | $\leq 200 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$                 |
| Coefficient de diffusion des trous        | $\leq 10 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$                  |

**Tableau III.2** : Propriétés chimiques du GaAs

| <b>Propriétés chimiques</b> |                      |
|-----------------------------|----------------------|
| Formule chimique            | AsGa                 |
| Masse moléculaire           | 144.645 g/mol        |
| Nom IUPAC                   | Arséniure de gallium |
| Grouper                     | III-V                |
| Écart de bande              | 1,424 eV             |
| Structure en cristal        | Mélange de zinc      |
| Constante de réseau         | 5.4505Å              |

**Tableau III.3 : Quelques propriétés thermiques du GaAs**

| <b>Propriétés thermiques</b>               |  |
|--|--|
| <b>Conductivité thermique</b>              | 0,55 W·cm <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> |
| <b>Diffusivité thermique</b>               | 0,31 cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>     |
| <b>Coefficient de dilatation thermique</b> | 5.73x10 <sup>-6</sup> °C <sup>-1</sup>   |

**Tableau III.4 : Propriétés optiques du GaAs**

| <b>Propriétés optiques</b>                             |   |
|--|---|
| <b>Indice de réfraction (589 nm 293 K)</b>             | 3,3   |
| <b>Coefficient de recombinaison radiative ( 300 K)</b> | 7x10 <sup>-10</sup> cm <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> |

**Tableau III.5 : Propriétés mécaniques du GaAs**

| <b>Propriétés mécaniques</b> |                           |
|------------------------------|---------------------------|
| <b>Point de fusion</b>       | 1238 °C                   |
| <b>Densité</b>               | 5.3176 g·cm <sup>-3</sup> |
| <b>Module de masse</b>       | 75,5 GPa                  |

#### **I.4. Défauts intrinsèques**

Aucun matériau cristallin semi-conducteur n'est parfait, et les cristaux de GaAs, malgré les efforts pour contrôler la croissance cristalline contiennent un certain nombre de défauts cristallins, de dislocations et d'impuretés. Ces défauts peuvent avoir des effets souhaitables ou indésirables sur les propriétés électroniques de GaAs. La nature de ces défauts et les effets observés sont déterminés par leur mode d'incorporation dans le matériau et les conditions générales de croissance.

De nombreux défauts intrinsèques sont observés dans GaAs. La concentration et l'effet de ces défauts sont déterminés par la manière dont le matériau est cultivé. Intrinsèque les défauts dans GaAs comprennent à la fois des lacunes d'arsenic et de gallium, leur concentration étant déterminée par la suppression d'arsenic pendant le traitement. L'effet de ces postes vacants les défauts ont été observés comme étant neutres[48] , profonds de type donneur et profonds de type accepteur[49].

Des défauts ponctuels chimiques (dopage d'impuretés) peuvent être introduits dans le matériau cristallin délibérément ou par inadvertance comme contamination pendant le

## Simulation du modèle d'une cellule solaire en GaAs

traitement. En général, les impuretés substitutionnelles sont actives électroniquement, tandis que de nombreux contaminants sont de nature interstitielle et sont inactifs électroniquement. Les dopants sont classés comme donateurs ou accepteurs. Un donneur a un électron de plus que l'atome qu'il remplace dans le cristal. Cet électron supplémentaire est facilement retiré ou donné au courant de conduction. Un accepteur, en revanche, a un électron de moins que l'atome qu'il remplace. Ainsi, un accepteur peut facilement capturer un électron et l'empêcher d'ajouter au courant de conduction. Quel que soit le type ou le caractère de l'impureté, les propriétés électriques du semi-conducteur sont modifiées.

### I.5. Avantages et inconvénients

#### *Avantages*[50]

- ✚ La réalisation d'ensembles de télécommunications optiques (composants optoélectroniques basé sur sa structure de bande) utilisant des émetteurs lasers à semiconducteur de GaAs.
- ✚ La possibilité de l'obtenir sous forme semi-isolant et l'état élevée de sa résistivité le rend particulièrement favorable pour le développement d'une technologie planaire de circuits intégrés.
- ✚ La valeur importante de largeur de sa bande interdite lui confère un fonctionnement à haute température, possible grâce à sa mobilité électronique particulièrement élevée : sept fois plus grande que celle du silicium.
- ✚ Il est mieux adapté à la réalisation des diodes Schottky à hauteur de barrière élevée obtenues à l'aide de différent métaux (Au, Al,...).
- ✚ Les jonctions Schottky réalisées en utilisant le GaAs comme semi-conducteur présentent d'excellents facteurs d'idéalité et de très faibles courants inverses.

#### *Inconvénients* [50]

- ✚ Sa physico-chimie se prête moins bien que le silicium aux associations de matériaux semi-conducteur, métaux, isolants, requis par les circuits intégrés, ce qui complique les méthodes de fabrication et réduit les rendements de production.
- ✚ Sa limitation dans des circuits à hautes fréquences (supérieures à 1GHZ).
- ✚ Son cout élevé et son état d'obtention (plaquettes de 3 à 4 pouces et de diamètre 7.5 à 10 cm) limite le nombre de circuits intégrés fabriqués.

## II. Modélisation de la cellule solaire GaAs

### II.1. Structure de la cellule

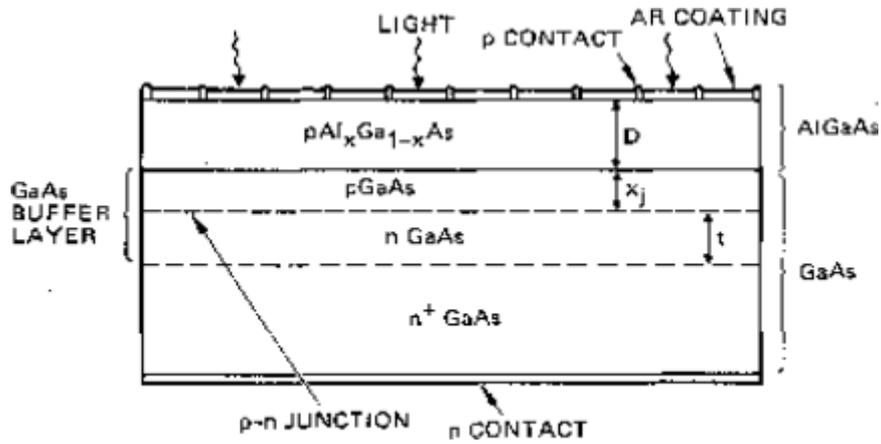


Figure III.3 Structure de la cellule solaire GaAs .[52]

Les paramètres externes de cette cellule sont résumés dans le tableau III.6

Tableau III.6 : Comparaison entre théorie et expérimental [53]

|                     | I <sub>cc</sub> (mA) | V <sub>co</sub> (V) | FF   | η(%) |
|---------------------|----------------------|---------------------|------|------|
| <b>Théorie</b>      | 116.1                | 1.02                | 0.85 | 18.5 |
| <b>Expérimental</b> | 119.8                | 1.02                | 0.84 | 19.0 |

La constitution de notre cellule est citée dans le tableau ci-dessous.

## Simulation du modèle d'une cellule solaire en GaAs

Tableau III.7 : Propriétés de la cellule GaAs [54,55,56]

| Paramètres                              | Valeurs   |
|---|---|
| Epaisseur (d)                           | 7 $\mu$ m   |
| Température (T)                         | 298 K   |
| Facteur d'idéalité (n)                  | 1.5   |
| Concentration d'électrons (n0)          | 4.5*10 <sup>16</sup> électron/cm <sup>2</sup>       |
| La durée de vie ( $\tau$ )              | 8*10 <sup>-5</sup> s                                |
| Coefficient de diffusion d'électron (D) | 219.9 cm <sup>2</sup> /s                            |
| Coefficient d'absorption ( $\alpha$ )   | 4400 cm <sup>-1</sup>                               |
| Intensité solaire ( $\Phi$ )            | 1*10 <sup>17</sup> cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> |
| Concentration intrinsèque (ni)          | 4.5*10 <sup>6</sup> /cm <sup>3</sup>                |

### II.2. Méthode de calcul

Pour notre simulation, nous nous sommes basés sur l'outil mathématique Matlab.

MATLAB est une abréviation de Matrix LABORatory. C'est un environnement complet, ouvert et extensible pour le calcul et la visualisation. Il dispose de plusieurs centaines (voir milliers, selon les versions et les modules optionnels autour des noyaux Matlab) de fonctions mathématiques, scientifiques et techniques. L'approche matricielle de MATLAB permet de traiter les données sans aucune limitation de taille et de réaliser des calculs numériques et symboliques de façon fiable et rapide. Grâce aux fonctions graphiques de MATLAB, il devient très facile de modifier interactivement les différents paramètres des graphiques pour les adapter selon nos souhaits.

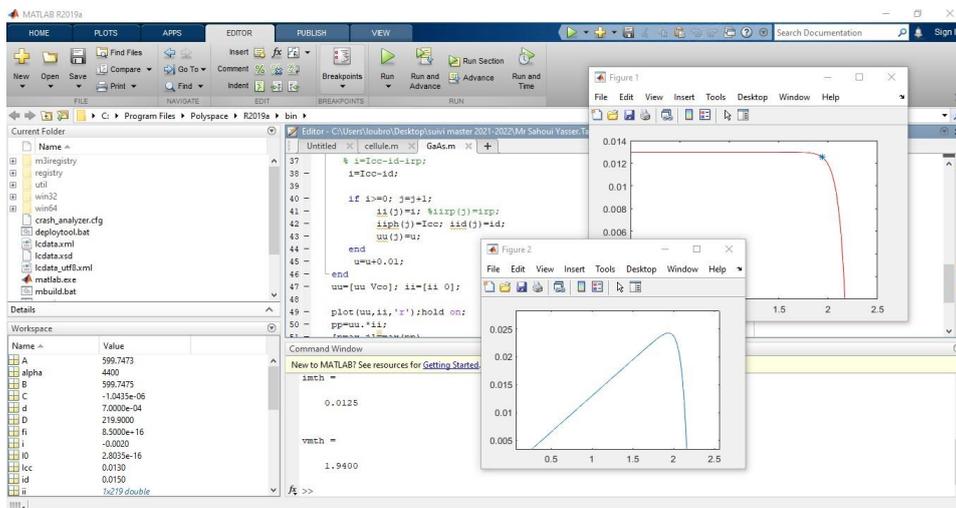


Figure III.4 Interface de notre programme sur Matlab

### III. Interprétation des résultats

#### III.1. Caractéristiques I(V) et P(V) de la cellule

Nous avons commencé nos calculs par le traçage des caractéristiques de la cellule GaAs afin de pouvoir changer les paramètres de cette dernière qui permettent l'optimisation de rendement.

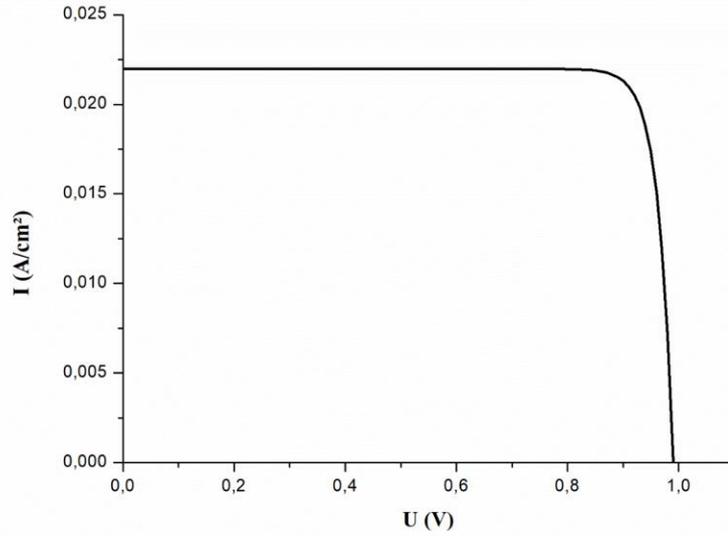


Figure III.5 Caractéristique I(V) de la cellule

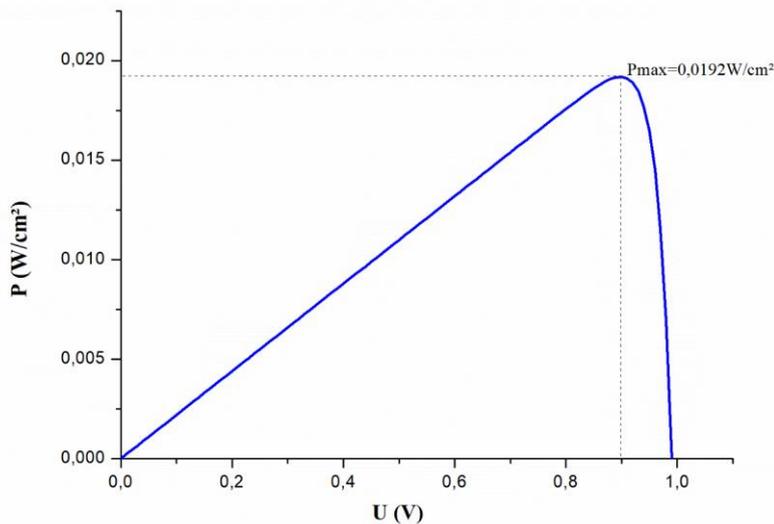
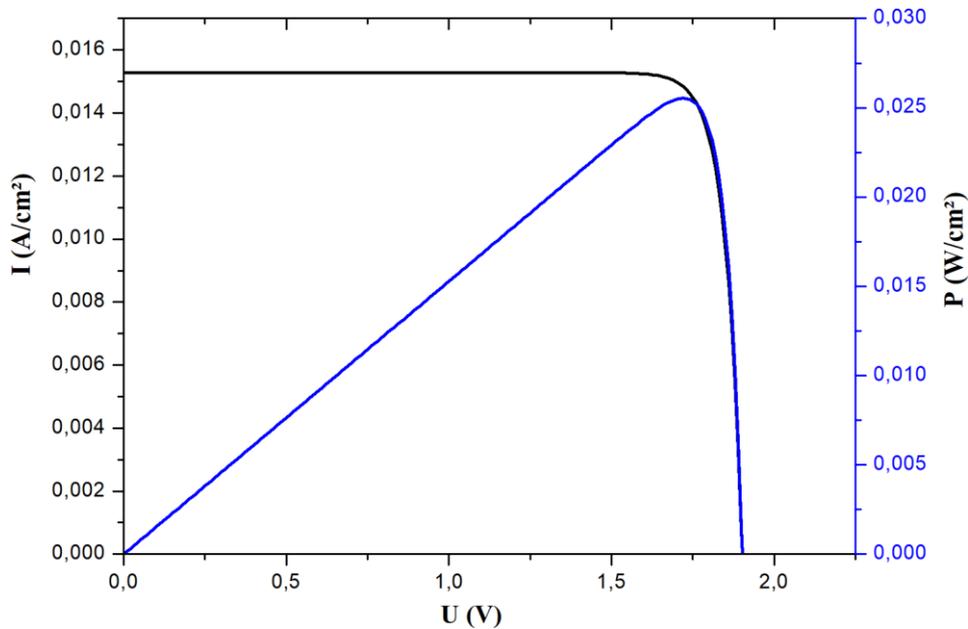


Figure III.6 Caractéristique I(V) de la cellule

**Discussion :** selon les figures (III.5-III.6), nous remarquons que notre cellule génère un photocourant indiquant la réalisation de la conversion photovoltaïque. Pour le cas général, où la température est considérée 298K et l'éclairement de 1000W/m<sup>2</sup>, le courant de court-circuit prend la valeur de 0.0153A/cm<sup>2</sup> et la tension du circuit-ouvert est de 1.42V. Cependant la puissance maximale vaut 0.019.2W/cm<sup>2</sup> avec ( $I_m=0.0148A/cm^2$  et  $V_m=.29V$ ). Ce qui nous a mené à un rendement de 19.2% ; une valeur si proche à celle de l'expérimental (voir tableau III.6).

### III.2. Influence du facteur d'idéalité

Pour l'influence des paramètres de la cellule sur ses caractéristiques, nous avons choisi d'étudier l'influence du facteur d'idéalité (figure III.7)



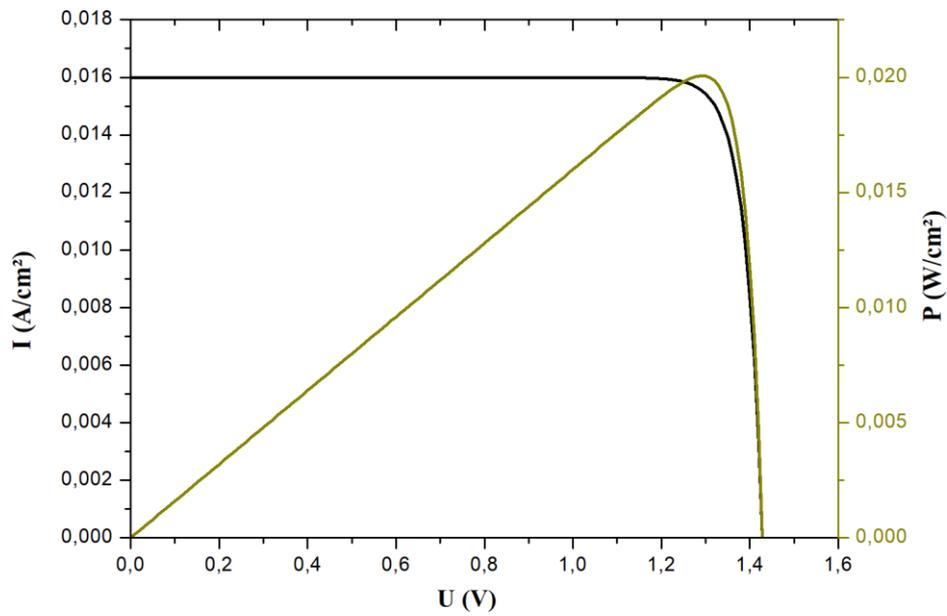
**Figure III.7** Influence de  $n$  sur  $I(V)$  et  $P(V)$  à  $T=298K$ ,  $\Phi=1000W/m^2$

**Discussion :** en changeant le facteur d'idéalité à  $n=2$ , nous avons obtenu les résultats de la figure ci-dessus. Ou,  $I_{cc}= 0.0153A/cm^2$  ;  $V_{co}=1.90V$  avec une puissance maximale de 0.0255W/cm<sup>2</sup>. Dans ce cas, le rendement de la cellule a augmenté pour atteindre 25.5%.

### III.3. Influence du coefficient d'absorption

Le coefficient d'absorption a une relation avec la mobilité des électrons. À ce principe que nous avons procédé à vérifier l'influence de ce dernier.

## Simulation du modèle d'une cellule solaire en GaAs



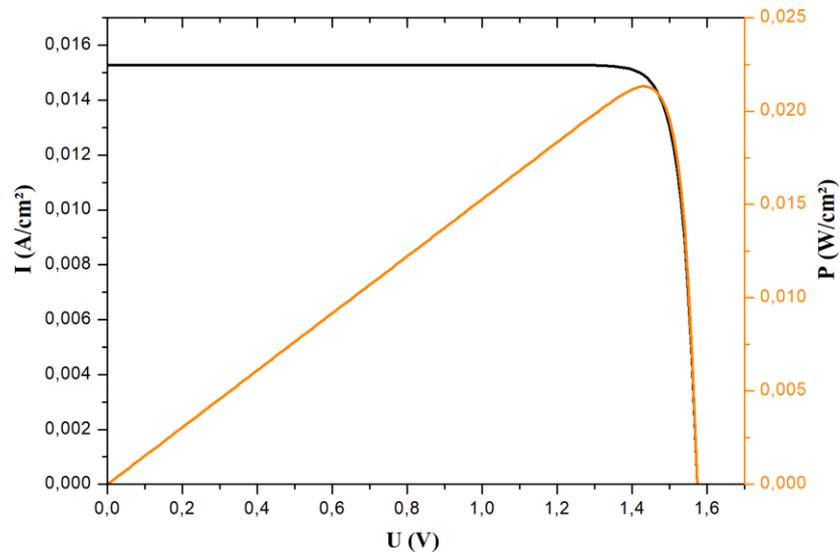
**Figure III.8** Influence de  $\alpha$  sur  $I(V)$  et  $P(V)$  à  $T=298K$ ,  $\Phi=1000W/m^2$

**Discussion :** pour un facteur d'idéalité de 1.5, nous avons considéré que le coefficient d'absorption est de  $9400cm^{-1}$ . Ainsi, nous remarquons que  $I_{cc}=0.016A/cm^2$  ;  $V_{co}=1.42V$  et une puissance maximale  $P_m=0.020W/cm^2$ . Cependant le rendement devient 20.1%.

### III.4. Influence de la concentration des électrons

Lors de cette étude nous avons procédé au changement de la concentration des électrons, ou nous avons pris une valeur inférieure à celle proposée lors de l'expérience et qui vaut  $0.1 \cdot 10^6 /cm^3$  ; pour  $n=1.5$  et  $\alpha=4400/cm^{-1}$

## Simulation du modèle d'une cellule solaire en GaAs



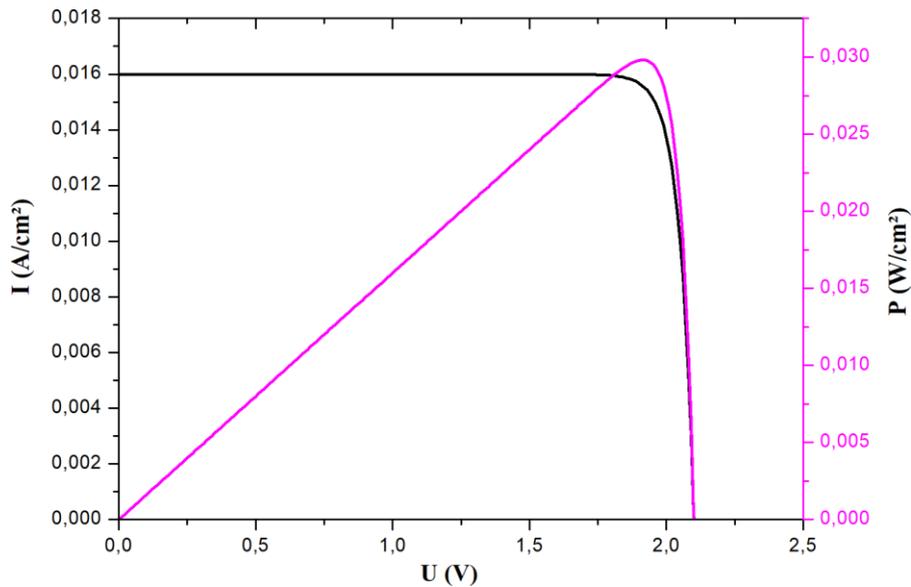
**Figure III.9** Influence de  $n_0$  sur  $I(V)$  et  $P(V)$  à  $T=298K$ ,  $\Phi=1000W/m^2$

**Discussion :** les valeurs affichées sont :  $I_{cc}=0.0153A/cm^2$  ;  $V_{co}=1.57V$  et puissance maximale  $P_m=0.0213W/cm^2$ . Cette évaluation a procédé à un rendement de 21.3%.

### III.5. Modélisation de la cellule GaAs

Après avoir étudié l'influence de quelques paramètres de la cellule étudiée théoriquement et expérimentalement, nous avons conçu notre modèle de cellule qui aboutira à un rendement plus élevé. Dans ce cas, nous avons considéré que le facteur d'idéalité  $n=2$  ; le coefficient d'absorption  $\alpha=9400/cm^{-1}$  et la densité des électrons  $n_0=1.6*10^6/cm^3$ , la température  $T=298K$  et l'éclairement  $\Phi=1000W/m^2$ .

## Simulation du modèle d'une cellule solaire en GaAs



**Figure III.10** Caractéristiques I(V) et P(V) pour la cellule modélisée à  $T=298K$ ,  $\Phi=1000W/m^2$

**Discussion :** la figure III.10 montre que la valeur de  $I_{cc}=0.016A/cm^2$  ;  $V_{co}=2.1V$  et la puissance maximale  $P_m=0.0298W/cm^2$ . A ce, le rendement de notre cellule modélisée devient 29.8% une valeur supérieure à celle de la cellule que nous avons pris comme exemple.

**Tableau III.8 :** Comparaison entre cellule théorique et cellule modélisée

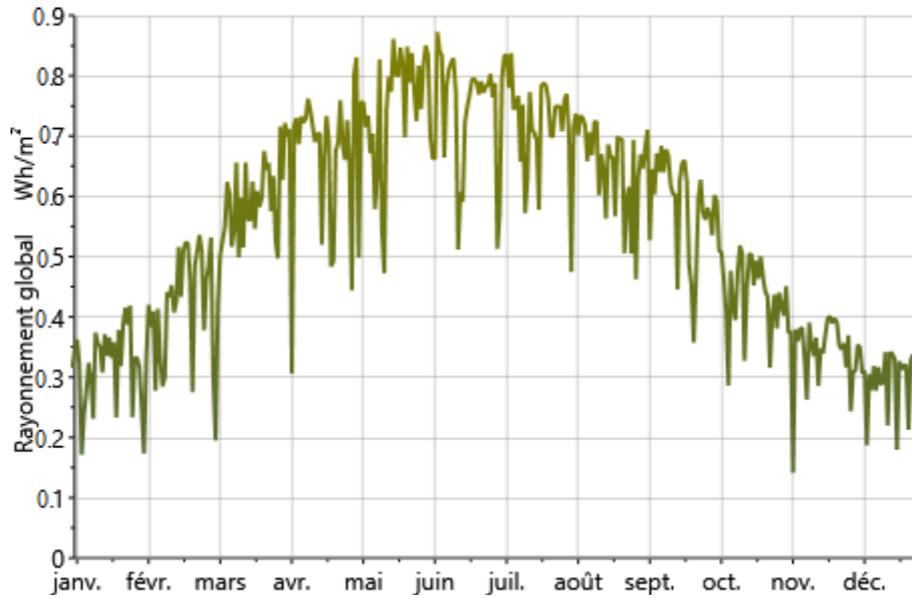
|                          | <b>I<sub>cc</sub> (mA)</b> | <b>V<sub>co</sub> (V)</b> | <b>FF</b> | <b>η(%)</b> |
|--------------------------|----------------------------|---------------------------|-----------|-------------|
| <b>Théorie</b>           | 116.1                      | 1.02                      | 0.85      | 18.5        |
| <b>Expérimental</b>      | 119.8                      | 1.02                      | 0.84      | 19.0        |
| <b>Cellule modélisée</b> | 156                        | 2.1                       | 0.88      | <b>29.8</b> |

### III.6. Caractéristiques I(V) et P(V) de la cellule modélisée dans le cas réel

Nous avons entamé l'étude des caractéristiques de la cellule dans le cas réel ou le changement de température et de l'éclairement solaire.

Avant d'afficher les graphes nous avons réalisé une étude sur le rayonnement solaire annuel pour la ville de Tlemcen, située au Nord-Ouest de l'Algérie, pour l'année 2021

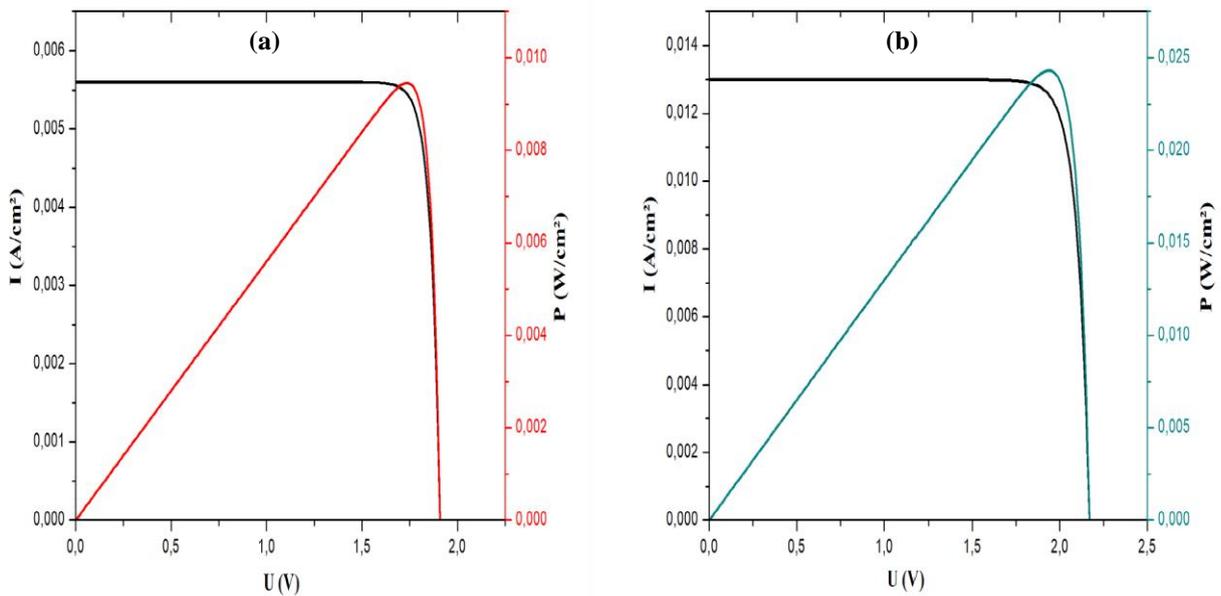
### Simulation du modèle d'une cellule solaire en GaAs



**Figure III.11** variation du rayonnement solaire annuel (année 2021) [57]

Nous observons une augmentation d'intensité dans le mois de juin et une faible intensité dans le mois de décembre qui valent  $850\text{Wh/m}^2$  et  $350\text{Wh/m}^2$  respectivement. Pour des températures ambiantes moyennes de  $400\text{K}$  en juin et  $278\text{K}$  en décembre (figure III.11)

Ces valeurs vont être interprétées pour tracer les variations des caractéristiques de la cellule modélisée dans le cas d'une température et intensité solaire élevées et dans le cas contraire.



**Figure III.12** Caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$  pour la cellule modélisée ; (a) en Décembre, (b) en Juin

## Simulation du modèle d'une cellule solaire en GaAs

**Discussion :** nous remarquons une diminution du courant  $I_{cc}$  et la tension  $V_{co}$  ainsi la puissance maximale  $P_m$  dans le mois de décembre par rapport au mois de juin. D'où nous avons atteint un rendement de 24.3% dans la période chaude.

### Conclusion

Durant ce chapitre nous avons présenté une bibliographie du matériau GaAs. Ensuite nous nous sommes basé sur la simulation d'une cellule théorique et l'influence de quelques paramètres sur ses caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$  pour qu'à la fin nous ayons procédé à la modélisation d'un modèle de cellule en GaAs qui permettra un rendement plus élevé.

Nos calculs de simulation nous ont permis une cellule en GaAs avec un rendement de 29.8%. en la passant à une étude réelle, nous avons remarqué que le rendement chute de 0.8% par rapport au cas idéal.

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

Ce présent travail est focalisé sur la simulation des caractéristiques d'une cellule solaire à base de GaAs, dans le but d'aboutir à un meilleur rendement électrique possible. La simulation numérique s'est faite à l'aide de l'outil mathématique MATLAB.

De ce fait une étude bibliographique a été présentée afin de nous permettre une bonne compréhension vis-à-vis le sujet de notre étude. Ensuite, nous avons poursuivi par les différentes technologies des cellules photovoltaïques mises en étude.

Cependant, la poursuite de notre avancement était par la partie simulation et interprétation des résultats. Pour cela nous avons considéré une cellule à base de GaAs déjà mise en étude théorique qu'expérimentale. Cette dernière avait un taux de rendement de 18.5% par voie théorique et 19% en expérimental.

En tenant compte des conditions idéales de  $T=298K$  et intensité solaire de  $1000W/m^2$ , nous avons abouti à un rendement qui vaut 19.2%, une valeur proche à celle obtenue en expérimentation.

Hors, pour s'approfondir dans la simulation, nous avons considéré une variation de quelques paramètres qui nous semblé influencer sur les caractéristiques de la cellule comme ; coefficient d'absorption, densité des électrons et facteur d'idéalité. Nous avons procédé de la manière à ce qu'à chaque fois nous variant un paramètre les deux autres sont considérés constants. Pour cela, l'influence du facteur d'idéalité avec une valeur supérieure à celle de la théorie, nous a mené à un rendement plus élevé de 25.5%. Par conséquent, en augmentant la valeur du coefficient d'absorption, la valeur du rendement a chuté pour 20.1% par rapport à l'influence du facteur d'idéalité mais une valeur supérieure à la théorie. Terminons par l'influence de la densité des électrons, ou la diminution de cette dernière engendre une élévation dans le rendement qui valait 21.3% par rapport à la théorie.

Enfin, notre simulation s'achèvera par présenté un modèle pour notre mémoire d'une cellule à base de GaAs, ou en tenant compte de l'influence des trois paramètres cités au paravent et dans les conditions idéales, nous avons pu aboutir à un rendement de 29.8%, d'où notre objectif fut atteint.

Hors, pour mieux confirmer ce résultat nous avons lancé une simulation de notre modèle pour des températures et intensités solaires maximales et minimales que la région de Tlemcen a atteint durant l'année 2021. Nous avons remarqué une baisse de rendement de 0.8% au moment d'une température et intensité solaire élevée avec une valeur de 24.3%.

## **Conclusion générale**

Nous souhaiterons passer à la réalisation de cette cellule qui est le modèle que nous avons proposé durant ce mémoire pour que nos résultats de simulation seront validés.

# Références

## Références

- [1] Becquerel, E. (1839). Mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires. *Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences*, 9, pp. 561-567.
- [2] Einstein, A (1905). *Annal.Physik*, 17, p.132
- [3] Blakers, A. W. and Green, M. A. (1986) « 20% efficient silicon solar cell », *Appl. Phys. Lett.*, 48, 215-217
- [4] José Miguel Navarro « Cellules Photovoltaïques Organiques Transparentes Dans Le Visible ».Thèse de doctorat. Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2008.
- [5] Akassewa Tchapo Singo « Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome ». Thèse de doctorat, Université de Henri Poincaré, Nancy-I, 2010.
- [6] Benis Halouma « Contribution à la modélisation du problème de Hot Spot dans les modules solaire Photovoltaïque occultées ». Mémoire de magister en électrotechnique, Université Mentouri de Constantine, 2008.
- [7] Souad Saadi « Effet des paramètres opérationnels sur les performances d'un capteur solaire plan ». Mémoire de magister en Physique, Université Mentouri de Constantine, 2010.
- [8] A. Mahfoud, Modélisation des cellules solaires tandem à couches minces et à haut rendement, thèse doctorat en sciences, université setif 1, 18/02/2015
- [9] G. Boyle. Énergie renouvelable : énergie pour un avenir durable, 2e éd. Oxford, Royaume- Uni : Oxford University Press, 2004.
- [10] Monsieur Solar. Effet photovoltaïque, (13 août 2015).
- [11] Lumensol - Solaire photovoltaïque - Données techniques

## Références

[12] Nichiporuk Oleksiy « Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrière interdigités ». Thèse de doctorat, L'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2005.

[13] <http://docplayer.fr/1102687-Republique-algerienne-democratique-et-populaireministere-de-l-enseignement-superieur-et-de-la-recherche-scientifique.html>

[14] L. Benhabib, modélisation d'un système mixte entre le collecteur cylindro-parabolique et les cellules en ZnO, Thèse Doctorat, université Tlemcen, juillet 2021

[15] Roshanak Radbeh «Réalisation et caractérisation des cellules solaires organiques à couches composites polymères incluant des nanotubes de carbones ». Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2008.

[16] Petibon Stéphane « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques ». Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2009.

[17] R. Maouedj, 'Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah'. Mémoire De Magistère Décembre 2005.

[18] R. Khezzar et al. « Comparaison entre les différents modèles électriques et détermination des paramètres de la caractéristique I-V d'un module photovoltaïque ». revue des Energie Renouvelables Vol.13 N° 3, pp 379-388, 2010.

[19] [www.photovoltaiik-web.de](http://www.photovoltaiik-web.de)

[20] Gul M 2016 Revue sur la tendance récente du Solar Photovoltaic Technology Sage, 492.

[21]. Trupke, T., Zhao, J., Wang, A., Corkish, R. & Green, M. A. Émission lumineuse très efficace à partir de silicium cristallin en vrac. Appl. Phys. Lett. 82, 2996–44107 (2003).

[22] Shah A V 2004 Technologie des cellules solaires en silicium à film mince John Willy et fils, 1-2

## Références

- [23]. Wu, J.-L., Hirai, Y., Kato, T., Sugimoto, H. & Bermude, V. Nouveau record mondial d'efficacité à 22,9 % pour les cellules solaires à couches minces Cu(In,Ga)(Se,S)<sub>2</sub>. à la 7e Conférence mondiale sur Conversion de l'énergie photovoltaïque (WCPEC-7) (2018).
- [24]. Paudel, N. R., Poplawsky, J. D., Moore, K. L. et Yan, Y. Amélioration actuelle des cellules solaires à base de CdTe. *IEEE J. Photovoltaics* 5, 1492–1496 (2015).
- [25]. Zhao, Y. et al. Cellules solaires CdTe monocristallines avec une tension en circuit ouvert supérieure à 1 V et un rendement de 17 %. *Nat. Énergie* 1, 16067 (2016).
- [26]. Gloeckler, M., Sankin, I. & Zhao, Z. Cellules solaires CdTe au seuil de 20 % d'efficacité. *IEEE J. Photovoltaics* 3, 1389–1393 (2013).
- [27] Queisser S 1961 Limite d'équilibre détaillée de l'efficacité des cellules solaires à jonction p-n *Journal of Applied Physics*, 510-519
- [28] MA Steiner JG 2013 Amélioration optique de la tension en circuit ouvert dans les cellules solaires GaAs de haute qualité *Journal of Applied Physics*, 113
- [29] Schubert M G 1995 Constantes optiques du réseau Ga<sub>x</sub>In<sub>1-x</sub>P appariées à GaAs *Journal of Applied Physics*, 3416-3419
- [30] JF Geisz M S 2013 Efficacité radiative externe améliorée pour les cellules solaires GaInP à jonction unique efficaces à 20,8 % *Applied Physics Letters*, 41118
- [31]. Gokmen, T., Gunawan, O., Todorov, T. K. & Mitzi, D. B. Bande de traînée et limitation d'efficacité dans les cellules solaires kesterite. *Appl. Phys. Lett.* 103, 103506 (2013).
- [32]. Kim, S., Parc, J. S. & Walsh, A. Identification des défauts de tueur dans la semelle film-mince Cellules solaire. *ACS Energy Lett.* 3, 496-500 (2018).
- [33]. Snaith, H. J. Statut actuel et perspectives d'avenir de la photovoltaïque Perovskite. *Nat. Mater.* 17, 372-376 (2018).

## Références

- [34]. Swarnkar, A. et al. Stabilisation de phase induite par points quantiques de pérovskite  $\alpha$ -CsPbI<sub>3</sub> pour le photovoltaïque à haut rendement. *Sciences* 354, 92–95 (2016).
- [35]. Sanehira, E. M. et al. Mobilité améliorée CSPBI 3 Tableaux de points quantiques pour l'efficacité enregistrée, les cellules photovoltaïques haute tension. *SCI. Adv.* 3, EAAO4204 (2017).
- [36] Li et al., Selective, sensitive and reversible “turn-on” fluorescent cyanide probes based on 2,20 -dipyridylaminoanthracene–Cu<sup>2+</sup> ensembles, *ChemComm*, communication, 2012
- [37] Dun et al., Flexible n-type thermoelectric films based on Cu-doped Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> nanoplate and Polyvinylidene Fluoride composite with decoupled Seebeck coefficient and electrical conductivity, *Science Direct*, 306-314, 18, 2015
- [38] Yu et al., Polymer Photovoltaic Cells: Enhanced Efficiencies via a Network of Internal Donor-Acceptor Heterojunctions *science*, 1789-1791, 270, 1995
- [39] Collavini et al., Understanding the Outstanding Power Conversion Efficiency of Perovskite-Based Solar Cells, *wiley online library*, 2015
- [40] Takamoto T I 1997 Cellules solaires à simple et multi-jonction à couche mince. *Journal japonais de physique appliquée* 36, 6215–6220
- [41] Jain N S 2017 GaInAsP/GaInAs solaire tandem avec 32,6 % d'efficacité solaire IEEE 44e spécialiste photovoltaïque Conférence, 5-8
- [42] Shahrjerdi D B 2013 Cellules solaires tandem InGaP/(In)GaAs flexibles ultralégères à haut rendement sur plastique *Advanced Energy Matériaux*, 566-571
- [43] Green M A 2003 Photovoltaïque de troisième génération : Conversion avancée de l'énergie solaire Springer, 65
- [44] B.A. Butler et al., Characterization of a low concentrator photovoltaics module, *Physica B*, 407,1501-1504, 2012

## Références

- [45] Green, M.A. et al, Hole Transport Layer Free Inorganic CsPbIBr<sub>2</sub> Perovskite Solar Cell by Dual Source Thermal Evaporation, wiley library, 2016
- [46] Omar IVLA. (1975), E[ementary Solid Siale Physics. Addison-Wesley, Reading, Mass.
- [47] Scheiman, DA; Brinker, DJ ; Bents, DJ ; Colozza, AJ Conception d'un générateur solaire GaAs/Ge pour véhicules aériens sans pilote. Dans Actes du compte rendu de la conférence de la conférence des spécialistes du photovoltaïque de l'IEEE, Waikoloa, HI, États-Unis, 5–9 décembre 1994 ; Volume 2, pages 2006–2009.
- [48] H. C. Casey, “Diffusion in III-V Compound Semiconductors,” Atomic Diffusion in Semiconductors, D. Shaw, Editor, Plenum, New York, 1973.
- [49] S. Y. Chiang, “Properties of Vacancy Defects in GaAs Single Crystals,” J. Appl. Phys., Vol. 45, p. 2986, 1975.
- [50] N. Yahiaoui, Modélisation et méthodes d'extraction des paramètres des caractéristiques électriques dans les nanomatériaux, Mémoire Master, université de Béjaia, 2017
- [51] S. P. Tobin, S. M. Vernon, S. J. Wojtczuk, C. Bajgar, M. M. Stutlacon, and T. M. Dixon, « advances in high-efficiency GaAs.solar cells », Presented at Twenty-ftirst IEEE Photovoltaic Specialist Conference may 1990.
- [52] Ronald c. Knechtli, S. Member, IEEE, Roobert Y. Loo, and G. S. Kamath, « HighEfficiency GaAs Solar Cells», IEEE Transactions on electron Devices, Vol.ED-31, NO.S, May 1984.
- [53] M. Green, J. Zhao, A. Wang, S.R. Wenham ,« Progress and outlook for highefficiency Crystalline silicon solar cells», Solar Energy Materials & Solar Cells 65 (2001) 9}16.
- [54] M. H. Colder, « Croissance basse température de films minces de carbure de silicium nanocristallisé : propriétés et performances d'hétérojonctions SiC/Si», Thèse Doctorat, Université de caen /basse –Normandie, 2005

## Références

[55] S. Khelifi , M. Burgelman , J. Verschraegen , Ab.R. Belghachi, «Impurity photovoltaic effect in GaAs solar cell with two deep impurity levels », Solar Energy Materials & Solar Cells 92 (2008) 1559–1565.

[56] Kwok K. Ng, «complete guide to semiconductor devices », international edition, 1995

[57] Programme Meteoronorme 8

## ملخص

الطاقة الشمسية الكهروضوئية هي تحول مباشر لجزء من الإشعاع الشمسي إلى طاقة كهربائية. يتم تحويل الطاقة هذا عن طريق خلية شمسية تعتمد كفاءتها على نطاق الطيف الشمسي الممتص. في الوقت الحاضر، يتم استخدام الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة بشكل متزايد بشكل أساسي بسبب تكلفتها المنخفضة. يتكون هذا العمل من محاكاة ونمذجة خلية شمسية بناءً على مادة GaAs. تم إجراء المحاكاة بواسطة الأداة الرياضية Matlab. بدأت الدراسة بتأثير ثلاثة معلمات على خصائص  $I(V)$  و  $P(V)$  للخلية، وهي العامل المثالي ومعامل الامتصاص وكثافة الإلكترون. سمحت لنا النتائج التي تم الحصول عليها بنمذجة خلية تعتمد على GaAs بعائد 29.8%. ثم استمرت محاكاتها بدراسة حقيقية تكون درجات حرارتها وشدتها الشمسية في شهري يناير وديسمبر لعام 2021 في منطقة تلمسان. أو العائد لينخفض قليلاً ليصبح 24.3%.

**الكلمات الرئيسية:** الخلايا الشمسية؛ GaAs؛ محاكاة، كهروضوئية

## Résumé

L'énergie solaire photovoltaïque est une transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule solaire dont le rendement dépend de la gamme du spectre solaire absorbé. De nos jours, les cellules solaires à couches minces sont de plus en plus utilisées principalement en raison de leur faible coût. Ce travail consiste à simuler et modéliser une cellule solaire à base du matériau GaAs. La simulation a été réalisée par l'outil mathématique Matlab. L'étude a débuté par l'influence de trois paramètres sur les caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$  de la cellule, qui sont le facteur d'idéalité, le coefficient d'absorption et la densité d'électrons. Les résultats obtenus nous ont permis de modéliser une cellule à base de GaAs avec un rendement de 29.8%. ensuite notre simulation a poursuivi par une étude réel dont les températures et intensités solaires sont celles des mois de janvier et décembre pour l'année 2021 dans la région de Tlemcen. Ou le rendement à légèrement diminuer pour devenir 24.3%

**Mots clés :** cellule solaire ; GaAs ; simulation, photovoltaïque

## Abstract

Photovoltaic solar energy is a direct transformation of part of the solar radiation into electrical energy. This energy conversion is carried out by means of a solar cell whose efficiency depends on the range of the solar spectrum absorbed. Nowadays, thin-film solar cells are increasingly used mainly because of their low cost. This work consists in simulating and modeling a solar cell based on the GaAs material. The simulation was carried out by the mathematical tool Matlab. The study began with the influence of three parameters on the  $I(V)$  and  $P(V)$  characteristics of the cell, which are the ideal factor, the absorption coefficient and the electron density. The results obtained allowed us to model a cell based on GaAs with a yield of 29.8%. then our simulation continued with a real study whose temperatures and solar intensities are those of January and December for the year 2021 in the Tlemcen region. Or yield to slightly decrease to become 24.3%

**Keywords:** solar cell; GaAs; simulation, photovoltaic