

## *Remerciement*

Nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire. Puis – faut il le souligner- ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu voir le jour sans la précieuse aide et le rigoureux encadrement de Mr NACER Said.

Nous le remercions pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.

Nous tenons également à remercier messieurs les membres de jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de siéger à notre soutenance.

Nous tenons aussi à exprimer notre profonde gratitude à nos familles qui nous ont toujours soutenus, à tous ceux qui ont participé à la réalisation de ce mémoire et à l'ensemble des enseignants qui ont contribué à notre formation.

Je dédie ce modeste travail à :

À mes parents .Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour Dont ils ne cessent de me combler. Que dieu leur procure bonne santé et longue vie.

À Mes enseignants M Ferdjani, M Aissat, MBounemri Mme Naceur Mme Boughrira, Mme Assad, qui n'ont pas hésité à me venir en aide durant trois années d'études nous ont transmis leur savoir sans réserve.

À mes frères et sœurs en témoignage des liens fraternels solides qui nous unissent. Aucune dédicace ne saurait leur exprimer mes sentiments. Je leurs souhaite beaucoup de bonheur et de réussite.

À mes grands-parents

À Mon binôme et mon frère LOGRADA Ayoub

À tous mes camarades de l'option master MOP promo 2014-2015

À tous ceux qui me sont chers.

Enfin, un grand remerciement à l'ensemble des personnes qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail

*JFREX* Amine

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers Frères et Sœurs et mes Familles qui n'ont pas cessé de m'encourager et me soutenir dans les moments difficiles et qui ont prié Dieu pour moi, et qui ont su m'entourer de toute leur affection et amour.

Puis je tourne vers les personnes qui ont contribué et qui ont fait part de ma modeste réussite. je remercie infiniment mes professeurs de licence qui m'ont aidé pour faire le premier pas dans ma vie professionnelle, Madame Naceur, Madame Bougherira Hamida et Nadia, Madame Assad, pour leurs aides leurs patience, mais aussi tolérance avec moi.

Enfin, je tiens à remercier tous mes amis et collègues pour leur soutien moral tout au long de cette préparation.

Je vous exprime ma sincère gratitude pour tous ce que vous m'avez apporté de près ou de loin. Merci infiniment.

**LOGRADA Agoub**

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne démocratique et populaire

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

جامعة سعد دحلب البليدة  
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك  
Département d'Électronique



## Mémoire de Projet de Fin d'Études

présenté par

Lagrada Ayoub

&

Ifrek Amine

Pour l'obtention du diplôme de Master en Électronique option

Micro-Optoélectronique

---

Thème

---

# Simulation d'une cellule solaire double jonction à base InGaN/Si

---

Proposé par : Mr Nacer said

Année Universitaire 2014-2015

---

## ملخص:

الخلايا الكهروضوئية تحول الطاقة الضوئية مباشرة إلى طاقة كهربائية بواسطة الخلايا الشمسية. بناء على الاحتياجات، والكهرباء المولدة يمكن استخدامها لتوفير موقع واحد أو بيعها كلياً أو جزئياً إلى شبكة التوزيع. هذا العمل هو دراسة ومحاكاة الخلايا الشمسية على أساس تقاطعات المزدوجة المواد InGaN والسيليكون. بعد أن ذكر مبدأ التشغيل وخصائص الخلايا الشمسية، وتمت دراسة تأثير تركيز الإنديوم وسمك InGaN خلية العلوية على خصائص الخلية. وتبين نتائج المحاكاة أن تركيز الإنديوم يؤثر بشكل كبير على كفاءة الخلية، كما تم الحصول على عائد أفضل من 27% لتركيز الإنديوم من 40% من قبل خلية جنباً إلى جنب، والعائد 29% لتركيز الإنديوم من 40-50% خلال الخلية.

**كلمات المفاتيح:** الخلايا الشمسية، المحاكاة الضوئية، الخلايا الكهروضوئية.

---

## Résumé:

La cellule solaire convertit directement l'énergie lumineuse en énergie électrique par des cellules solaires. Selon les besoins, l'électricité produite peut être utilisée pour l'alimentation d'un site isolé ou revendue en tout ou partie au réseau de distribution. Ce travail consiste à étudier et simuler une cellule solaire double jonctions à base du matériau InGaN et silicium. Après avoir rappelé le principe de fonctionnement et les caractéristiques d'une cellule solaire, l'influence de la concentration d'indium et de l'épaisseur de la cellule du haut InGaN sur les caractéristiques de la cellule a été étudié. Les résultats de simulation montrent que la concentration d'indium influe considérablement sur le rendement de la cellule, aussi un rendement optimal de 27% a été obtenu pour une concentration d'indium de 40% en cellule tandem, et un rendement de 29% pour une concentration d'indium de 40-50% en cellule cascade.

**Mots clés :** photovoltaïque, simulation, rendement.

---

## Abstract:

Photovoltaic energy directly converts light energy into electric energy through solar cells. According to need, the generated electricity can either be used to power a remote site or resold, wholly or partly, to the distribution network. This work aims to study and simulate a double junction solar cell basically made of InGaN and silicon.

Following the reminding of the working principle is the study of the influence on the cell characteristics of both indium concentration and cell thickness of (at) high InGaN.

Simulation outcome shows that indium concentration has a major impact on the cell yield. Thus, an optimal return of 27% has been obtained from an indium concentration of 40% in tandem cell. In a cascade cell, an idium concentration of 40-50% has led to an output of 29%.

**Keywords:** solar cell, photovoltaic simulation, efficiency.

---

# Introduction générale

---

L'avenir énergétique mondial est l'une des questions majeures et d'actualité qui se pose sur la scène internationale. En effet les problèmes liés à la gestion de l'énergie dans le monde sont multiples. Il y a en premier lieu le danger de la radioactivité sur la vie humaine que causent les explosions des centrales nucléaires comme les accidents enregistrés à Tchernobyl en Ukraine en avril 1986 et à Fukushima au Japon en mars 2011. A cela s'ajoutent les effets néfastes liés à l'environnement engendrés par la difficulté de l'élimination des déchets nucléaires et les rejets du gaz du dioxyde de carbone CO<sub>2</sub> causé par l'utilisation des énergies fossiles comme le pétrole et le gaz naturel. Par ailleurs, les réserves des énergies fossiles ne sont pas inépuisables. Ces multiples raisons donnent un regain d'intérêt au développement et à l'utilisation des énergies renouvelables sous ces différentes formes : photovoltaïque, éolienne et thermique.

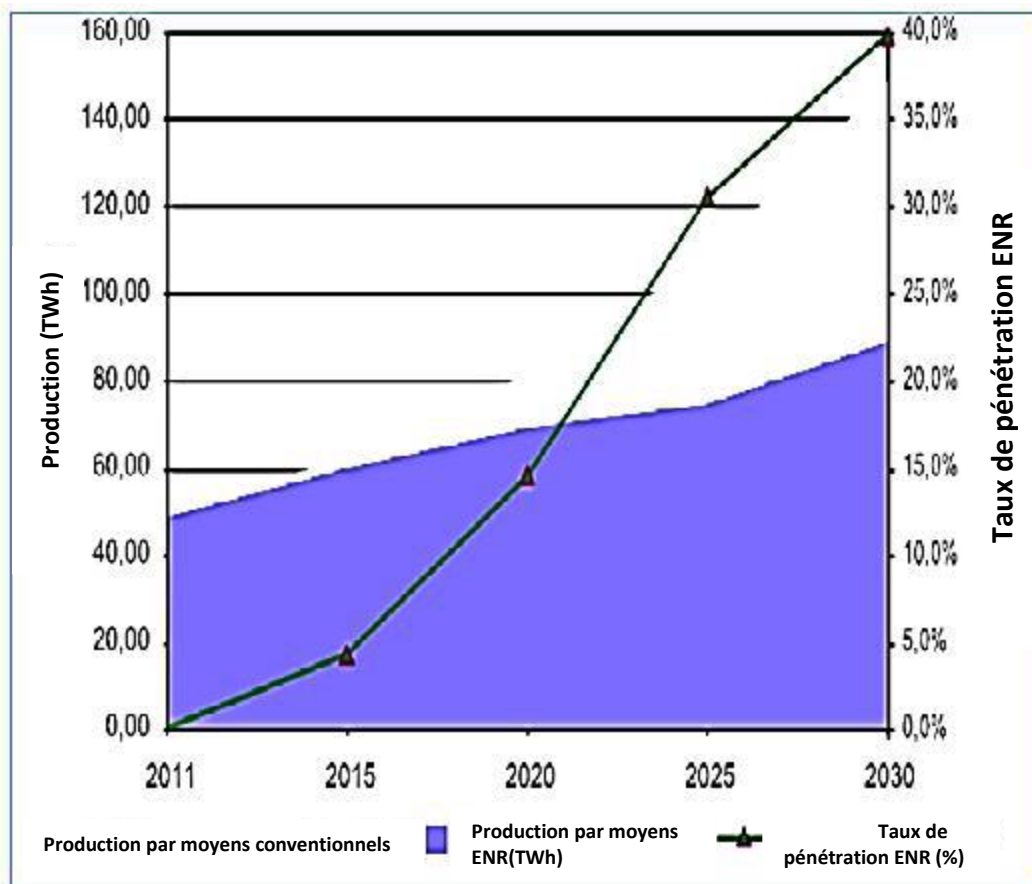
L'Algérie entreprend un engagement dans ce sens afin de préserver l'environnement et les ressources énergétiques d'origine fossile comme le pétrole et le gaz naturel. Vu le gisement solaire important dont dispose l'Algérie, le programme national des énergies renouvelables se concentre essentiellement sur le développement de l'énergie photovoltaïque. Le tableau montre le potentiel solaire en Algérie.

Régions	Régions Côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (heure/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m <sup>2</sup> /an)	1700	1900	2650

**Tableau 1** : Potentiel solaire en Algérie. [1]

# Introduction générale

L'objectif de la stratégie du développement de l'énergie photovoltaïque en Algérie est d'atteindre 37% de la production nationale d'électricité d'ici 2030 comme le montre la figure1.



**Figure(1)** : Pénétration des énergies renouvelables dans la production nationale TWh. [2]

# Introduction générale

---

L'obstacle que rencontre la production de l'électricité solaire est lié à l'augmentation de son prix de revient en comparaison aux sources des énergies conventionnelles. Le paramètre important qui maintient le coût élevé de l'électricité solaire est le prix de revient de la production des panneaux solaires dû au prix de revient de la fabrication des cellules solaires qui constituent ces panneaux.

En effet, le rapport rendement physique / rendement économique des cellules solaires est un paramètre qu'il faut augmenter afin de réduire le prix de revient de l'électricité solaire. Parmi les possibilités qui permettent d'augmenter ce rapport, la recherche de nouvelles structures et de nouveaux matériaux dans la conception des cellules solaires demandant un faible budget de fabrication est l'une des voies principales.

Les nouvelles connaissances acquises dans le domaine des matériaux et des nouvelles structures permettent d'exploiter l'apport de chacun de ces deux paramètres à l'augmentation du rendement photovoltaïque tout en diminuant le prix de revient des nouvelles cellules solaires.

L'amélioration du rendement de conversion photovoltaïque nécessite l'amélioration des mécanismes mis en jeu dans le processus de fabrication en faisant un bon choix pour la structure de la cellule.

Les cellules photovoltaïques présentant les plus hauts rendements sont composées de matériaux III-V. L'alliage InGaN, faisant également partie de cette catégorie de matériaux, possède aussi un fort potentiel pour des cellules solaires à haut rendement. L'avantage principal de cet alliage est son gap modulable sur quasiment tout le spectre solaire.

# Introduction générale

---

La technologie des cellules multi-jonctions permet d'optimiser l'absorption du spectre solaire et ainsi d'obtenir de meilleurs rendements. Pour cela, plusieurs jonctions P-N, possédant des gaps d'énergie différents, sont empilées

Le silicium est le matériau de base de 90% de l'industrie micro-électronique. Ses propriétés physiques, sa haute qualité cristalline et son faible coût font du silicium (Si) un substrat très attractif pour des composants à base de *GaN*. De plus, il ouvre la possibilité d'une intégration de composants optoélectroniques à base de *GaN* avec les composants électroniques à base de silicium.

Ce mémoire est organisé comme suit :

Dans le premier chapitre, nous présentons les caractéristiques du soleil tels que le spectre solaire, le corps noir, le flux incident ainsi que l'étude des matériaux *InGaN* et *Si* et leurs caractéristiques structurelles, électriques et optiques.

Le deuxième chapitre présente les caractéristiques d'une cellule solaire ainsi que les équations nécessaires aux simulations.

Le troisième chapitre présente les résultats de simulation d'une structure à base de *InGaN/Si*. Enfin nous terminons ce travail par une conclusion.

# Chapitre 2 physiques des cellules photovoltaïques

---

## 1.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons des généralités sur la source de l'énergie solaire (le soleil) et des notions fondamentales sur l'élément clé dans la conversion photovoltaïque (la cellule solaire).

L'énergie photovoltaïque résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique au moyen des cellules généralement à base de silicium cristallin qui reste la filière la plus avancée sur le plan technologique et industriel. En effet le silicium est l'un des éléments les plus abondants sur terre sous forme de silice non toxique. Le mot " photovoltaïque "vient du grec" photo "qui signifie lumière et de " voltaïque " qui tire son origine du nom d'un physicien italien Alessandro Volta (1754 -1827) qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité, alors le photovoltaïque signifie littérairement la « lumière électricité ».

L'effet photovoltaïque a été découvert par Alexandre Edmond Becquerel en 1839. L'effet photovoltaïque est obtenu par absorption des photons dans un matériau semi-conducteur qui génère alors une tension électrique.

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion directe du rayonnement solaire en électricité. Elle utilise pour ce faire des modules photovoltaïques composés de cellules solaires qui réalisent cette transformation d'énergie en produisant du courant continu, qui peut être utilisé pour alimenter un appareil ou recharger une batterie.

La conversion photovoltaïque a été réalisée pour la première fois dans le laboratoire Bell en 1954 sur une simple jonction **PN** au Silicium. Par la suite, plusieurs semi-conducteurs ont été utilisés pour cet objectif. Trois processus élémentaires interviennent dans l'effet photovoltaïque :

# Chapitre 2 physiques des cellules photovoltaïques

---

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

Il est donc clair qu'un matériau doit avoir des propriétés optiques et électriques spécifiques pour permettre la conversion photovoltaïque.

## 1.2 Energie Solaire photovoltaïque

L'épuisement des ressources fossiles, à plus ou moins long terme, la flambée des cours du brut et la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre rendent urgentes la maîtrise des consommations et la diversification des sources d'énergie : l'utilisation et le développement des énergies renouvelables.

On considère qu'une énergie est renouvelable, toute source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable (d'où son nom) à l'échelle de l'homme mais aussi dans certains cas de l'humanité (solaire par exemple). Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués principalement par le Soleil (l'énergie solaire mais aussi hydraulique, éolienne et biomasse...), la Lune (énergie marémotrice, certains courants : énergie hydrolienne...) et la Terre (géothermique profonde...).

Le rayonnement solaire constitue la ressource énergétique la mieux partagée sur la terre et la plus abondante :

# Chapitre 2 physiques des cellules photovoltaïques

---

La quantité d'énergie libérée par le soleil (captée par la planète terre) pendant une heure pourrait suffire à couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant un an.

Une partie de ce rayonnement peut être exploitée pour produire directement de la chaleur (solaire thermique) ou de l'électricité : c'est l'énergie solaire photovoltaïque. Ce mode de production ne nécessite pas de réseau de distribution. En effet on peut produire de l'énergie électrique là où on la consomme :

- Villages, maisons isolées (un tiers de la population mondiale n'a pas accès à l'énergie électrique).
- Relais de communication,
- Pompage de l'eau
- Refuges,
- ...

Certains pays mettent en place des mesures pour inciter à produire de l'électricité à partir de l'énergie solaire. Et dans ce cadre là, l'énergie produite est achetée à prix attractif (prix du kWh produit plus élevé que le prix du kWh consommé et facturé par le fournisseur d'énergie). [3]

## 1.3 Le soleil

### 1.3.1 Caractéristiques générales

Le Soleil est une « petite » étoile, une boule de gaz, dont le diamètre est de 1391 000 Km, et qui est placée à 150 000 000 km de nous (périhélie : 147,1 millions de km et aphélie : 152,1 millions de km). Cette distance est si grande que sa lumière nous parvient 8minutes après avoir été émise. [4]

## Chapitre 2 physiques des cellules photovoltaïques

---

Quant à son volume, il pourrait contenir 1 300 000 Terres. Avec une densité de 1,41 (contre 5,5 pour la Terre), sa masse est de 330 000 fois celle de la Terre ( $1,99 \cdot 10^{30}$  kg ou 2 milliards de milliards de milliards de tonnes). Il représente 99,867 % de la masse totale

Du système solaire, c'est-à-dire que l'ensemble de toutes les planètes et comètes ne représente que le millième du Soleil.

Il a déjà effectué 20 tours de la Galaxie en traversant des densités variables de poussières qui interceptent une partie du rayonnement qu'il nous envoie. Cela a dû certainement avoir des conséquences sur le climat terrestre. [5]

Bien que sa lumière soit 600 000 fois plus élevée que celle de la Lune (son miroir), il n'est visible qu'à une distance de 60 al (année-lumière). Notre Soleil est donc une énorme boule de gaz composée de 70% d'hydrogène et de 28% d'hélium, les 2% restants représentent la plupart des autres atomes présents dans l'univers. Il ne faut pas oublier non plus que les étoiles sont les usines qui créent tous les matériaux existant dans l'univers, à partir de l'hydrogène. Plus de 60 éléments chimiques furent identifiés, tel OH (radical hydroxyle), CH (radical méthyle) et aussi du titane, du plomb, du mercure, du chlore, du silicium, cuivre, calcium, indium, antimoine, zirconium, rhodium, etc... [6] On trouve, par exemple, 9 atomes d'or pour 1 000 milliards d'atomes d'hydrogène, soit la bagatelle de 10 millions de milliards de tonnes d'or ( $1 \cdot 10^{16}$  Tonnes). Outre les atomes, l'analyse du spectre solaire a permis de découvrir des molécules complexes (figure 1.1).

## Chapitre 2 physiques des cellules photovoltaïques

---

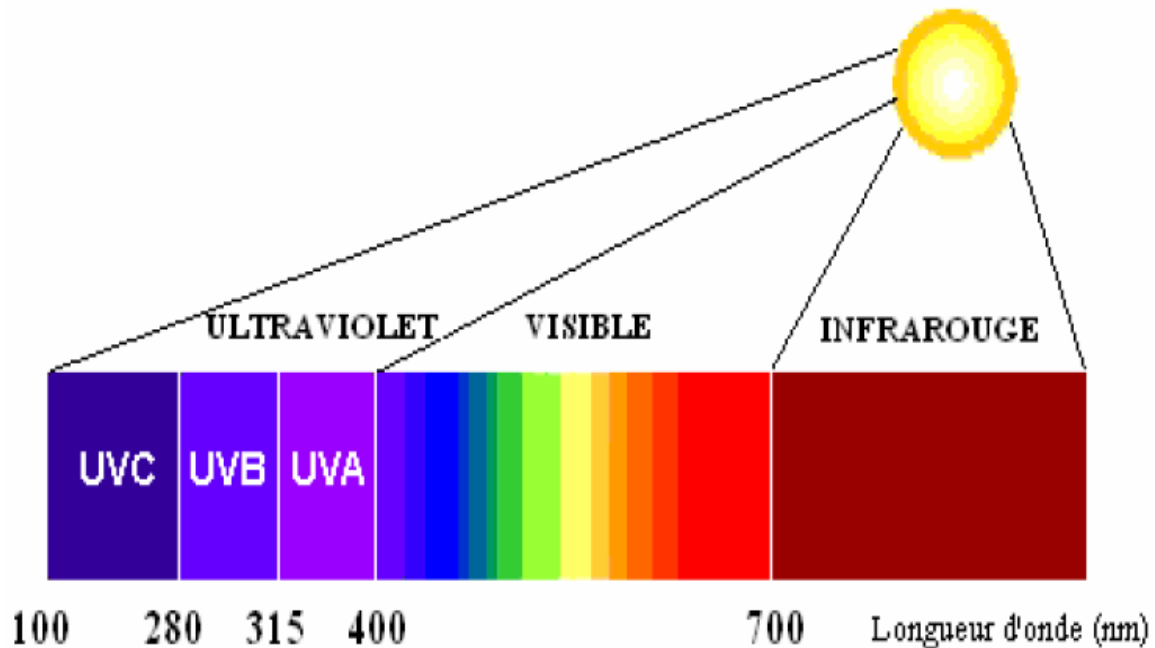


Figure (1.1) : Spectre solaire haute résolution. [7]

Il n'a pas de surface à proprement parler, mais la température de radiation, si on assimile le Soleil à un corps noir, est de 5 700 K selon la loi de Stephan, ce qui lui donne sa couleur jaune. La couleur est en relation directe avec la longueur d'onde, laquelle est liée à la température. Ainsi en analysant la couleur, nous pouvons obtenir facilement sa température de radiation. Au centre, il règne une pression 220 millions de fois plus grande que la pression atmosphérique de notre Terre (soit un gros pétrolier sur le bout du doigt !) qui est de 1033 hectopascal au niveau de la mer, entraînant une température de 15 millions K, et plusieurs millions de degrés dans les couches supérieures de son atmosphère (> 10 000 km à plusieurs millions de km).

# Chapitre 2 physiques des cellules photovoltaïques

## 1.3.2 Spectre solaire

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique, sa décomposition en longueurs d'onde est appelée spectre électromagnétique.

En effet, Il est composé de toutes sortes de rayonnement de couleurs différentes, caractérisées par leur gamme de longueur d'onde. La fréquence de la lumière détermine sa couleur. Les photons, grains de lumière qui composent ce rayonnement, sont porteurs d'une énergie qui est reliée à leur fréquence (longueur d'onde) par la relation :

$$E = h \nu = \frac{h c}{\lambda} \quad (1.1)$$

Où  $h$  est la constante de Planck,  $\nu$  la fréquence,  $c$  la vitesse de la lumière et  $\lambda$  la longueur d'onde. C'est cette relation mise à jour par Louis de Broglie en 1924 qui a confirmé la nature à la fois corpusculaire et ondulatoire de la lumière : présence de corpuscules « les photons » et propagation d'ondes avec une fréquence de vibration et une longueur d'onde.

La **figure (1.3)** montre la partie visible du spectre électromagnétique. La gamme des longueurs d'onde visibles est comprise entre **390 nm** (violet) à **780 nm** (rouge).

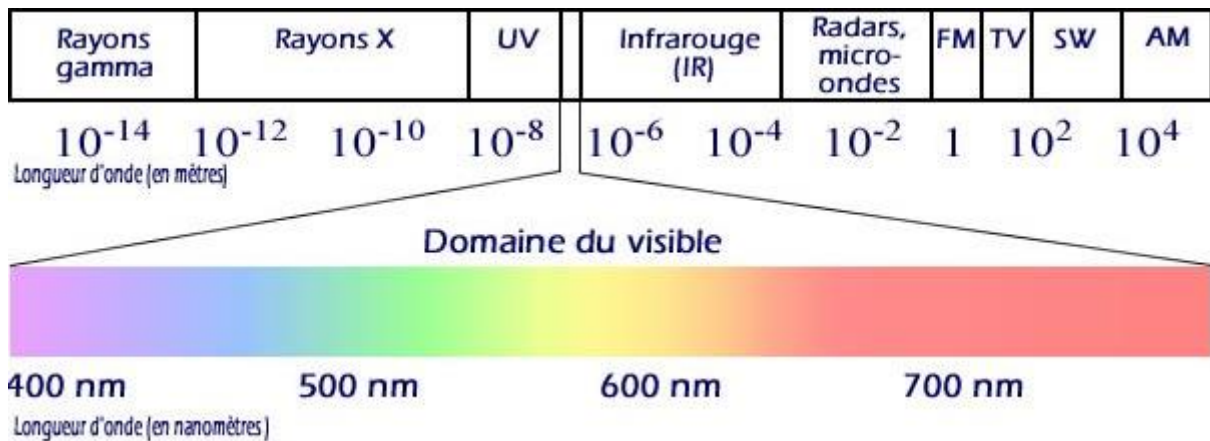


Figure (1.2) Spectre électromagnétique. [8]

# Chapitre 2 physiques des cellules photovoltaïques

---

## 1.3.3 Unités utilisées

**L'éclairement ou irradiance** est défini comme une puissance reçue par une surface. Il s'exprime en  $W/m^2$  (watt par mètre carré). Le S.I. (système international d'unités) recommande d'utiliser le symbole E.

**L'irradiation ou rayonnement** est l'énergie reçue par une surface. Elle s'exprime en  $J.m^{-2}$  (joule par mètre carré). L'ISES (International Solar Energy Society) Recommande le symbole H. D'autres unités plus courantes sont le  $Wh/m^2$  (wattheure par mètre carré) bien que ce dernier ne doit pas être utilisé puisque n'appartenant pas au système international d'unités (SI). [9]

## 1.4 Le rayonnement solaire

Les réactions thermonucléaires qui se produisent au sein du soleil, provoquent l'émission d'onde électromagnétique de très forte puissance ou rayonnement thermique solaire.

L'énergie solaire reçue par la terre en dehors de l'atmosphère est environ  $1370W/m^2$ . Cette grandeur est appelée constante solaire.

Le domaine de longueur d'onde utile pour les applications solaires est situé entre  $0.25 \mu m$  et  $2.5 \mu m$ , l'énergie émise dans cette bande (contenant les zones UV, Visible et IR) représente 95 % environ du total. Mais en traversant l'atmosphère l'énergie radiative solaire est atténuée par absorption et diffusion, et l'énergie enregistrée au niveau de la mer est de l'ordre de  $1000 w /m^2$ . [10]

Ce chiffre variera ensuite en fonction de l'angle d'incidence sur le récepteur, de l'intensité et de la durée d'ensoleillement.

## Chapitre 2 physiques des cellules photovoltaïques

Le rayonnement solaire est ainsi composé de deux types de rayonnement: le rayonnement solaire direct défini comme étant le rayonnement provenant du seul disque solaire, Il est donc nul lorsque le soleil est occulté par les nuages. Et le rayonnement solaire diffus correspondant au rayonnement dispersé dans l'atmosphère par la brume, le ciel lui-même, et les nuages.

Le rayonnement solaire diffus n'est donc nul que la nuit. Le rayonnement solaire global est alors la somme des deux types de rayonnements direct et diffus et dont l'intensité est variable d'un endroit à un autre et d'une heure à l'autre.

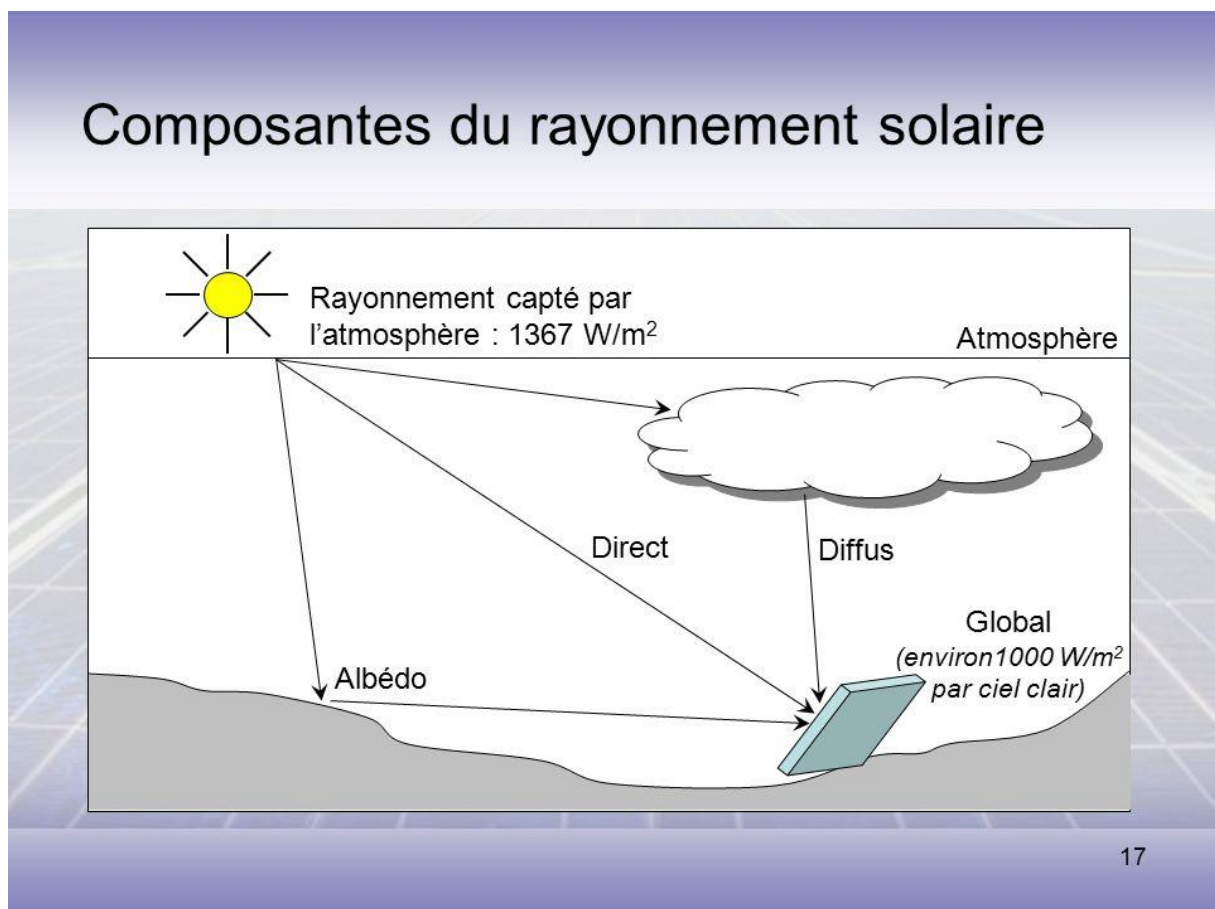


Figure (1.3) : Composantes du rayonnement solaire. [11]

# Chapitre 2 physiques des cellules photovoltaïques

---

Le trajet parcouru par le rayonnement solaire au cours d'une même journée est à son maximum aux premières heures de la matinée et en fin d'après midi. Par contre, il est à son minimum lorsque le soleil est au zénith. Pour cette même raison, l'intensité du rayonnement est variable au cours des saisons et avec la latitude. Ainsi, le rayonnement solaire global reçu au cours d'une journée peut varier de  $0.5 \text{ kWh/m}^2$  pour une journée d'hiver ensoleillée dans les régions nordique a plus de  $6 \text{ kWh/ m}^2$  pour une journée ensoleillée dans les régions tropicales.

Evidemment, par temps couvert le rayonnement solaire au sol peut tomber pratiquement à zéro. En revanche, pour une journée ensoleillée et un ciel parfaitement dégagé, le rayonnement solaire diffus tombant au sol peut atteindre 15 à 20 % du rayonnement global, mais avec un ciel couvert, le rayonnement parvenant au sol est en totalité un rayonnement diffus.

## 1.5 Masse d'air

On appelle « masse d'air », AM, ou *Air Mass* en anglais, la masse d'atmosphère traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol (par ciel clair), par rapport à une traversée verticale au niveau de la mer.

Le rayonnement qui atteint le niveau de la mer à midi dans un ciel clair est de  $1000 \text{ W/m}^2$  et est décrit en tant que rayonnement de la masse d'air "1" (ou AM1).

Lorsque le soleil se déplace plus bas dans le ciel, la lumière traverse une plus grande épaisseur d'air, perdant plus d'énergie.

## Chapitre 2 physiques des cellules photovoltaïques

---

Puisque le soleil n'est au zénith que durant peu de temps, la masse d'air est donc plus grande en permanence et l'énergie disponible est donc inférieure à 1000 W/m<sup>2</sup>.

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

Le nombre "1.5" indique que le parcours de la lumière dans l'atmosphère est 1.5 fois supérieur au parcours le plus court du soleil, c'est-à-dire lorsqu'il est au zénith (correspondant à une inclinaison du soleil de 48,2° par rapport au zénith).

Le « G » représente le rayonnement "global" incluant rayonnement direct et rayonnement diffus et la lettre « D » tient compte seulement du rayonnement direct.

Soleil au zénith (au niveau de la mer) : AM 1

Soleil à 48,2° : AM 1.5.

Rayonnement solaire hors atmosphère : AM 0

Le Soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueurs d'onde variant de **0.22** à **10 microns**. L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi :

– 9% dans la bande des ultraviolets <0.4  $\mu m$

– 47% dans la bande visible **0.4** à **0.8  $\mu m$**

– 44% dans la bande des infrarouges > 0.8 $\mu m$

L'atmosphère terrestre reçoit ce rayonnement à une puissance moyenne de **1.37kWm<sup>2</sup>** avec un spectre centré au voisinage de  **$\lambda=0.48 \mu m$** .

# Chapitre 2 physiques des cellules photovoltaïques

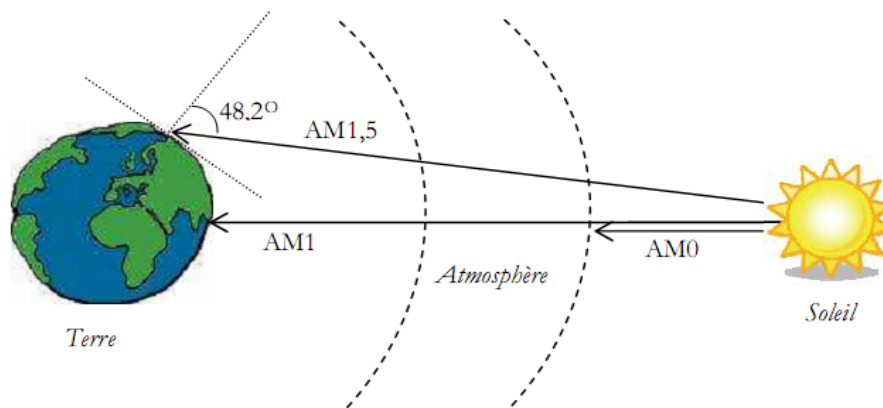


Figure (1.4) Différentes constantes d'illumination. [12]

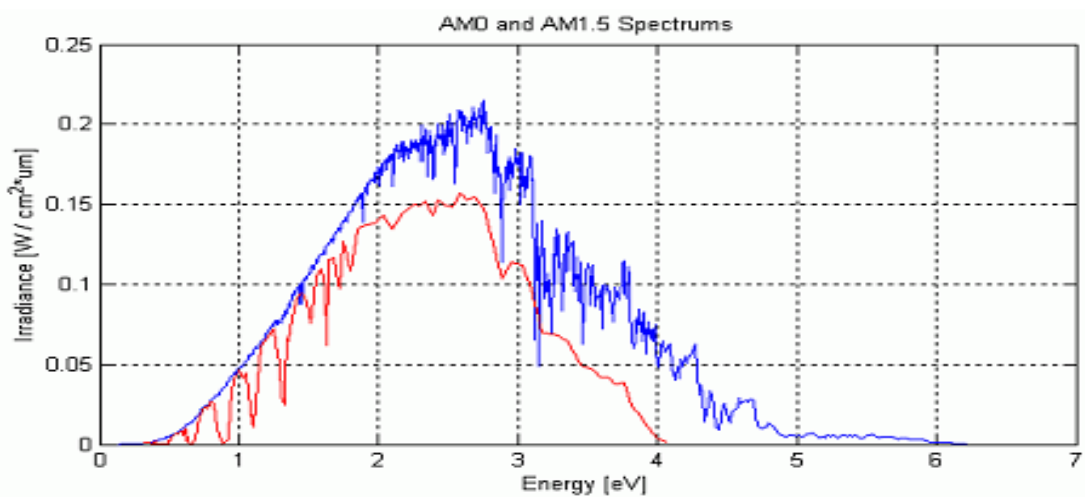
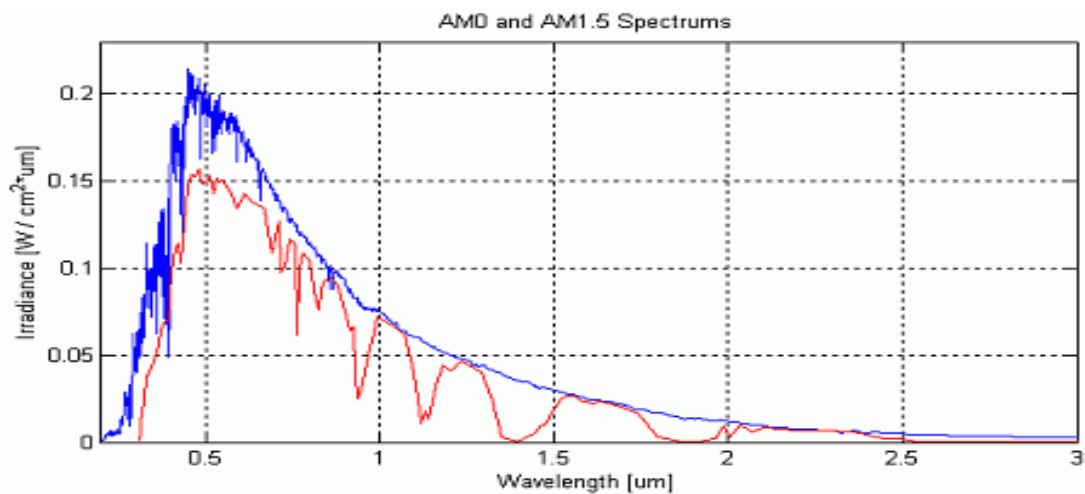


Figure (1.5) : Distribution spectrale de l'énergie solaire AM0 (bleu) et AM1.5 (rouge). [13]

# Chapitre 2 physiques des cellules photovoltaïques

---

Hauteur Surface	Position du soleil	Irradiance (intensité, puissance) $W/m^2$	Distribution spectrale
En dehors de l'atmosphère	–	1367	AM0
Surface	$\alpha=90^\circ$	925	AM1
Surface	$\alpha=48^\circ$	963	AM1.5
Surface	$\alpha=60^\circ$	691	AM2

**Tableau (1.1) :** Résumé des différentes distributions spectrales. [13]

## 1.6 Radiation d'un corps noir

Un corps noir absorbe toutes les radiations incidentes sur sa surface, et émet un rayonnement en fonction de sa température. Les sources corps noirs qui sont d'intérêt pour le photovoltaïque, émettent de la lumière dans le domaine visible. L'irradiation spectrale d'un corps noir est donnée par la loi de Planck, donnée par l'équation suivante:

$$F(\lambda) = 2\pi A \frac{c}{\lambda^4 \left( \exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1 \right)} \quad (1.2)$$

Avec :

$\nu$  : La fréquence de la lumière.

K : La constante de Boltzmann.

# Chapitre 2 physiques des cellules photovoltaïques

T : La température.

c: vitesse de la lumière dans le vide.

Rs : rayon du soleil ( $R_s=6,96 \cdot 10^5$  km)

d : distance soleil-terre ( $d=1,5 \cdot 10^9$  km)

$\lambda$  : longueur d'onde de la lumière

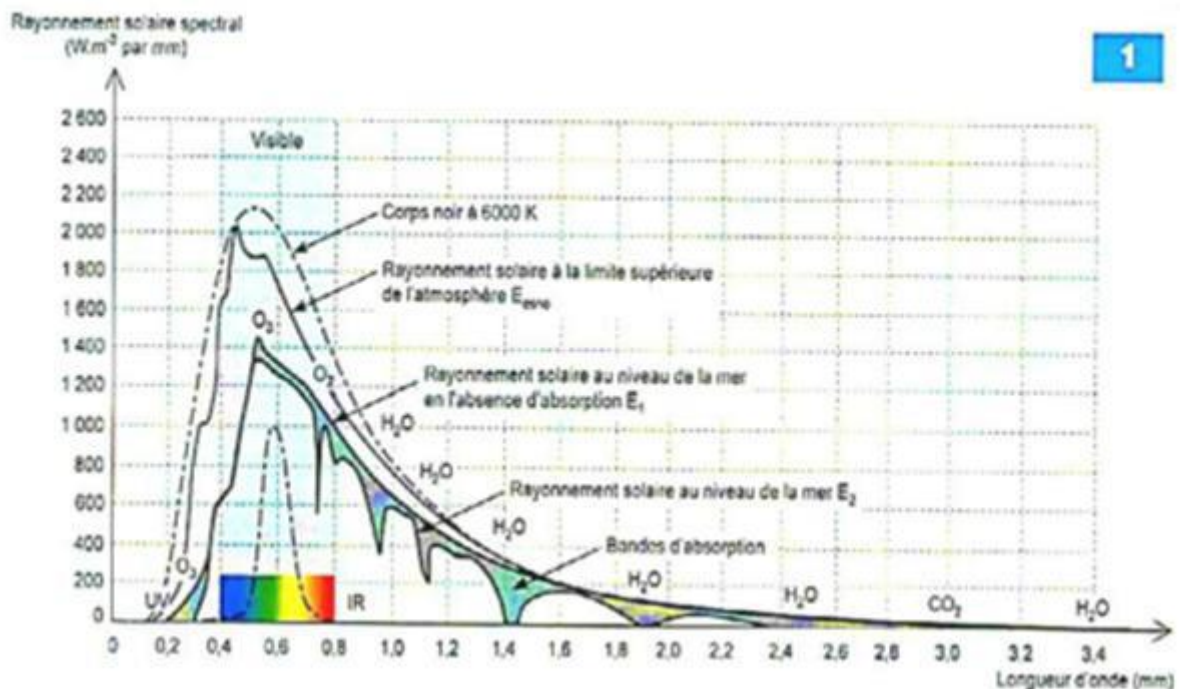


Figure (1.6) : L'irradiation spectrale (AM0, AM1.5G, corps noir) en fonction de la longueur d'onde. [14]

# Chapitre 2 physiques des cellules photovoltaïques

---

Signalons que, *outre l'incidence de l'atmosphère*, l'irradiation solaire dépend :

- de l'orientation et l'inclinaison de la surface.
- de la latitude du lieu et son degré de pollution.
- de la période de l'année.
- de l'instant considéré dans la journée.
- de la nature des couches nuageuses.

La combinaison de tous ces paramètres produit la variabilité dans l'espace et le temps de l'irradiation journalière.

Des cartes météorologiques sont établies et nous renseignent sur l'irradiation moyenne par jour ou bien sur une année.

## 1.7 Les Matériaux III-V (InGaN)

Dans l'ensemble des matériaux, les semi-conducteurs constituent une classe bien définie, avec des propriétés physiques particulières qui sont sources d'intérêt au plan de la connaissance fondamentale et à celui des applications. Ces deux facteurs indissociables font l'importance de ces matériaux, malgré le nombre limité d'élément et de composés semi-conducteurs.

## Chapitre 2 physiques des cellules photovoltaïques

---

Principalement remarquables par leurs propriétés électroniques, les semi-conducteurs interviennent dans presque tous les équipements électroniques et optiques. La plus grande partie des composants (transistors, diodes, et ce qu'on appelle puce en général) sont réalisés en silicium qui joue un rôle prépondérant, sa technologie et sa connaissance théorique ont atteint des niveaux inégalés.

En électronique rapide et en optoélectronique, les propriétés du silicium sont insuffisantes (mobilités des porteurs relativement petites et transitions électroniques indirectes au seuil d'absorption optique). Dans de telles applications, les composés semi-conducteurs III-V sont préférables. Les propriétés de ces matériaux sont très intéressantes pour les performances de ces dispositifs.

Parmi ces semi-conducteurs, on trouve principalement le nitrure de gallium-indium (InGaN) qui est au centre de ce travail. Ce matériau est un semi-conducteur faisant partie de la catégorie des nitrures-III, c'est-à-dire, composé d'azote et d'éléments de la colonne III du tableau de Mendeleïev, à savoir le bore, l'aluminium, le gallium, l'indium et le thallium, voir figure(1.8).

Le nitrure de gallium-indium est un alliage entre le nitrure de gallium (GaN) et le nitrure d'indium (InN). C'est pourquoi, nous allons principalement définir les semi-conducteurs III-V puis décrire les propriétés de ces deux alliages binaires (GaN) et (InN), pour ensuite décrire les propriétés de l'InGaN qui en découlent.

# Chapitre 2 physiques des cellules photovoltaïques

Group → 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18

↓ Period

1	1 H																2 He	
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba		72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra		104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Fl	115 Uup	116 Lv	117 Uus	118 Uuo

Lanthanides	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
Actinides	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

**Figure (1.7) :** Tableau de Mendeleïev ou tableau périodique des éléments. L'InGaN est composé des éléments de la colonne IIIA et de l'azote N. [15]

Ces matériaux nitrures-III sont activement étudiés parce qu'ils représentent une nouvelle catégorie de matériaux possédant des propriétés uniques : un large gap d'énergie interdite, de fortes liaisons interatomiques ou encore une forte conductivité thermique qui les rendent très intéressants pour l'optoélectronique à haute température et grande puissance.

# Chapitre 2 physiques des cellules photovoltaïques

Dans les sections suivantes, nous présentons la structure cristalline du GaN, de l'InN et de l'InGaN, ainsi que leurs caractéristiques électriques et optiques.

## 1.7.1 L'intérêt des nitrures d'éléments III en optoélectronique

Les nitrures d'éléments III (GaN, AlN, InN et leurs alliages) sont des semi-conducteurs aux propriétés remarquables. La plus importante est sans conteste le faible gap d'énergie interdite de l'InN **0.7 eV** [16]. Ce dernier étend la couverture spectrale des nitrures qui couvrent maintenant de l'ultraviolet lointain avec l'AlN (**6.2 eV, soit 2000 nm**) [17], à l'infrarouge moyen avec l'InN (**0.7 eV, soit 1770 nm**), en passant par l'ultraviolet proche avec le GaN (**3.39 eV, soit 365 nm**) [18] et le visible avec les alliages InGaN ou AlInN.

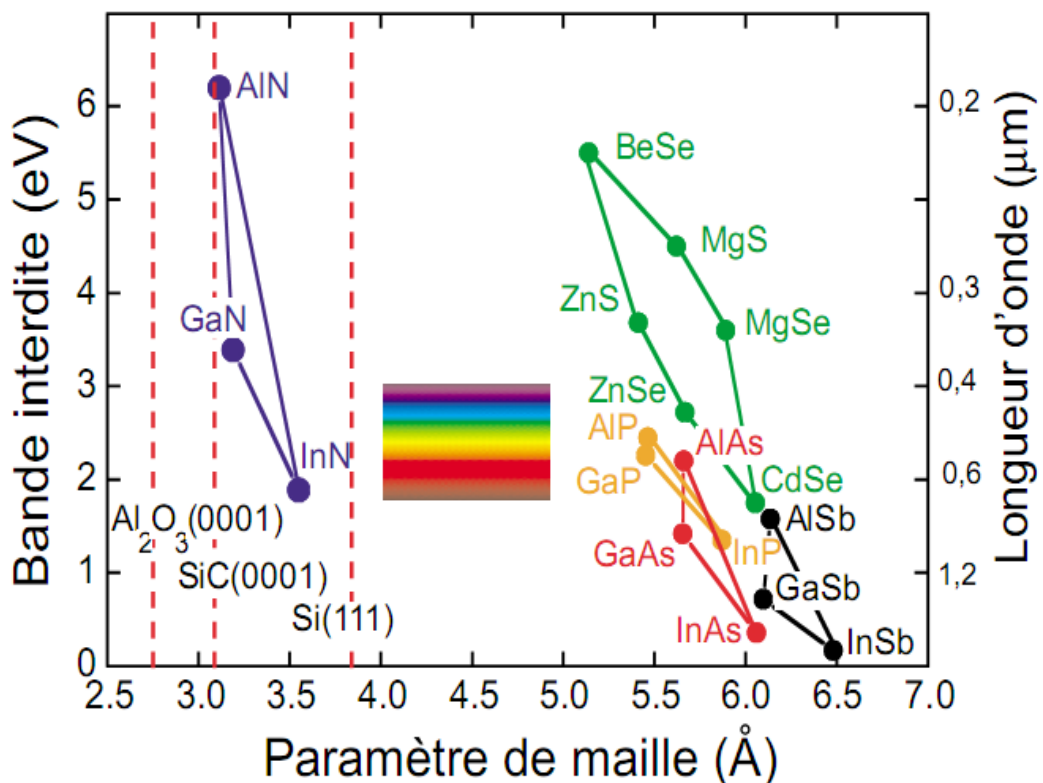


Figure (1.8) : Bande interdite de divers composés semi-conducteurs en fonction de leur paramètre de maille. [19]

# Chapitre 2 physiques des cellules photovoltaïques

---

## 1.7.2 Caractéristiques structurelles

Dans les conditions ambiantes, la structure des nitrures-III est la wurtzite, une structure hexagonale. Cette structure est définie par trois paramètres, la largeur d'un côté hexagonale  $a$ , la hauteur de la maille élémentaire  $c$ , et le paramètre interne  $u$  décrivant la séparation des sous-réseaux des anions ( $N^{-3}$ ) et des cations ( $Ga^{+3}$ ) selon l'axe  $c$  [20]. Ce dernier est défini comme étant la longueur de la liaison cation-anion divisée par  $c$ . Il est égal à 0,375 pour un cristal wurtzite idéal. Le tableau présente ces paramètres pour le GaN et l'InN.

	$a$ (Å)	$c$ (Å)	$u$
GaN	3,189	5,185	0,377
InN	3,54	5,70	0,378

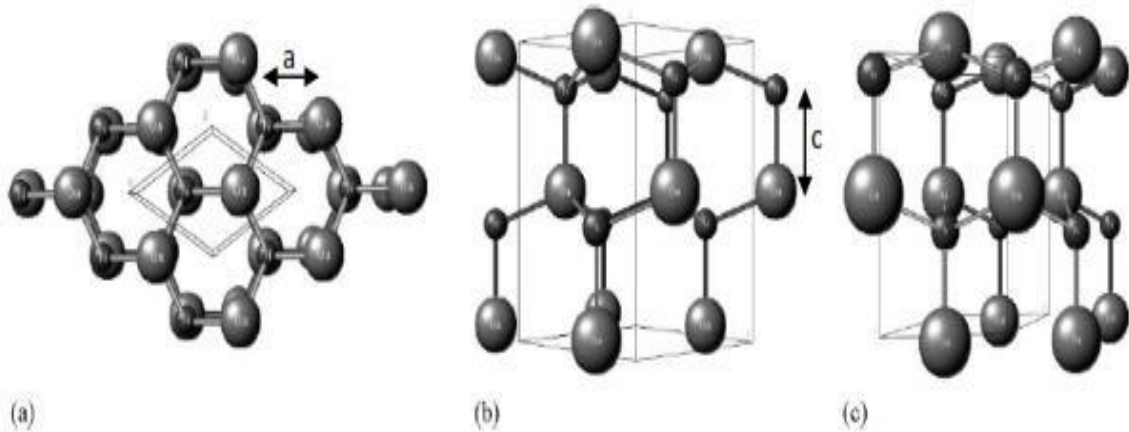
**Tableau (1.2)** : Paramètres structuraux  $a$ ,  $c$  et  $u$  pour le GaN et l'InN . [21,22]

A noter que ces valeurs sont celles des matériaux massifs et qu'elles peuvent différer pour des couches épitaxiées à cause notamment de contraintes de défauts et d'impuretés.

La figure (1.9) illustre la structure wurtzite en prenant l'exemple du GaN selon les directions [0001], [1120], [1010], où les grosses sphères représentent les atomes de gallium et les plus petites les atomes d'azote.

## Chapitre 2 physiques des cellules photovoltaïques

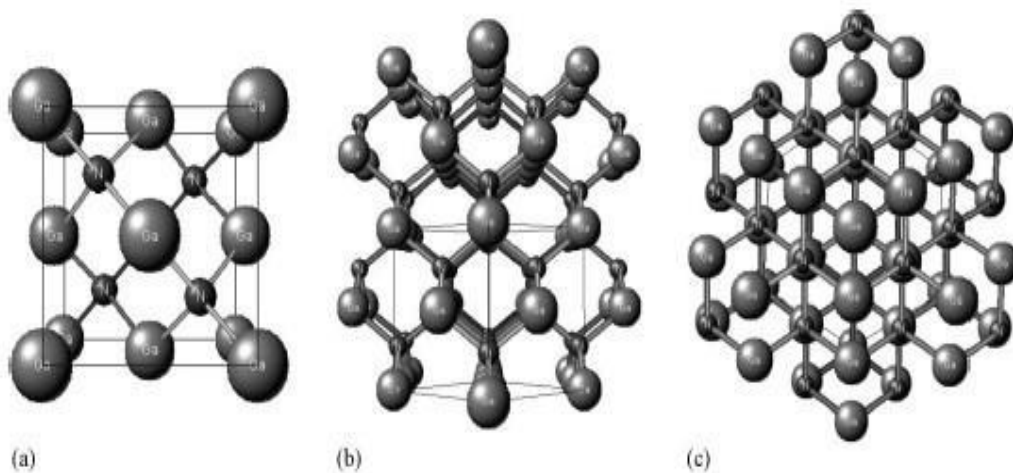
---



**Figure (1.9) :** Structure wurtzite selon plusieurs directions, exemple du GaN : (a) [0001], (b) [1120], (c) [1010]. [23]

Sous certaines conditions de pression et de température et sur un substrat cubique, il est possible de faire croître les nitrures-III en structure cubique, sous forme de zinc-blende.

La structure zinc-blende, en prenant l'exemple du GaN, est présentée dans la figure(1.10) selon différentes directions.



**Figure (1.10):** Structure cubique zinc-blende selon différentes directions, exemple du GaN:(a) [100], (b) [110], (c) [111]. [23]

# Chapitre 2 physiques des cellules photovoltaïques

---

Il existe théoriquement une troisième structure cristalline pour les nitrures-III, la structure cubique à face centrée (CFC) ou NaCl. Comme son nom l'indique, c'est une structure cubique, avec un atome à chaque sommet du cube, plus un atome au centre de chacune des 6 faces.

Pour résumer, les nitrures-III peuvent se présenter sous trois formes cristallines (wurtzite, zinc blende et NaCl), mais la plus stable est la wurtzite.

## 1.7.3 Propriétés électriques

Les propriétés électriques d'un matériau proviennent de son gap d'énergie interdite ( $E_g$ ), et de sa densité de porteurs. Avant de détailler ces valeurs pour l'InGaN, nous allons rappeler rapidement quelques notions essentielles de physique. Le gap d'énergie interdite est défini comme étant la différence d'énergie entre le haut de la bande de valence et le bas de la bande de conduction. Le diagramme d'énergie d'un matériau est présenté dans la figure(1.11).

- **Diagramme d'énergie**

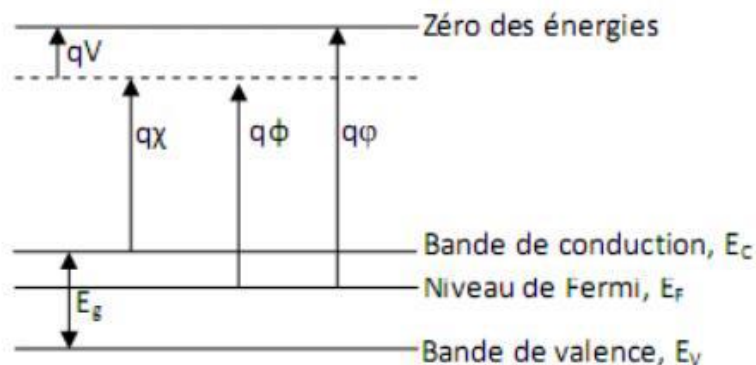


Figure (1.11) : Diagramme des énergies pour un matériau. [24]

# Chapitre 2 physiques des cellules photovoltaïques

---

Avec :

$q$  : la charge élémentaire.

$V$  : le potentiel électrostatique pouvant régner dans les matériaux.

$\chi$  : l'affinité électronique.

$\phi$  : le travail de sortie.

$\varphi$  : le potentiel d'ionisation.

Le bas de la bande de conduction varie spatialement avec le potentiel électrostatique macroscopique  $V$  régnant à l'intérieur du matériau. L'affinité électronique  $\chi$  peut être définie comme la quantité d'énergie dégagée suite à la capture d'un électron par un atome en phase gazeuse [25]. Plus l'affinité électronique est grande plus la capture d'un électron par l'atome dégage de l'énergie et plus cette capture est stable. Le travail de sortie,  $\phi$  correspond au travail à fournir pour extraire une particule du système sans l'emmener à l'infini, mais en la laissant à proximité immédiate du système où elle reste soumise au même potentiel électrostatique  $V$ . Enfin, le potentiel d'ionisation  $\varphi$  est l'énergie nécessaire pour extraire une particule du système et la mettre à l'infini.

- **Niveau de Fermi**

Le niveau de Fermi  $E_f$  correspond au plus haut niveau énergétique occupé par un électron à 0K. La probabilité d'occupation d'un niveau énergétique par un électron obéit à la

## Chapitre 2 physiques des cellules photovoltaïques

---

statique de Fermi-Dirac, définie par l'équation ci-dessous. La probabilité d'occupation de l'énergie E par un trou est 1-F(E).

$$F(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_f}{KT}\right)} \quad (1.3)$$

Avec :

$E_f$  : le niveau de Fermi.

K : la constante de Boltzmann.

T : la température.

- **Densité d'états**

Les bandes de valence et de conduction sont composées de niveaux énergétiques continus, on parle aussi d'états. Le nombre de ces niveaux n'est cependant pas constant à cause des différents niveaux électroniques des atomes. On parle alors de densité d'états. Ces dernières dépendent des caractéristiques du matériau et de la température.

La densité d'états des bandes de conduction et de valence pour  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ , respectivement, est donnée par :

$$N_c = [0,9x + (1-x) \cdot 2,3] \cdot 10^{18} \text{ [cm}^{-3} \text{]} \quad (1.4)$$

$$N_v = [3,5x + (1-x) \cdot 2,8] \cdot 10^{19} \text{ [cm}^{-3} \text{]} \quad (1.5)$$

Avec :

**x** : concentration d'indium

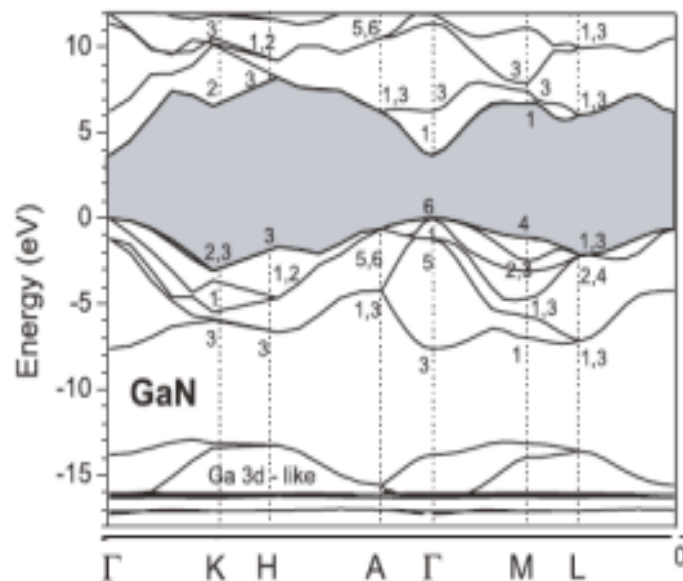
# Chapitre 2 physiques des cellules photovoltaïques

---

## - Gap d'énergie interdite dans les nitrures

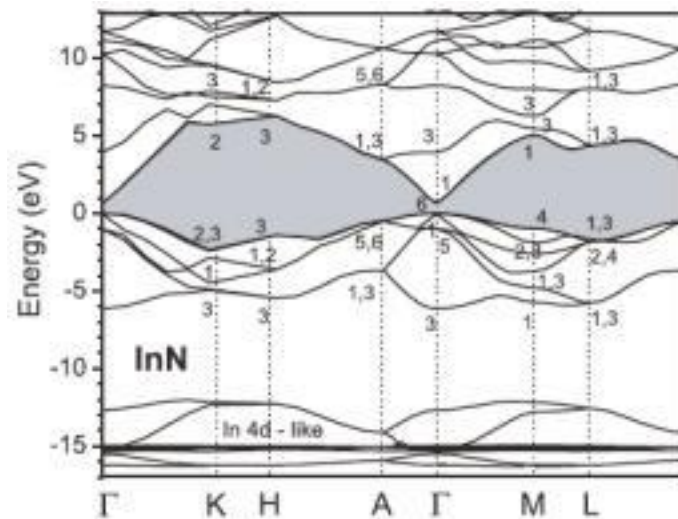
La caractéristique principale pour laquelle les nitrures sont tant étudiés est leur gap d'énergie interdite direct, y compris à travers leurs alliages. Ceci permet d'avoir de meilleurs rendements de conversion ou d'émission de lumière, pour le photovoltaïque ou pour les LEDs, par exemple. De plus, leurs alliages permettent de couvrir quasiment tout le spectre solaire, de l'infrarouge (IR) à l'ultraviolet (UV).

Le gap d'énergie interdite est de **3.39 eV 366 nm** pour le GaN et de **0.7 eV 1771 nm** [26] pour l'InN à température ambiante **300 K**. Le diagramme de bande du GaN est montré dans la figure (1.12) et celui de l'InN est représenté dans la figure (1.13). Le GaN et l'InN sont des matériaux à gap direct, le minimum de leur bande de conduction est donc aligné au maximum de leur bande de valence dans l'espace des vecteurs d'onde.



## Chapitre 2 physiques des cellules photovoltaïques

**Figure (1.12) :** Diagramme de la bande du GaN. Le maximum de la bande de valence est pris comme le 0 des énergies. Le gap d'énergie interdite correspond à la partie grisée. [27]



**Figure (1.13) :** Diagramme de bande de l'InN. Le maximum de la bande de valence est pris comme le zéro des énergies. Le gap d'énergie interdite correspond à la partie grisée. [27]

### - Evolution du gap d'énergie dans l' $In_xGa_{1-x}N$

A partir des gaps d'énergie interdite des composés binaires GaN et InN, il est possible de déterminer le gap d'énergie de l' $InGaN$  en utilisant la loi de Vegard avec un paramètre de courbure. La loi de Vegard est une loi empirique indiquant que les valeurs des propriétés d'un alliage (gap d'énergie, paramètre de maille, constantes élastiques, etc.) peuvent être déterminées par une interpolation linéaire des valeurs des propriétés de ses composants [28,29]. Cependant, les valeurs mesurées peuvent dévier de l'interpolation linéaire à cause de la taille relative des constituants, du volume relatif par électron de valence, les effets de la zone de Brillouin, et des différences électrochimiques entre les éléments [30,31]. On doit

# Chapitre 2 physiques des cellules photovoltaïques

---

alors introduire un paramètre de courbure dans l'expression afin de suivre les données expérimentales.

La loi de Vegard avec paramètre de courbure est définie par :

$$E_g(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}) = (1 - X) E_g(\text{GaN}) + x E_g(\text{InN}) - bx(1 - x) \quad (1.6)$$

Avec :

$x$  : la concentration d'indium dans  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$

$b$  : le paramètre de courbure ( $b=1.42$ )

$E_g(\text{InGaN})$  : le gap d'énergie de l'InGaN

$E_g(\text{GaN})$  : le gap d'énergie du GaN

$E_g(\text{InN})$  : le gap d'énergie de l'InN

## 1.7.4 Longueur de diffusion

La longueur de diffusion ( $L$ ) est la distance moyenne sur laquelle les porteurs peuvent se déplacer par diffusion. Elle est définie par :

$$L = \sqrt{D \times \tau} \quad (1.7)$$

# Chapitre 2 physiques des cellules photovoltaïques

---

Avec :

$\tau$  : La durée de vie des porteurs

D : le coefficient de diffusion des porteurs, défini par :

$$D = \frac{kT}{q} \mu \quad (1.8)$$

Avec :

$\mu$  : la mobilité des porteurs

La longueur de diffusion est un paramètre à connaître lors de la conception d'un composant électronique, comme une cellule solaire. En effet, si les électrodes collectant le courant produit par la cellule sont éloignées d'une distance supérieure à la longueur de diffusion, alors les charges se recombineront avant d'être collectées.

## 1.7.5 Propriétés optiques

Les propriétés optiques d'un matériau recouvrent principalement son indice de réfraction et son coefficient d'absorption. Ces propriétés sont primordiales pour les composants optoélectroniques puisqu'elles régissent le déplacement de la lumière dans le composant. Par exemple, dans un composant composé de différents matériaux, la lumière a tendance à se propager dans les matériaux ayant le plus fort indice de réfraction. On peut alors confiner la lumière dans une couche particulière, comme dans les lasers. Cette propriété est aussi très intéressante pour les applications de cellules solaires afin d'augmenter les efficacités d'absorption de la lumière.

# Chapitre 2 physiques des cellules photovoltaïques

---

## A - Indice de réfraction

L'indice de réfraction d'un matériau est défini par le rapport de la vitesse de la lumière dans le vide ( $c$ ) sur la vitesse de la lumière dans le matériau ( $v$ ) par :

$$n = \frac{c}{v} \quad (1.9)$$

La vitesse de la lumière dans un matériau n'est pas constante, elle change avec la longueur d'onde. L'indice de réfraction dans le cas du GaN est égal à environ 2,3. Pour l'InN, il vaut environ 2,9 dans l'infrarouge. [32]

L'indice de réfraction intervient également dans la détermination des coefficients de réflexion et de transmission à travers la relation de Snell-Descartes :

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (1.10)$$

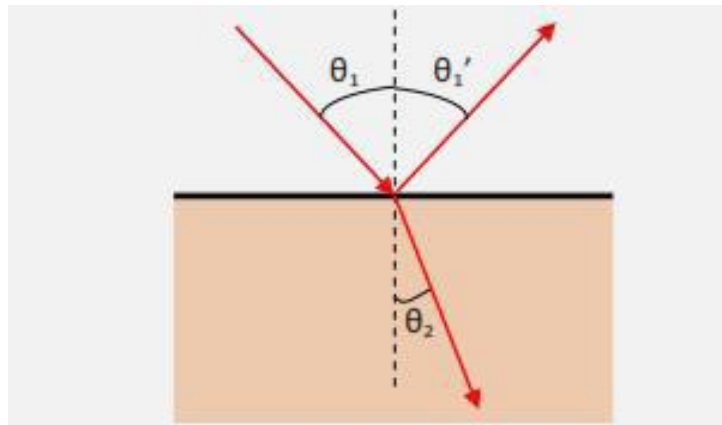
Avec :

$n_1$  Et  $n_2$  : les indices de réfractons de deux milieux

$\theta_1$  Et  $\theta_2$  : les angles des rayons lumineux par rapport à la normale (Figure 1.15)

## Chapitre 2 physiques des cellules photovoltaïques

---



**Figure (1.14):** Schéma des chemins optiques au niveau d'un dioptré plan.

Le rayon incident arrive sur le dioptré avec un angle  $\theta_1$  par rapport à la normale. Une partie du rayon est réfléchiée avec le même angle, appelé  $\theta_1'$ , l'autre partie du rayon est transmise avec un angle  $\theta_2$  par rapport à la normale. Dans cet exemple, on a pris  $n_1 < n_2$ , donc  $\theta_1 > \theta_2$ .

Le coefficient de réflexion (R) est défini comme le rapport de l'intensité réfléchiée (Ir) sur l'intensité incidente (Ii) :

$$R = \frac{I_r}{I_i} \quad (1.11)$$

On a alors :

$$R = \left( \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (1.12)$$

# Chapitre 2 physiques des cellules photovoltaïques

---

Avec :

$n_1$  : Indice de réfraction de l'air ( $n_1 = 1$ )

$n_2$  : Indice de réfraction du matériau  $In_x Ga_{1-x} N$

La loi de l'indice de réfraction du matériau  $In_x Ga_{1-x} N$  est donnée par :

$$n_2 (In_x Ga_{1-x} N) = x n (InN) + (1-x) n (GaN) - b x (1-x) \quad (1.13)$$

## B - Absorption

Seule la lumière absorbée est restituée sous forme d'énergie électrique. Le matériau photovoltaïque utilise différemment toutes les longueurs d'ondes du spectre solaire : il se caractérise par sa réponse spectrale, c'est-à-dire l'efficacité avec laquelle il transforme l'énergie d'un rayonnement d'une longueur d'onde en énergie électrique. Cette efficacité dépend essentiellement des caractéristiques du matériau.

- **Etudes du coefficient d'absorption**

Le coefficient d'absorption ( $\alpha$ ), est une propriété qui définit la quantité de lumière absorbée par un matériau.

Les électrons dans la bande de valence d'un semi-conducteur peuvent absorber des photons dont l'énergie est plus grande que l'énergie de bande interdite ( $E_g$ ), puis passer à la

# Chapitre 2 physiques des cellules photovoltaïques

---

bande de conduction. Le coefficient d'absorption  $\alpha(E)$ , pour une énergie  $E$  supérieure à l'énergie de la bande interdite est donnée par :

$$\alpha = \left[ 2,2 \times 10^5 \sqrt{\left(\frac{1,24}{\lambda(\mu m)}\right) - Eg(ev)} \right] [cm^{-1}] \quad (1.14)$$

## 1.8 Silicium (Si)

Actuellement les technologies du photovoltaïque utilisent encore le silicium comme matériau semi-conducteur de base. Le silicium étant un matériau semi-conducteur de largeur de bande interdite moyenne s'adapte bien aux contraintes imposées par les applications à des températures normales, soit de 0 à 100°C. A de plus hautes températures, la performance des technologies sur le silicium se dégrade progressivement.

Le silicium fut découvert en 1824 par J.J. Berzelius à Stockholm, en Suède. C'est, après le carbone, l'élément le plus abondant de la terre.

On le trouve généralement sous forme de silicate dans de nombreuses roches, argiles et terres. Le silicium est obtenu en réduisant la silice (le sable,  $SiO_2$ ) par le carbone. Une fusion en zone subséquente donne un élément plus pur pour des applications nécessitant un silicium de haute pureté (par exemple les semi-conducteurs). [33]

Le silicium possède 4 électrons sur sa couche périphérique car il appartient à la 4ème colonne de la classification périodique des éléments. Il est possible de le produire avec un haut degré de pureté (moins de 1 atome étranger pour  $10^{11}$  atomes de semi-conducteur): on parle alors de S.C. intrinsèque. [34]

# Chapitre 2 physiques des cellules photovoltaïques

---

Le silicium est le matériau de base de 90% de l'industrie micro-électronique [35]. En effet, il est possible de réaliser des plaques de Silicium monocristallin de très grande pureté et à faible coût.

## 1.8.1 Propriétés physiques du silicium

### ✓ Hauteur de la bande interdite

La taille  $E_g$  de la bande interdite donne des caractéristiques électriques importantes à chaque semi-conducteur (Tableau 1.3).

L'expression donnée par :

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{aT^2}{(T+b)} \quad (1.15)$$

Semi- conducteur	$E_g(0)$ (eV)	a (eV/K)	b (K)
Si	1.170	$4.73 \cdot 10^{-4}$	636

**Tableau (1.3)** : Paramètres de la variation de la bande interdite en fonction de la température. [36]

## Chapitre 2 physiques des cellules photovoltaïques

---

Le tableau 1.4 regroupe les propriétés électriques du Silicium

Propriétés à 300°K		Si
Largeur de bande interdite $E_g$ (ev)		1,12
Concentration d'atomes (/cm <sup>3</sup> )		$5 \cdot 10^{22}$
Concentration intrinsèque (/cm <sup>3</sup> )		$1,45 \cdot 10^{10}$
Mobilités (cm <sup>2</sup> /V.s)	$\mu_n$	1350
	$\mu_p$	480
Constantes diélectriques relatives $\epsilon_r$		11,7
Champ de claquage V/m		$-30 \cdot 10^6$

**Tableau (1.4) :** Propriétés électriques du silicium (Si). [37]

✓ **Coefficient d'absorption :**

Le coefficient d'absorption du Silicium est donné par l'expression suivante:

$$\alpha(\mu\text{m}^{-1}) = -0.425(E - E_g)^3 + 0.757(E - E_g)^2 - 0.022(E - E_g) + 10^{-4} (1.1 \text{ eV} < E < 1.5 \text{ eV})$$

$$= 0.0287 \exp[2.72(E - E_g)] (E > 1.5 \text{ eV})$$

## Chapitre 2 physiques des cellules photovoltaïques

---

Le tableau 1.5 regroupe les propriétés physiques du Silicium.

Propriétés	Silicium
Structure	Diamant
Densité (g /cm <sup>3</sup> )	2,328
Constante diélectrique	11,9
N <sub>c</sub> (cm <sup>-3</sup> )	2,8.10 <sup>19</sup>
N <sub>v</sub> (cm <sup>-3</sup> )	1,04.10 <sup>19</sup>
Energie de Gap à 300°K (eV)	1,12
Affinité d'électron,	4,05
Concentration intrinsèque des porteurs (cm <sup>-3</sup> )	1,45.10 <sup>10</sup>
Duré de vie minoritaire (s)	2,5.10 <sup>-3</sup>
Mobilité des électrons (cm <sup>2</sup> .V <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> )	1500
Mobilité des trous (cm <sup>2</sup> .V <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> )	450
Indice de réfraction	3,44

**Tableau (1.5) :** Propriétés physiques du Si. [38]

# Chapitre 2 physiques des cellules photovoltaïques

---

## 1.9 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté des notions importantes sur le gisement solaire. Ensuite, nous avons abordé les phénomènes physiques liés au soleil, tels que le spectre du soleil, le corps noir et l'irradiation spectrale.

Puis nous avons étudié les caractéristiques structurelles, les propriétés électriques et optiques du matériau InGaN et du silicium (Si).

Ces connaissances sont indispensables pour la détermination des caractéristiques des cellules solaires.

# Chapitre 2 physiques des cellules photovoltaïques

---

## 2.1 Introduction

Les principaux matériaux présentant l'effet photovoltaïque sont les Semi-conducteurs. Ces matériaux ont la caractéristique d'être de mauvais conducteurs et de mauvais isolants, Ils peuvent être caractérisés par leur gap d'énergie interdite ( $E_g$ ) c'est-à-dire l'énergie à partir de laquelle ils deviennent absorbants et produisent de l'électricité quand ils sont éclairés par une lumière.

Si un photon arrive sur un semi-conducteur avec une énergie inférieure à son gap d'énergie, il ne sera pas absorbé. Le matériau sera transparent à cette longueur d'onde.

Si l'énergie du photon incident est supérieure au gap d'énergie, le photon sera absorbé et son énergie servira en partie à briser une liaison de valence pour créer une paire électron trou. L'énergie excédentaire sera transformée en chaleur et transmise au réseau (phonons).

# Chapitre 2 physiques des cellules photovoltaïques

---

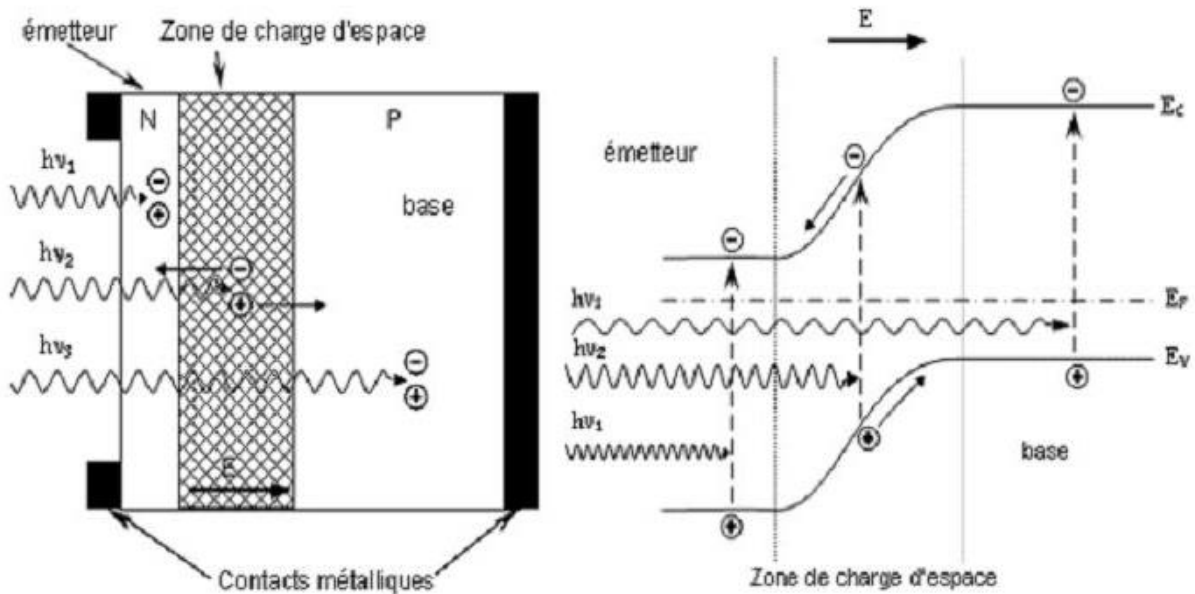
## 2.2 Principe de fonctionnement d'une cellule solaire

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur des charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type  $N$  et dopée de type  $P$ . Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau  $N$  diffusent dans le matériau  $P$ . La zone initialement dopée  $N$  devient chargée positivement, et la zone initialement dopée  $P$  devient chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone  $N$  et les trous vers la zone  $P$ . Une jonction  $PN$  est donc formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones  $N$  et  $P$ , une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite cèdent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi une paire électron-trou. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone  $N$  rejoignent les trous de la zone  $P$  via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel et un courant électrique circule.

Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire est illustré sur la figure (2.1)[39]. Les photons incidents créent des porteurs dans les régions  $N$ ,  $P$  et la zone de charge d'espace.

Le comportement de ces porteurs libres diffère suivant le lieu de leur création. Dans les zones électriquement neutres  $P$  et  $N$ , les photos porteurs minoritaires diffusent.

## Chapitre 2 physiques des cellules photovoltaïques



**Figure (2.1)** : Structure et diagramme de bande d'une cellule photovoltaïque. [39]

Ceux qui atteignent la région de charge d'espace sont propulsés par le champ électrique vers la région où ils deviennent majoritaires. Ces photo-porteurs contribuent donc au courant par leur diffusion, ils créent un photo-courant de diffusion. Dans la zone de charge d'espace, les paires électrons trous créés par les photons sont dissociées par le champ électrique, l'électron est propulsé vers la région de type **N** et le trou vers la région de type **P**. Les porteurs donnent naissance à un photo-courant de génération. Ces deux contributions s'ajoutent pour créer un photo-courant résultant  **$I_{ph}$**  qui contribue au courant inverse de la diode.

# Chapitre 2 physiques des cellules photovoltaïques

---

## 2.3 Caractéristiques électriques d'une cellule solaire

### A - l'équilibre thermodynamique

A l'équilibre thermodynamique, l'agitation thermique permet à des électrons de la bande de valence de passer dans la bande de conduction en laissant un trou dans la bande de valence.

Le potentiel de diffusion de la jonction PN, ( $V_0$ ) est défini par :

$$V_0 = V_n - V_p = \left(\frac{KT}{q}\right) \text{Log} \left(\frac{N_a N_d}{n_i^2}\right) \quad (2.1)$$

Avec :

$V_n$  et  $V_p$  : les potentiels dans les matériaux N et P, respectivement

K : la constante de Boltzmann

T : la température

$n_i$  : la concentration intrinsèque des porteurs libres.

$N_d$  : la concentration de dopants donneurs ionisés dans le matériau N

$N_a$  : la concentration de dopants accepteurs ionisés dans le matériau P

# Chapitre 2 physiques des cellules photovoltaïques

---

$q$  : la charge de l'électron.

## B - Hors équilibre thermodynamique

On s'éloigne de l'équilibre thermodynamique lorsque la jonction est éclairée, ou lorsque l'on y applique une polarisation. L'équilibre entre les courants de diffusion et inverse est modifié.

Pour une excitation lumineuse, la tension d'excitation est appelée tension de circuit ouvert  $V_{co}$ .

Dans le cas d'une polarisation directe  $V_d$  aux bornes de la jonction, la barrière de potentiel  $qV_0$  diminue. En conséquence, le courant des porteurs majoritaires augmente et l'intensité du champ électrique interne diminue. On a alors injection de porteurs minoritaires dans les zones neutres, des électrons dans le matériau P et des trous dans le matériau N.

Les densités des porteurs minoritaires aux extrémités de la ZCE peuvent se déduire à partir du potentiel.

$$V_{tot} = V_0 - V = \left(\frac{KT}{q}\right) \log\left(\frac{N_a N_d}{n_{i2}}\right) - V \quad (2.2)$$

La largeur de la zone de charge d'espace sous polarisation (V) s'écrit alors :

# Chapitre 2 physiques des cellules photovoltaïques

---

$$W = \sqrt{\left(\frac{2\varepsilon}{q}\right) \cdot (V_0 - V) \cdot \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d}\right)} \quad (2.3)$$

Avec :

$V_0$  = Le potentiel de diffusion

$V$  = Le potentiel de polarisation imposé aux bornes de la jonction

## 2.4 Architecture d'une cellule photovoltaïque

De chaque côté de la jonction PN, on dépose des électrodes métalliques afin de collecter les charges photo générées. Sur la face avant, celle qui reçoit la lumière, l'électrode a une forme de grille afin d'optimiser la collecte des porteurs tout en laissant passer la lumière. Si la grille est trop espacée, la lumière pourra passer facilement, de nombreuses charges seront créées, néanmoins, une partie des porteurs n'aura pas le temps d'être collectée avant de se recombinaison. A l'opposé, si la grille est trop resserrée, tous les porteurs pourront être collectés, cependant moins de lumière pourra passer et être absorbée par le matériau créant ainsi moins de charges.

Pour certaines technologies, il est possible d'utiliser des électrodes transparentes comme l'ITO (oxyde d'indium-étain) ou le ZnO. Dans ce cas, le problème de la grille ne se pose plus puisque cette couche recouvre toute la cellule.

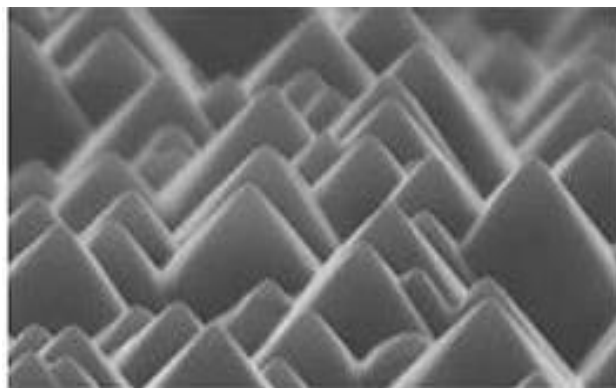
Sur la face arrière, un contact métallique «plein» est déposé. Cette couche sert également de couche réfléchissante pour les photons qui n'ont pas été absorbés à leur premier passage.

## Chapitre 2 physiques des cellules photovoltaïques

---

Pour l'InGaN et le GaN, les contacts sont des alliages de métaux. Pour l'InGaN type N, on utilise généralement l'alliage titane-aluminium-or et pour l'InGaN de type P, l'alliage nickel-or.

Afin de minimiser les pertes liées à la réflexion de rayons lumineux à la surface de la cellule, une couche antireflet est le plus souvent déposée sur la face avant. La technique la plus utilisée est une texturation de la surface en forme de pyramides (Figure 2.2.a) ou de pyramides inversées (Figure 2.2.b). [40]

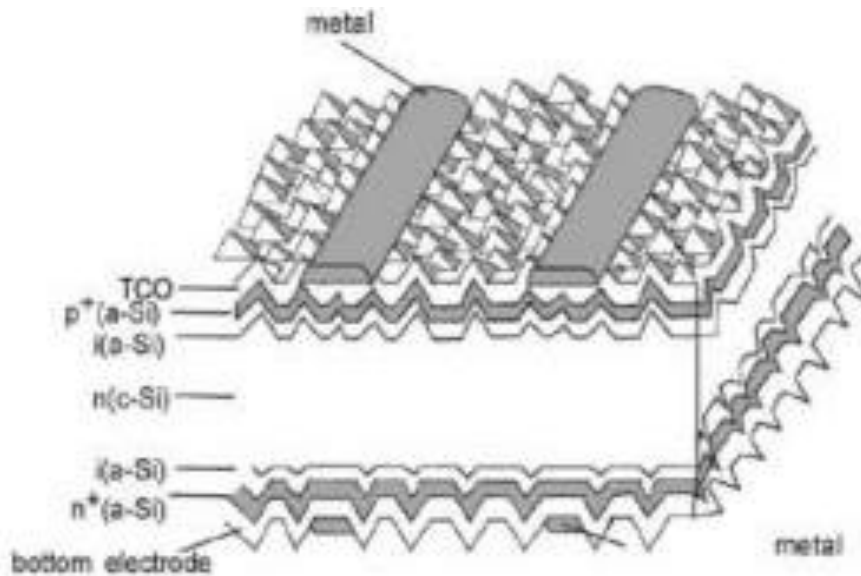


**Figure (2.2.a)** : Image MEB de la surface d'une couche de silicium texturée en forme de pyramide. [41]

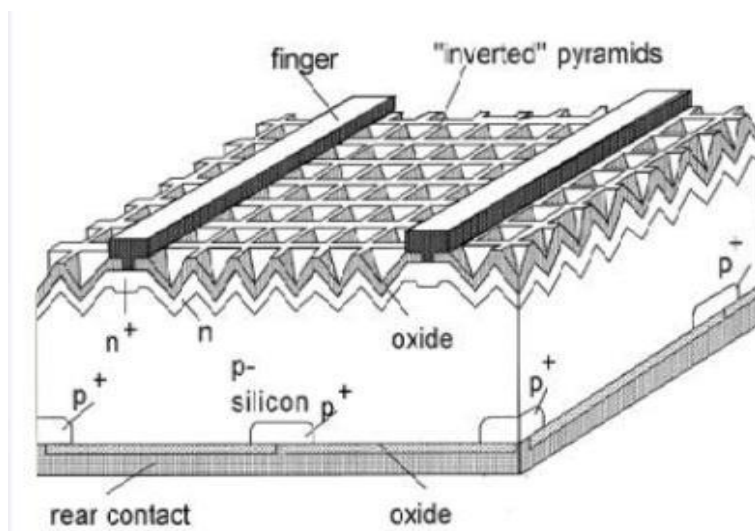
Cette texturation peut se faire au niveau du substrat (figure 2.2.b), dans ce cas toutes les couches déposées ensuite présentent la même texturation, ou bien seulement sur la dernière couche déposée (figure 2.2.c). Le but de cette structure est double, premièrement, elle permet de minimiser les réflexions à la surface grâce aux facettes, et deuxièmement elle piège la lumière à l'intérieur du composant à l'aide de réflexions totales internes.

## Chapitre 2 physiques des cellules photovoltaïques

---



**Figure (2.2.b)** : structure de la cellule HIT à base de silicium avec une texturation de toutes ses couches. [42]



**Figure (2.2.c)** : structure de cellule PERL à base de silicium avec une texturation de pyramides inversées en face avant. [42]

## Chapitre 2 physiques des cellules photovoltaïques

---

La figure (2.3) montre l'architecture d'une cellule photovoltaïque typique avec la jonction PN, la couche antireflet, les électrodes sur les faces avant et arrière.

Les cellules photovoltaïques en silicium sont généralement dimensionnées par carrés de 10 ou 15 cm de côté, cependant, ces dimensions dépendent de la filière. Par exemple, dans la filière III-V à concentration, les cellules sont beaucoup plus petites, de l'ordre du centimètre carré, plusieurs sont ensuite connectées l'unes aux autres en série, Afin d'augmenter les courants.

Les cellules photovoltaïques forment alors un module photovoltaïque, Par exemple Le module HIT-N235SE10 de Sanyo présente une puissance maximale de 235W avec 72 cellules (6 ×12).

Les cellules sont des hétérojonctions de silicium composées de silicium monocristallin mince et de couche ultrafines de silicium amorphe sur les surfaces avant et arrière. Ce panneau produit une tension maximale de sortie de 43V et un courant maximum de sortie de 5,48A. [43]

# Chapitre 2 physiques des cellules photovoltaïques

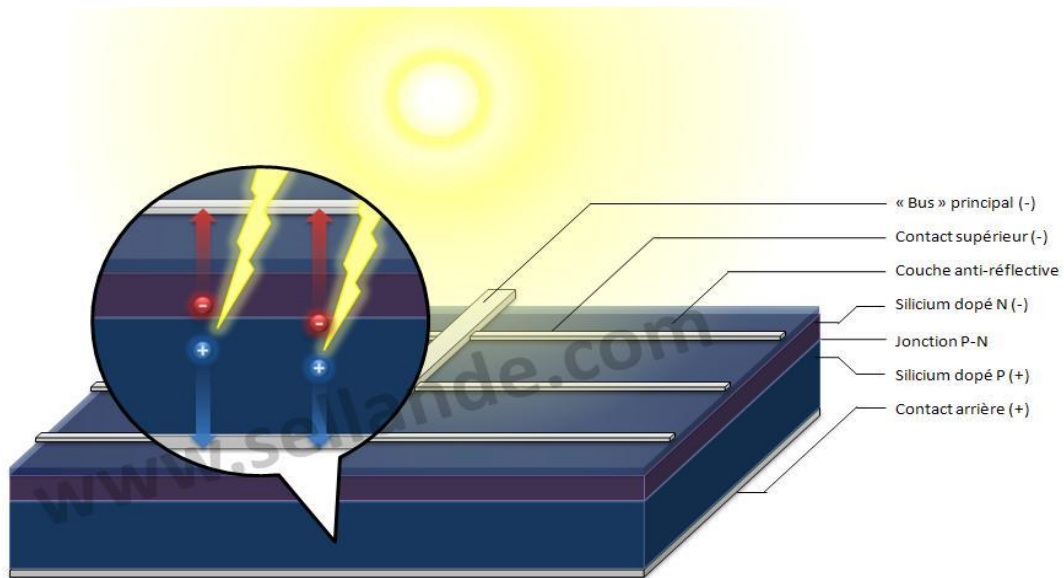


Figure (2.3) : schéma d'une cellule solaire avec la jonction PN, les électrodes, la couche antireflets, et une charge électrique. [44]

## 2.5 Paramètres d'une cellule photovoltaïque

### 2.5.1 Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque

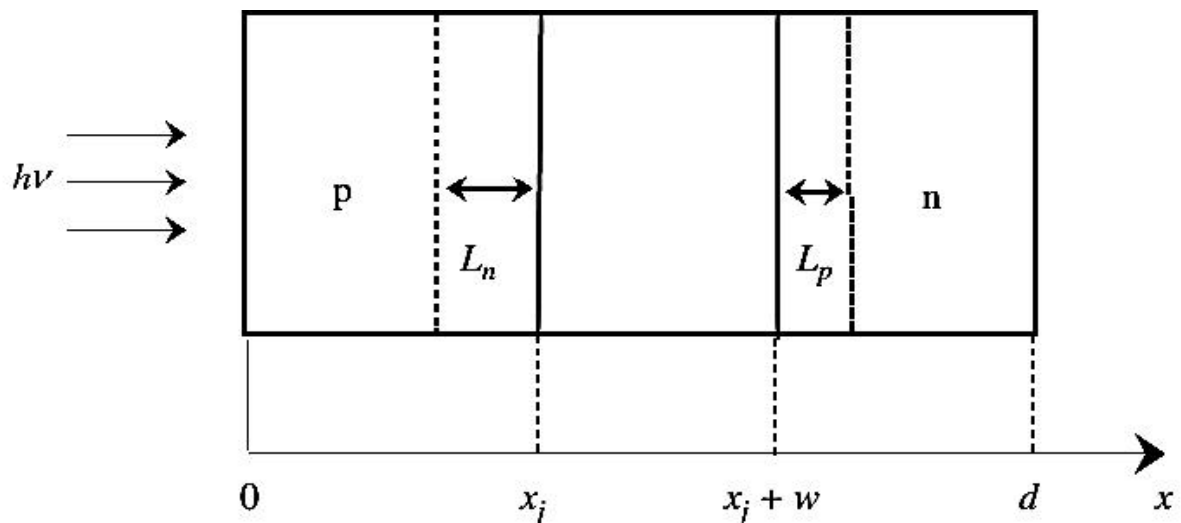


Figure (2.4) : Structure d'une jonction InGaN éclairée.

## Chapitre 2 physiques des cellules photovoltaïques

---

Lorsque la lumière entre par le côté de l'émetteur (Figure 2.4), un nombre d'électrons et de trous sont générés à une distance ( $x$ ), avec un taux de génération qui s'écrit par la loi suivante :

$$G = \alpha F(1 - R) e^{-\alpha x} \quad (2.4)$$

Avec :

$\alpha$  : coefficient d'absorption de la lumière

R : coefficient de réflexion de la lumière sur la surface

F : Flux des photons incidents

Le photo-courant résultant dans la jonction P-N est l'intégrale de la somme de trois Composantes ( $J_n$ ,  $J_p$ ,  $J_d$ ) sur toutes les longueurs d'ondes.

Le courant de diffusion des photoélectrons de la région de type p ( $J_n$ ), le courant de Photo génération dans la zone de charge d'espace ( $J_d$ ) et le courant de diffusion des Photo trous de la région de type n ( $J_p$ ).

La densité de courant d'électrons dans l'émetteur est donnée par :

## Chapitre 2 physiques des cellules photovoltaïques

$$J_n = qF(1 - R) \cdot \frac{\alpha L_n}{(\alpha L_n)^2} \cdot \left[ \left[ \frac{\left( \frac{S_n \cdot L_n}{D_n} + \alpha L_n \right)}{\left[ \left( \frac{S_n \cdot L_n}{D_n} \right) \cdot \sinh \frac{x_j}{L_n} + \cosh \frac{x_j}{L_n} \right]} \right] - \left[ \alpha L_n + \frac{\left[ \left( \frac{S_n \cdot L_n}{D_n} \cdot \cosh \frac{x_j}{L_n} + \sinh \frac{x_j}{L_n} \right) \right]}{\frac{S_n \cdot L_n}{D_n} \left( \sinh \frac{x_j}{L_n} \right) + \cosh \frac{x_j}{L_n}} \right] \right] \cdot e^{-\alpha x_j} \quad (2.5)$$

La densité de courant de trous est donnée par :

$$J_p = \left[ \alpha L_p - \frac{\left[ \left( \frac{S_p \cdot L_p}{D_p} \cdot \cosh \frac{d}{L_p} + \sinh \frac{d}{L_p} \right) \right]}{\frac{S_p \cdot L_p}{D_p} \left( \sinh \frac{d}{L_p} \right) + \cosh \frac{d}{L_p}} \right] - \left[ \frac{\left( -\frac{S_p \cdot L_p}{D_p} + \alpha L_p \right) \cdot e^{-\alpha d}}{\left[ \left( \frac{S_p \cdot L_p}{D_p} \right) \cdot \sinh \frac{d}{L_p} \right] + \cosh \frac{d}{L_p}} \right] \cdot e^{-\alpha(x_j+w)} \cdot qF(1 - R) \cdot \frac{\alpha L_p}{(\alpha L_p)^2 - 1} \quad (2.6)$$

Etant donné que le champ électrique dans la région de charge d'espace est élevé, les électrons et les trous générés dans ces régions sont accélérés vers les directions opposées. La densité de courant photoélectrique dans la région de charge d'espace est donnée par :

$$J_d = qF(1 - R)(e^{-\alpha x_j} - e^{\alpha(x_j+w)}) \quad (2.7)$$

Le photon-courant  $J_{ph}$  est calculé en intégrant sur l'ensemble du spectre solaire, de sorte que :

$$J_{ph} = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} (J_n + J_p + J_d) d\lambda \quad (2.8)$$

## Chapitre 2 physiques des cellules photovoltaïques

---

La densité de courant totale est donnée par :

$$J_{tot} = J_{ph} - J_{obs} \quad (2.9)$$

Avec :

$J_{obs}$  : courant d'obscurité donné par

$$J_{obs} = J_0 \left( e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (2.10)$$

$J_0$  : courant de saturation

$$J_0 = qn_i^2 \left( \frac{D_n}{L_n N_a} + \frac{D_p}{L_p N_d} \right) \quad (2.11)$$

Avec :

$S_n$  : la vitesse de recombinaison de surface des électrons en excès à la surface avant,  
avec :

$$S_n = 70 \left( \frac{N_d (cm^{-3})}{7.10^{17}} \right) \quad (2.12)$$

## Chapitre 2 physiques des cellules photovoltaïques

---

$S_p$  : La vitesse de recombinaison de surface des trous en excès à la surface avant,

Avec :

$$S_p = 70 \left( \frac{N_a (cm^{-3})}{7.10^{17}} \right) \quad (2.13)$$

$L_n$  : Longueur de diffusion des électrons dans le matériau P, avec :

$$L_n = \sqrt{D_n \cdot \tau_n} \quad (2.14)$$

$L_p$  : Longueur de diffusion des trous dans le matériau N, avec :

$$L_p = \sqrt{D_p \cdot \tau_p} \quad (2.15)$$

$\tau_p$  et  $\tau_n$  : les durées de vie des porteurs minoritaires pour les électrons et les trous, respectivement.

$D_n$  : le coefficient de diffusion des électrons

$D_p$  : le coefficient de diffusion des trous

## Chapitre 2 physiques des cellules photovoltaïques

$\lambda_{\min}$  : la longueur d'onde la plus petite du spectre solaire

$\lambda_{\max}$  : la longueur d'onde la plus grande du spectre solaire

Le courant de court-circuit est le courant délivré par la cellule solaire pour une tension nulle :

$$J_{cc} = J_{tot}(0) \quad (2.16)$$

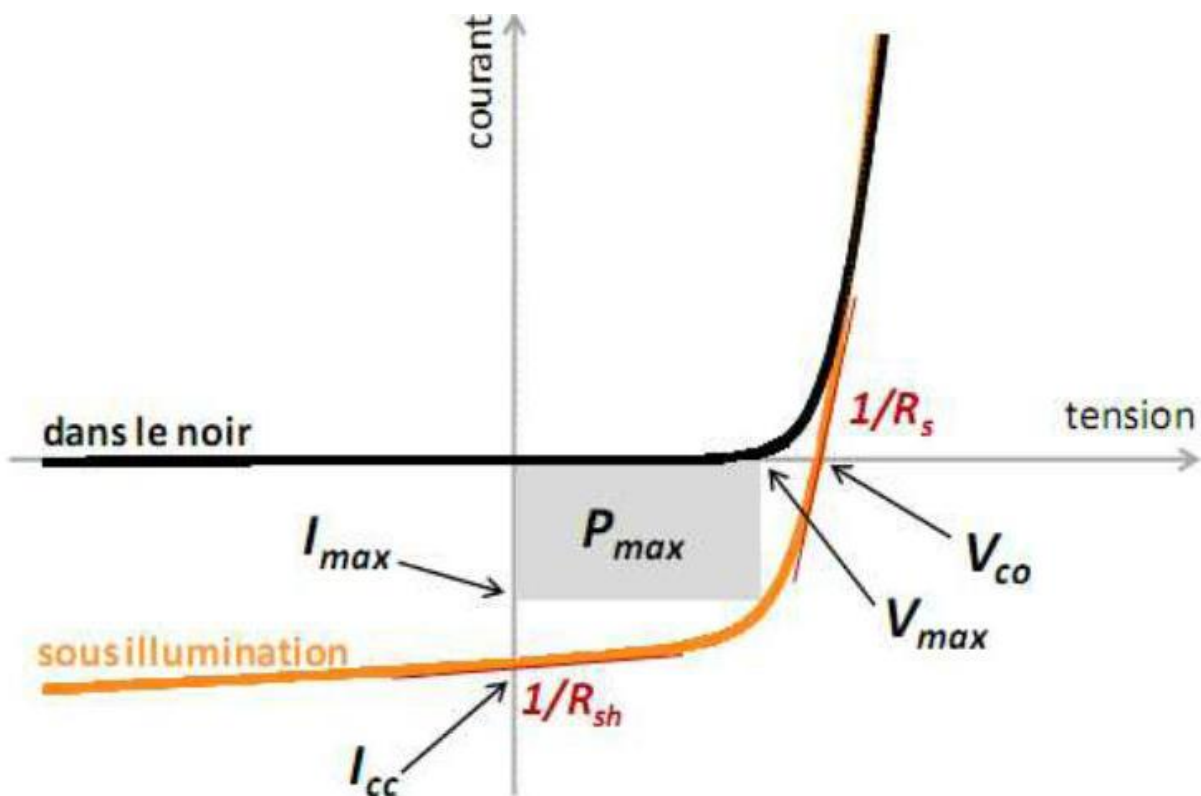


Figure (2.5.a) : Caractéristique I(V) d'une cellule photovoltaïque.

## Chapitre 2 physiques des cellules photovoltaïques

---

La figure (2.5.a) montre la caractéristique courant-tension d'une cellule solaire à l'obscurité et sous éclairage, On distingue le courant de court-circuit pour une tension nulle ainsi que la tension de circuit ouvert pour un courant nul.

### a – courant de court-circuit $I_{cc}$

Il s'agit du courant lorsque le potentiel appliqué à la cellule est nul. C'est le plus grand courant que la cellule peut fournir. Celui-ci est fonction de la température, de la longueur d'onde du rayonnement, de la surface active de la cellule et de la mobilité des porteurs. Ce courant est linéairement dépendant de l'intensité lumineuse reçue.

### b - Tension de circuit ouvert $V_{co}$

Comme son nom l'indique, c'est la tension aux bornes de la cellule lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge ou lorsqu'elle est connectée à une charge de résistance infinie. Elle dépend essentiellement du type de cellule solaire (jonction PN, jonction Schottky), des matériaux de la couche active et de la nature des contacts de la couche active-électrode. Elle dépend de plus de l'éclairage de la cellule.

$$V_{co} = \frac{KT}{q} \ln \left( \frac{J_{ph}}{J_0} + 1 \right) \quad (2.17)$$

## Chapitre 2 physiques des cellules photovoltaïques

---

### c – Facteur de forme (Facteur de remplissage) FF

Un paramètre important est souvent utilisé à partir de la caractéristique  $I(V)$  pour la qualité d'une cellule ou d'un générateur photovoltaïque : c'est le facteur de remplissage ou facteur de forme (FF). Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée  $P_{max}$  et la puissance formée par le rectangle ( $I_{cc} \times V_{co}$ ).

Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également. Ce facteur est donné par :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \times V_{co}} \quad (2.18)$$

### d-Rendement de conversion d'énergie

Le rendement de conversion d'énergie est le rapport de la puissance générée et de la puissance du rayonnement solaire incident  $P_i$ . On appelle rendement maximal, le rapport entre la puissance maximale et la puissance  $P_i$ .

Le rendement est donné par l'équation ci-dessous :

$$\eta = \frac{U_m \cdot I_m}{P_i \cdot S} = \frac{FF \cdot V_{co} \cdot I_{cc}}{P_i \cdot S} \quad (2.19)$$

## Chapitre 2 physiques des cellules photovoltaïques

---

Avec :

$P_i$  : Puissance d'éclairement reçue par unité de surface

$S$  : La surface de la cellule PV

FF : Facteur de Forme.

$I_m$  : Le courant correspondant à la puissance maximale fournie.

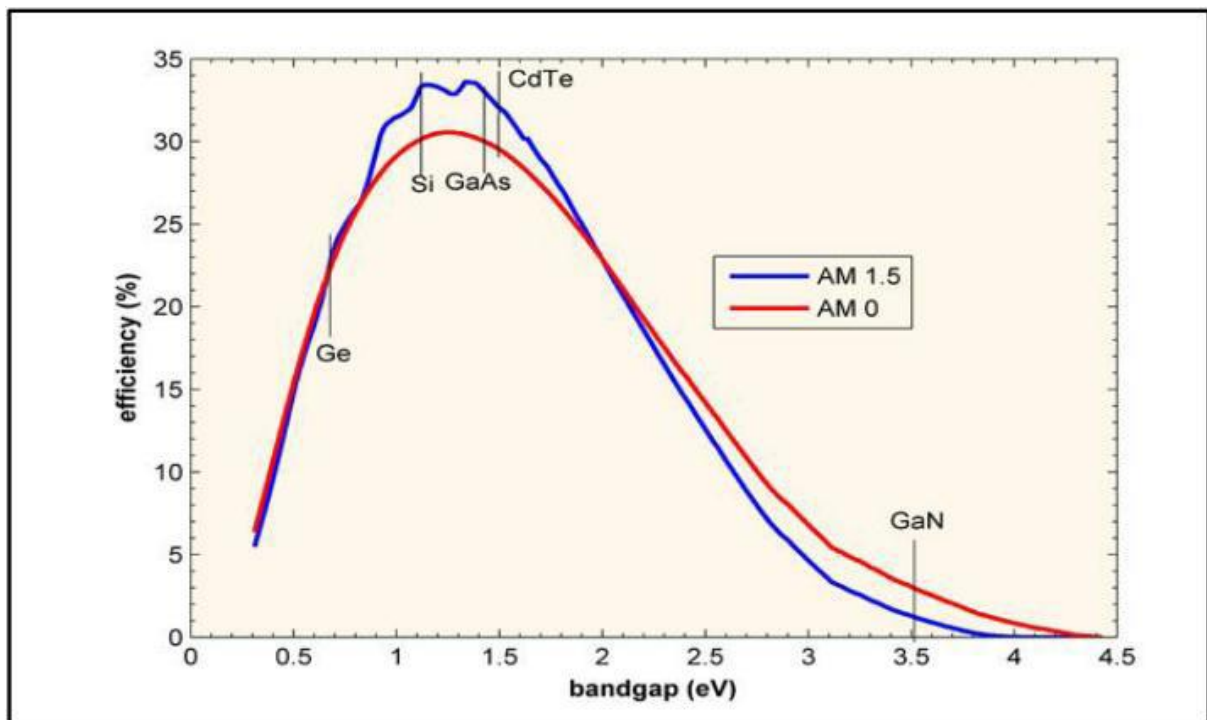
$U_m$  : La tension correspondante à la puissance maximale fournie.

Le rendement de la cellule solaire est déterminé comme étant la fraction de la puissance incidente qui est convertie en électricité, la figure (2.5.b)

Le rendement est lié de manière indirecte avec le gap d'énergie. Selon les matériaux utilisés et les applications souhaitées, les matériaux à semi-conducteurs couvrent une large bande de gap d'énergie qui permet de couvrir toutes les longueurs d'ondes du spectre solaire.

## Chapitre 2 physiques des cellules photovoltaïques

---



**Figure (2.5.b)** : Le rendement en fonction du gap d'énergie. [45]

Pour obtenir une cellule photovoltaïque avec un rendement élevé, il faut donc optimiser l'absorption de la lumière par rapport au spectre incident et le transport des porteurs de charge au sein des matériaux constituants. Un autre moyen d'augmenter le rendement d'une cellule sans en modifier la composition consiste à concentrer le flux lumineux incident.

# Chapitre 2 physiques des cellules photovoltaïques

---

## **2.6 Cellule photovoltaïque à base d'InGaN**

Les cellules photovoltaïques présentant les plus hauts rendements, en simple et multi-jonctions, sont composées de matériaux III-V. L'alliage InGaN, faisant également partie de cette catégorie de matériaux, possède aussi un fort potentiel pour des cellules solaires à haut rendement. L'avantage principal de cet alliage est son gap modulable sur quasiment tout le spectre solaire.

### **2.6.1 Cellule Multi-jonctions**

La technologie des cellules multi-jonctions permet d'optimiser l'absorption du spectre solaire et ainsi d'obtenir de meilleurs rendements. Pour cela, plusieurs jonctions P-N, possédant des gaps d'énergie différents, sont empilées. Les cellules du haut ont un gap optimisé pour les petites longueurs d'onde dans le bleu (grandes énergies). Les cellules du milieu possèdent un gap dans le visible ou le proche infrarouge. Enfin, les cellules du bas ont un gap optimisé dans l'infrarouge moyen et les grandes longueurs d'onde (petites énergies). Les cellules sont connectées en série grâce à des jonctions tunnel. Le plus souvent, ces cellules sont composées de trois jonctions, mais idéalement, il faudrait un très grand nombre de jonctions afin de capter au mieux le spectre solaire.

#### **a – cellule tandem**

Dans la configuration tandem, les cellules sont placées en série donc reliées électriquement, d'où les contraintes:

## Chapitre 2 physiques des cellules photovoltaïques

---

- Les matériaux des cellules doivent avoir des paramètres de maille voisins afin que les interfaces soient exemptes de défauts qui piègent les électrons et réduisent donc le rendement de la cellule.
- Le courant dans les cellules en série est le même et donc limité par le plus faible courant des différentes cellules.

Le rendement d'une cellule tandem sera donné par :

$$\eta = \frac{\sum V_{co} * \min(J_{cc})}{P_i} FF \quad (2.20)$$

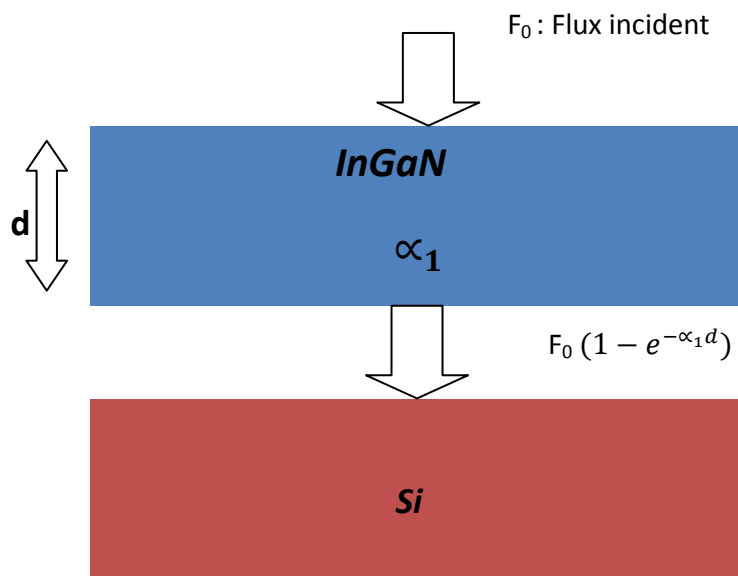


Figure (2.6.a) : cellule tandem

## Chapitre 2 physiques des cellules photovoltaïques

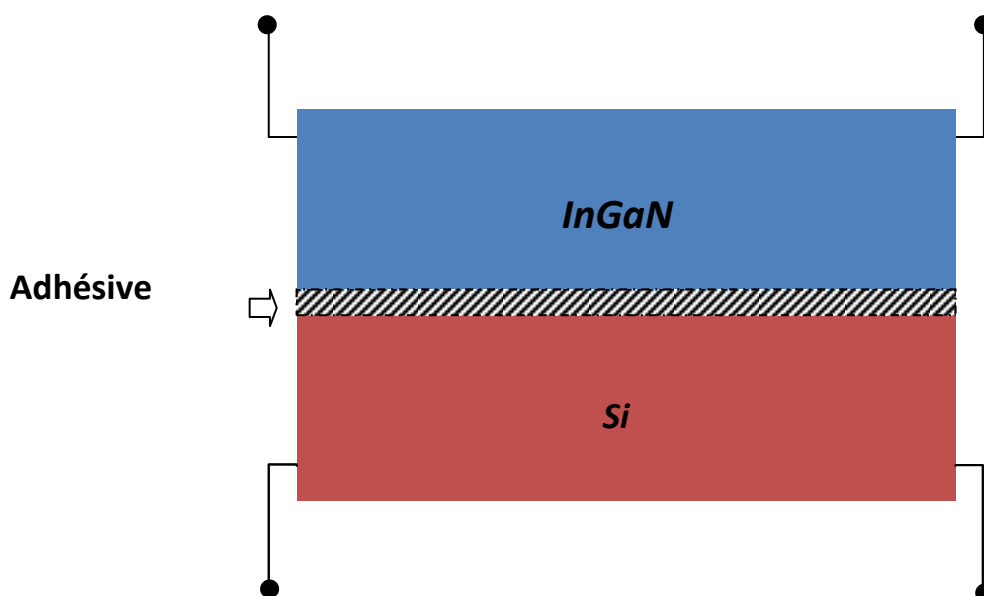
---

### b – cellule cascade

Dans la configuration cascade, les cellules sont fabriquées séparément ensuite reliées par une colle transparente. Les cellules sont isolées électriquement et dotées de contacts électriques.

Dans cette configuration, on s'affranchit des contraintes citées précédemment, Les matériaux des cellules peuvent avoir des paramètres de maille et des courants différents. Cependant, la réalisation de ces cellules est plus complexe  
Le rendement d'une cellule cascade sera donné par :

$$\eta = \frac{\sum P_m}{P_i} \quad (2.21)$$



## Chapitre 2 physiques des cellules photovoltaïques

---

Figure (2.6.b) : cellule cascade

Dans les deux configurations, le flux incident sur la cellule du bas est égal à  $F_0 \exp(-\alpha d)$ ,  $\alpha$  et  $d$  sont le coefficient d'absorption et l'épaisseur de la cellule du haut respectivement.

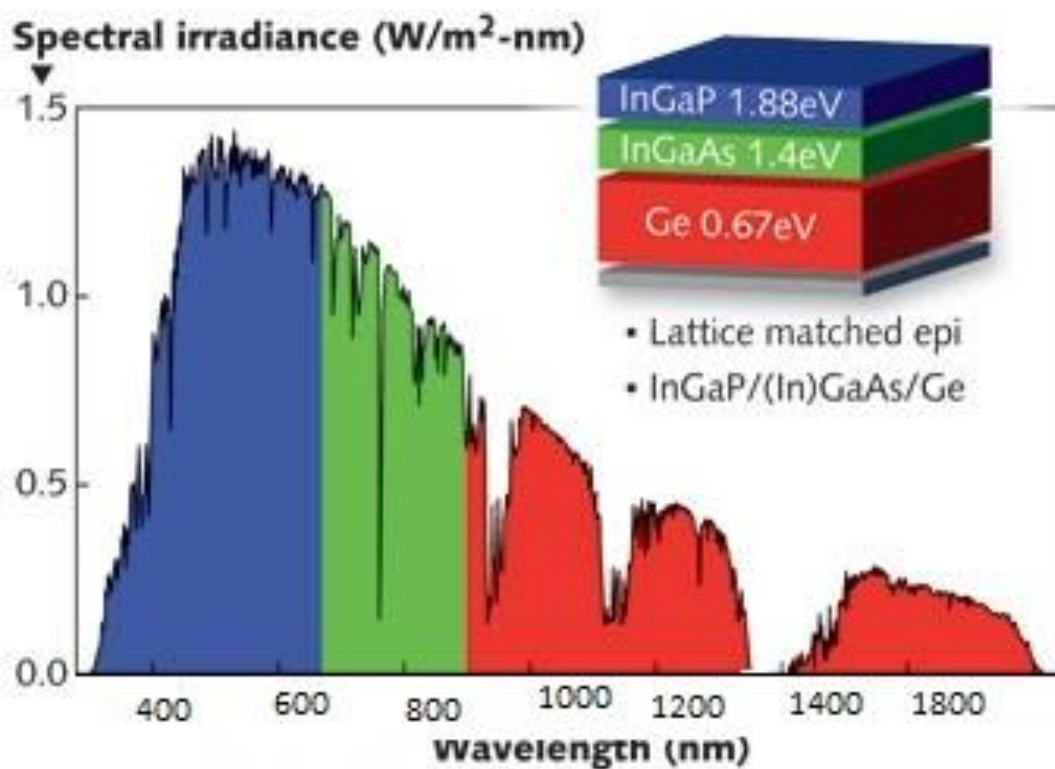
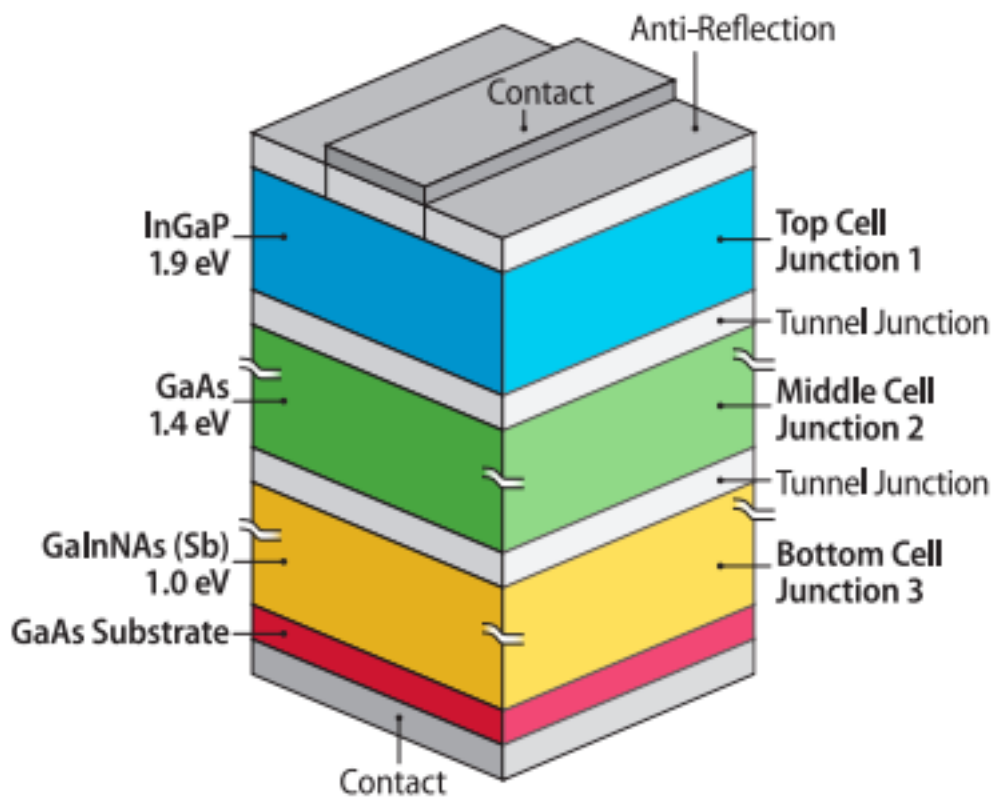


Figure (2.6.c) : Recouvrement du spectre solaire par une cellule triple-jonctions avec  $Eg_1$ ,  $Eg_2$  et  $Eg_3$  les gaps de la cellule *top*, *middle* et *bottom*, respectivement ( $Eg_1 > Eg_2 > Eg_3$ ).

## Chapitre 2 physiques des cellules photovoltaïques

---



**Figure (2.6.d)** : Schéma d'une cellule triple-jonctions. La cellule *top* a un grand gap pour absorber les photons dans le bleu. La cellule *middle* à un gap dans le proche infrarouge, et la cellule *bottom* a un petit gap dans l'infrarouge pour capter les photons de petite énergie. Les cellules sont connectées entre elles par les jonctions tunnel.

# Chapitre 2 physiques des cellules photovoltaïques

---

## **2.7 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté la physique fondamentale et le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque. Aussi on a déduit les caractéristiques principales ainsi que les paramètres essentiels d'une cellule solaire ( $I_{cc}$ ,  $V_{co}$ ,  $FF$ ,  $P_{max}$ ).

Enfin on a abordé les cellules III-V multi-jonctions et les cellules photovoltaïques à base d'InGaN.

### 3.1 Introduction

La simulation numérique est une série d'opérations effectuées sur un ordinateur et produisant un phénomène physique. Elle aboutit à la description du résultat de ce phénomène, comme s'il s'était réellement déroulé. Cette représentation peut être une série de données, une image ou même un film.

Une simulation numérique peut représenter des phénomènes physiques complexes dont la description repose sur un modèle mathématique comportant des équations aux dérivées partielles.

Dans notre travail, nous avons utilisé le logiciel MATHCAD dans nos simulations. Ce logiciel permet de réaliser des calculs scientifiques.

Dans ce chapitre, nous allons étudier les caractéristiques d'une cellule solaire double jonctions InGaN/Si.

## 3.2 Description de la structure simulée

La figure (3.1) représente la structure simulée et le tableau 1 regroupe les données utilisées dans nos simulations.

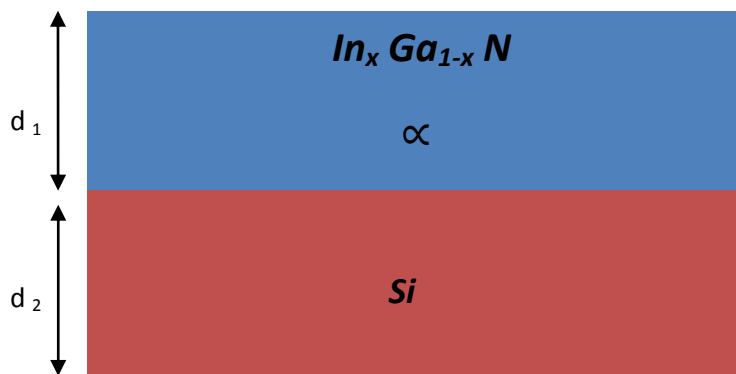
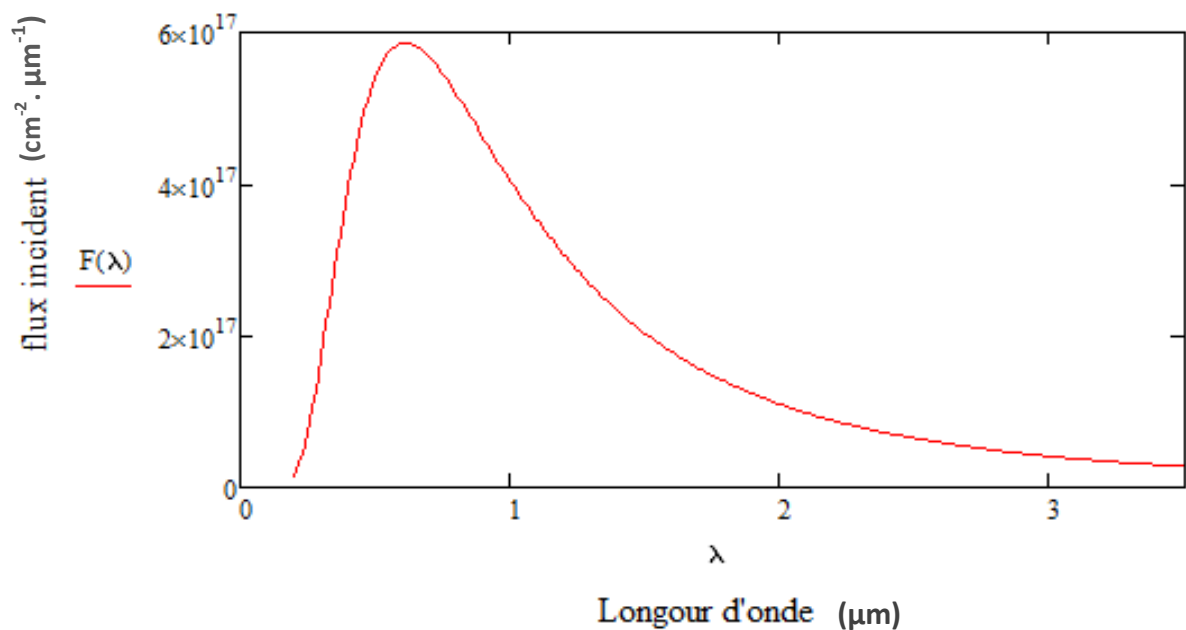


Figure (3.1) : Schéma de la structure simulée

Paramètres	InGaN	Silicium
$N_d$ ( $cm^{-3}$ )	$10^{18}$	$10^{18}$
$N_a$ ( $cm^{-3}$ )	$10^{18}$	$10^{18}$
$S_n$ (cm/s)	50	$10^3$
$S_p$ (cm/s)	50	$10^3$
$D_n$ ( $cm^2/s$ )	2,40	39
$D_p$ ( $cm^2/s$ )	0,96	12
$\tau_n$ (ns)	6,5	$10^3$
$\tau_p$ (ns)	6,5	$10^3$
$X_j$ (cm)	$10^{-6}$	$10^{-6}$

Tableau(3.1) : Donnée de la structure simulée

### 3.3 Irradiation d'un corps noir



**Figure (3.2) :** Le flux incident  $F$  en fonction de la longueur d'onde  $\lambda$  à  $T = 6000$  K.

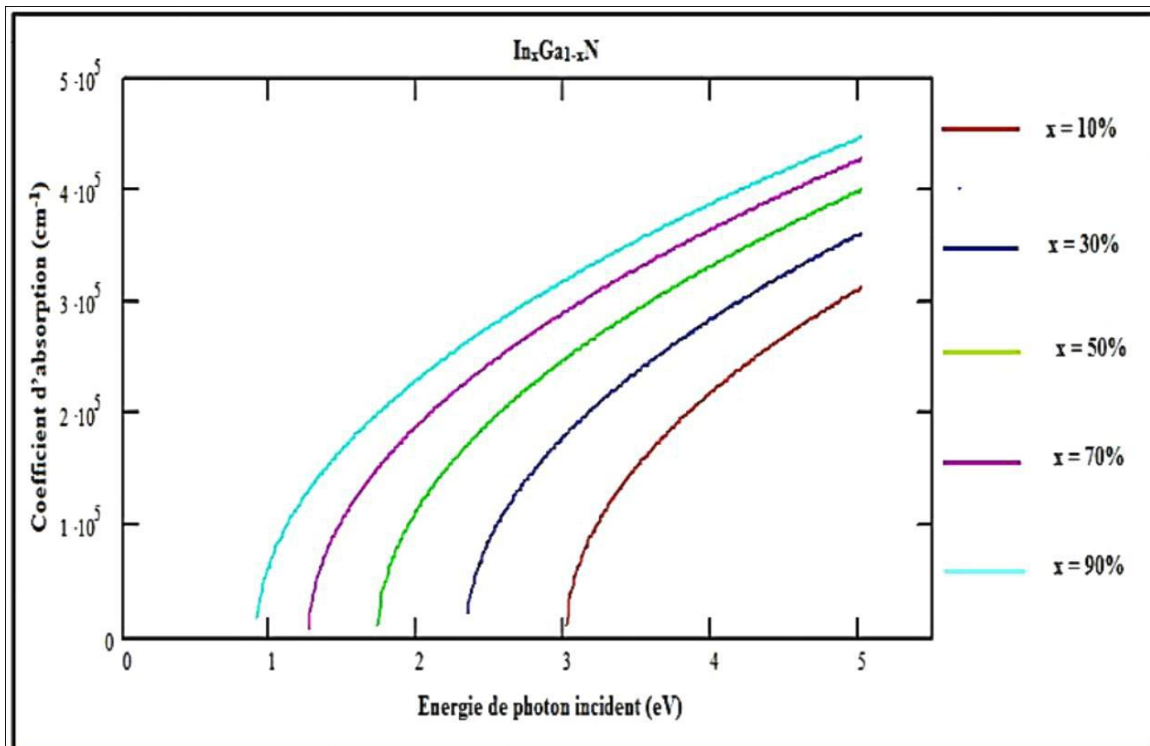
La figure 3.2 représente le flux d'un corps noir pour une température  $T=6000$  K. Ce flux varie avec la longueur d'onde  $\lambda$  et présente un maximum pour  $\lambda=0,8\mu\text{m}$ .

Dans nos simulations nous avons utilisé l'irradiation d'un corps noir à  $T=6000$  K qui correspond à l'émission solaire hors atmosphère.

### 3.4 L'absorption

Sur la figure (3.3), nous avons représenté la variation du coefficient d'absorption  $\alpha$  en fonction de l'énergie des photons incidents pour différents valeurs de la concentration d'indium  $x$ . Le coefficient d'absorption augmente avec l'énergie des photons.

Pour une énergie de photon donnée,  $\alpha$  augmente avec la concentration d'indium  $x$  (faibles gaps).

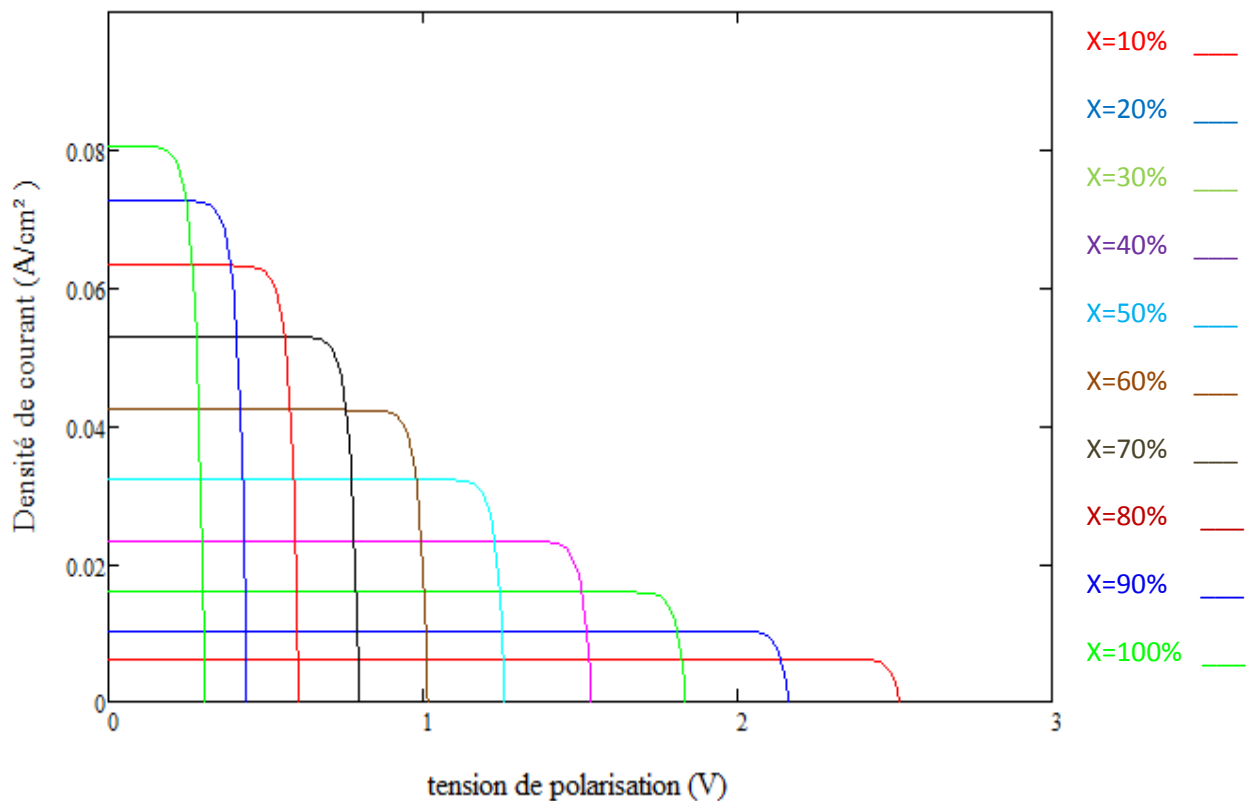


**Figure (3.3)** : variation du coefficient d'absorption  $\alpha$  en fonction de l'énergie des photons incidents  $E$ .

## 3.5 Paramètres électriques d'une structure InGaN ensoleillée

### 3.5.1 Caractéristiques courant-tension

Sur la figure (3.4) sont représentées les caractéristiques courant-tension pour différentes concentrations d'indium  $x$ . On constate que la densité de courant de court-circuit  $J_{cc}$  et la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  varient en sens inverse,  $J_{cc}$  augmente avec la concentration d'indium alors que  $V_{co}$  diminue avec  $x$ .

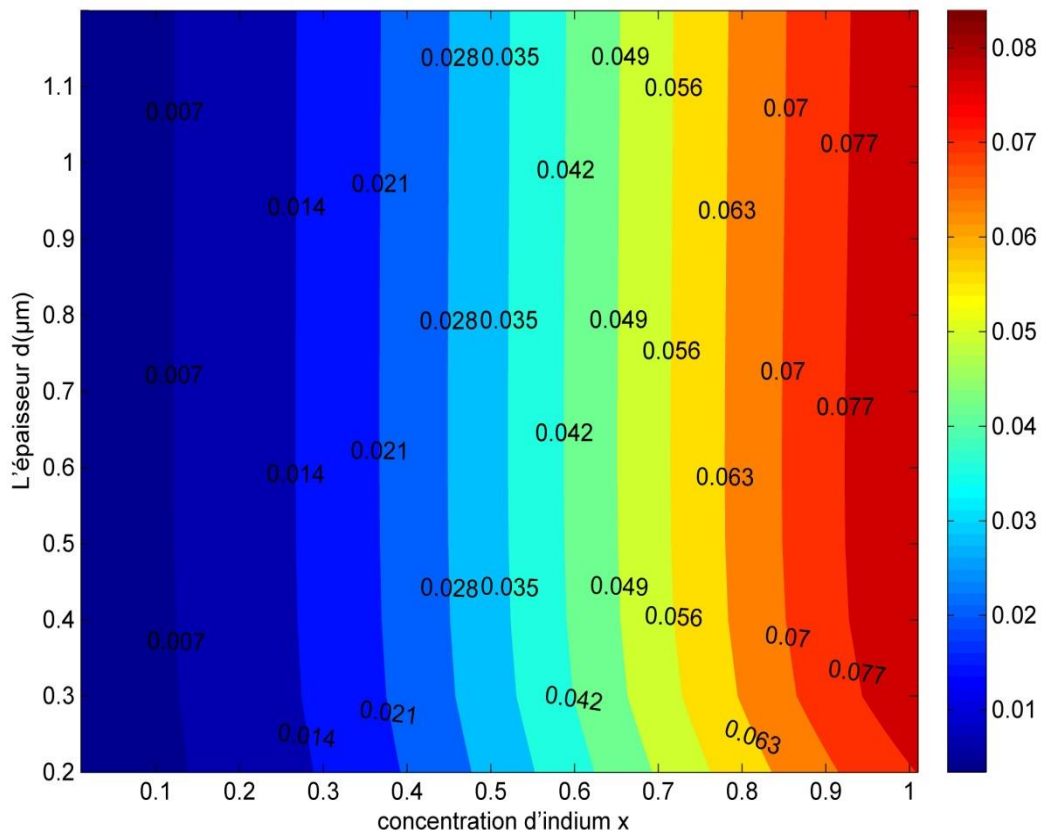


**Figure (3.4)** : Caractéristique courant-tension de la structure  $In_xGa_{1-x}N$  pour plusieurs concentrations d'indium  $x$  : ( $d_1=0,2 \mu m$ ).

On constate que la concentration d'indium provoque un changement crucial dans les caractéristiques courant-tension. Pour des concentrations d'indium élevées, le courant augmente tangiblement accompagné d'une chute de tension remarquable.

## 3.5.2 Courant de court-circuit

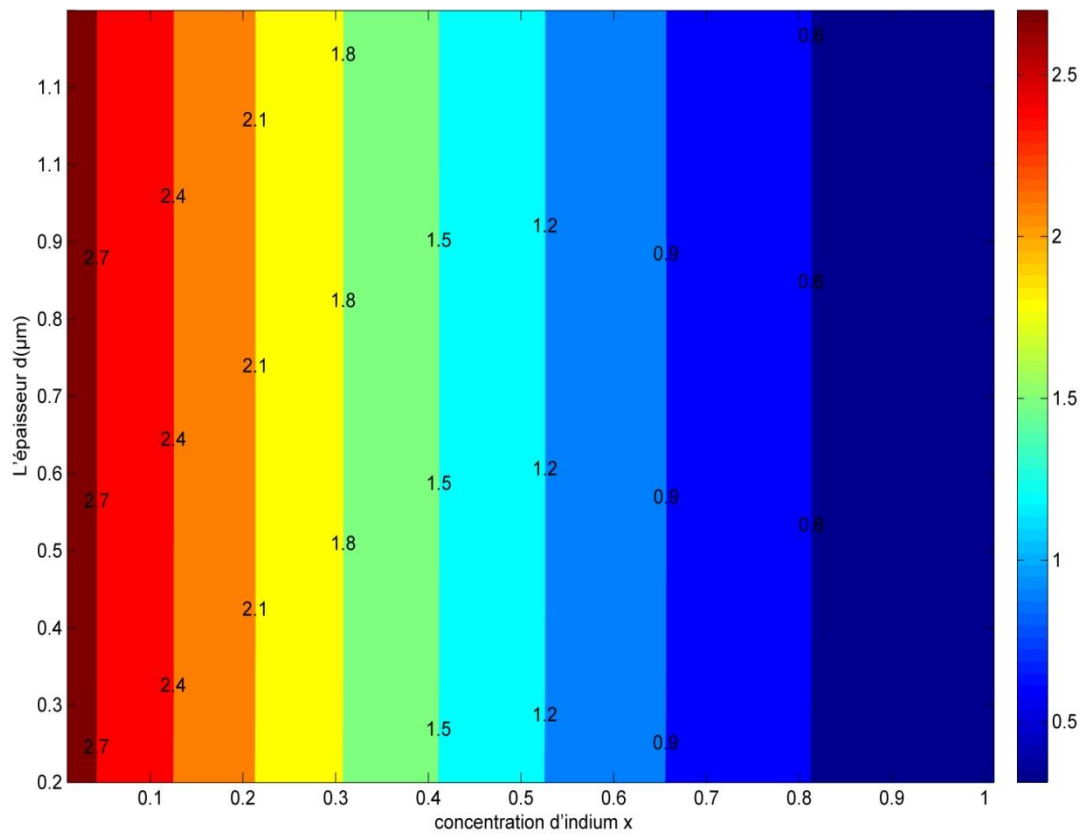
La figure 3.5 montre que le courant de court-circuit augmente lorsque la concentration d'indium  $x$  et l'épaisseur  $d$  augmentent. Lorsque  $x$  augmente, le gap diminue entraînant l'augmentation du coefficient d'absorption  $\alpha$  ( $\alpha = 2,2 \times 10^5 \sqrt{(\frac{1,24}{\lambda}) - Eg [cm^{-1} ]}$ ) d'où l'augmentation du courant. Lorsque l'épaisseur  $d$  augmente, le nombre de photons absorbés augmente entraînant l'augmentation du courant. Pour une certaine épaisseur ( $0,4\mu m$ ) tous les photons seront absorbés et le courant sature.



**Figure (3.5) :** variation du courant de court-circuit  $J_{cc}$  en fonction de la concentration d'indium  $x$  et l'épaisseur  $d$ .

## 3.5.3 Tension de circuit ouvert

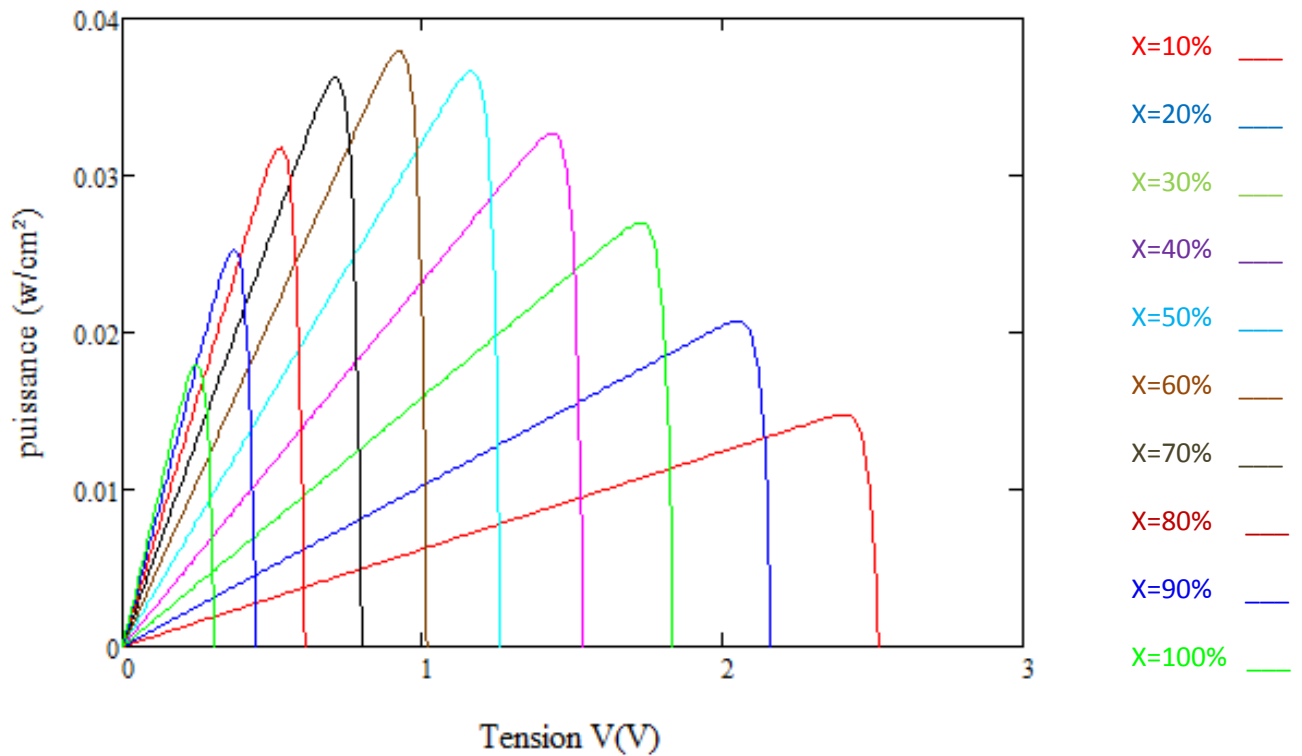
La figure (3.6) représente la variation de la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  en fonction de la concentration d'indium  $x$  et l'épaisseur  $d$ . L'augmentation de la concentration d'indium  $x$  induit une diminution de la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  due à une diminution du gap  $E_g$ . L'influence de l'épaisseur  $d$  est négligeable.



**Figure (3.6):** variation de la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  en fonction de la concentration d'indium  $x$  et l'épaisseur  $d$ .

## 3.5.4 Puissance délivrée

Sur la figure (3.7) sont représentées les variations de la puissance délivrée en fonction de la tension pour différentes concentration d'indium  $x$ . Ces courbes présentent des maximums correspondants aux puissances maximales  $P_{\max}$ .



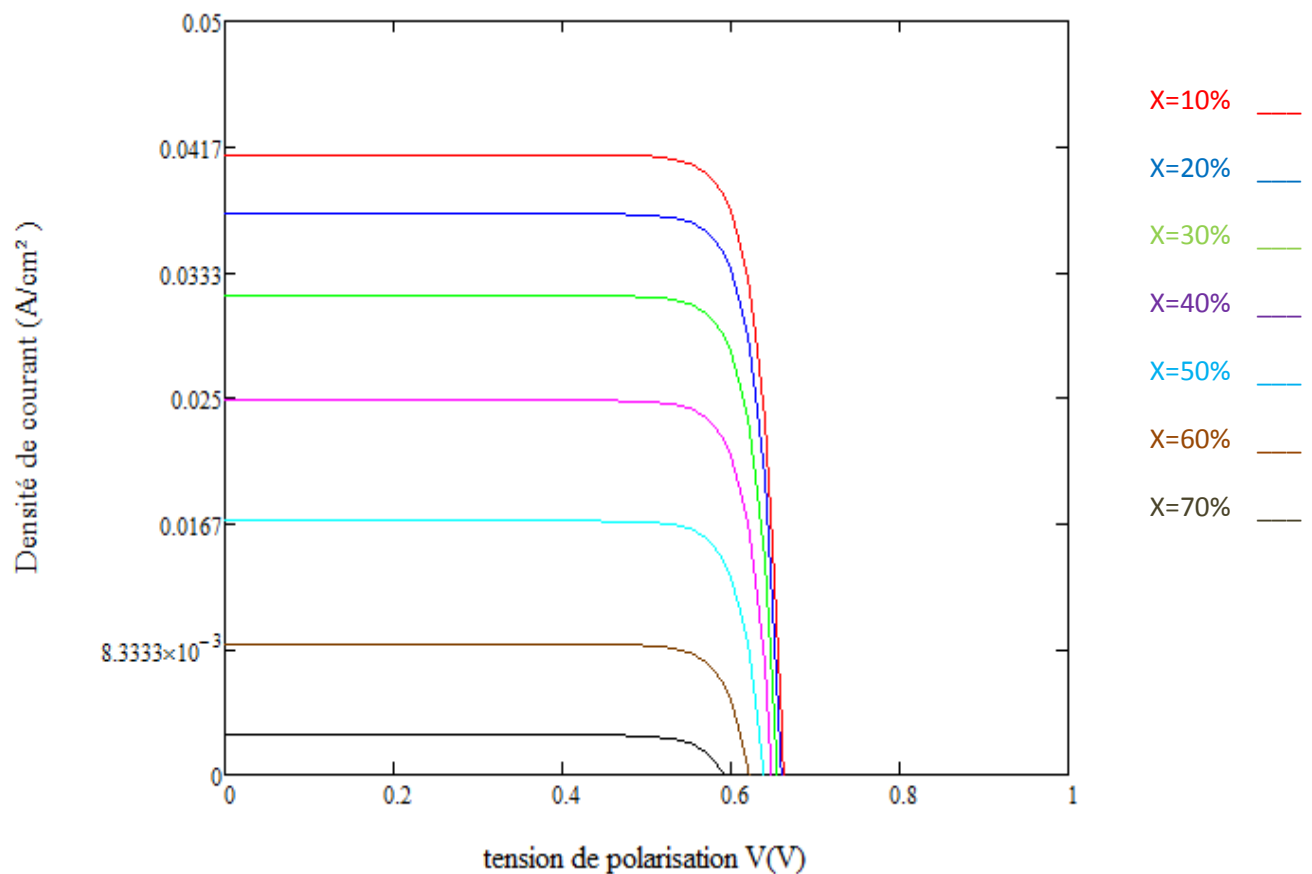
**Figure (3.7)** : puissance délivrée par la jonction InGaN pour plusieurs concentrations d'indium. ( $d_1=0,2 \mu m$ ).

La puissance maximale atteint sa valeur optimale pour une concentration d'indium  $x$  de l'ordre de 60%.

## 3.6 Paramètres électriques d'une structure Si ensoleillée

### 3.6.1 Caractéristiques courant-tension

Sur la figure (3.8) sont représentées les caractéristiques courant-tension pour différentes concentrations d'indium  $x$ . On constate que le courant de court-circuit  $J_{cc}$  et la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  varient dans le même sens,  $J_{cc}$  et  $V_{co}$  diminuent avec la concentration d'indium  $x$ .



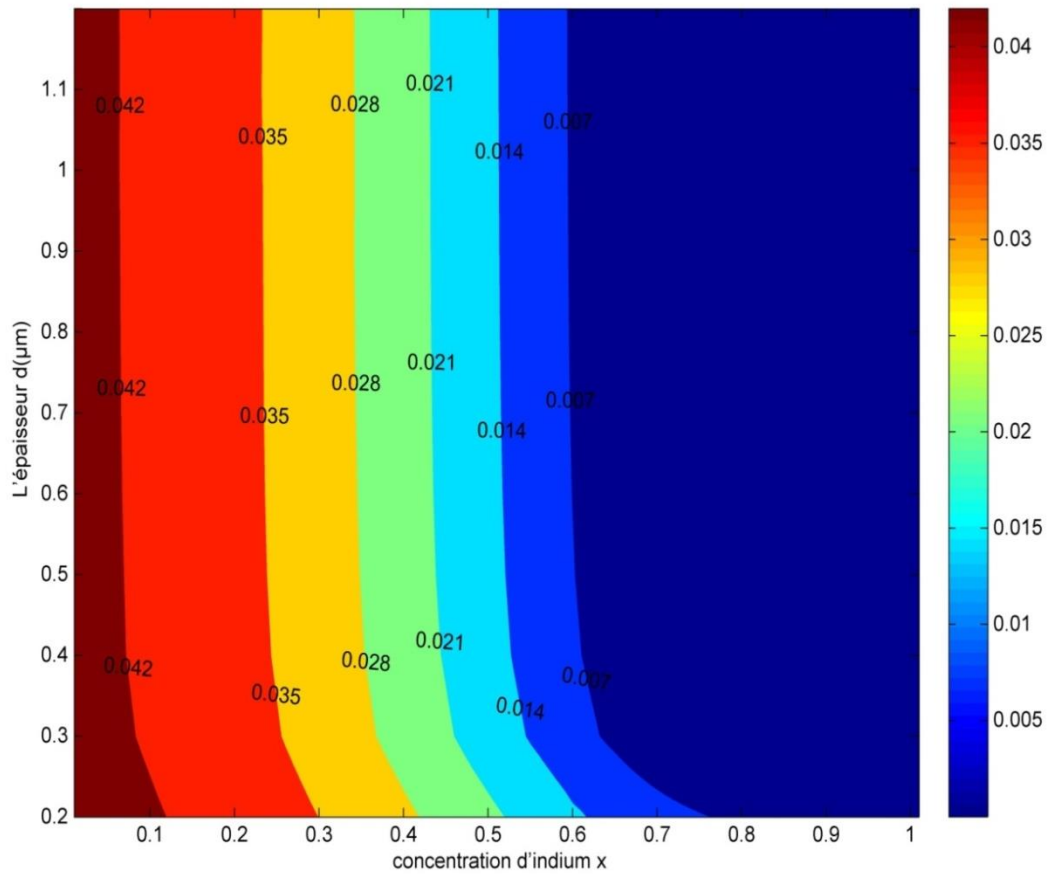
**Figure (3.8) :** Caractéristique courant-tension Silicium pour plusieurs concentrations d'indium  $x$  : ( $d_1=0,2 \mu\text{m}$ ,  $d_2=50 \mu\text{m}$ ).

Lorsque la concentration d'indium  $x$  augmente, le gap de InGaN diminue provoquant l'augmentation de l'absorption dans la cellule du haut. De ce fait le flux qui arrive à la cellule du bas diminue entraînant la diminution du courant dans celle-ci.

La tension de circuit ouvert varie peu car le gap du silicium est constant et la faible variation est due à la diminution du courant  $J_{cc}$  avec  $V_{co} = \frac{KT}{q} \ln \left( \frac{J_{ph}}{J_0} + 1 \right)$ .

### **3.6.2 Courant de court-circuit**

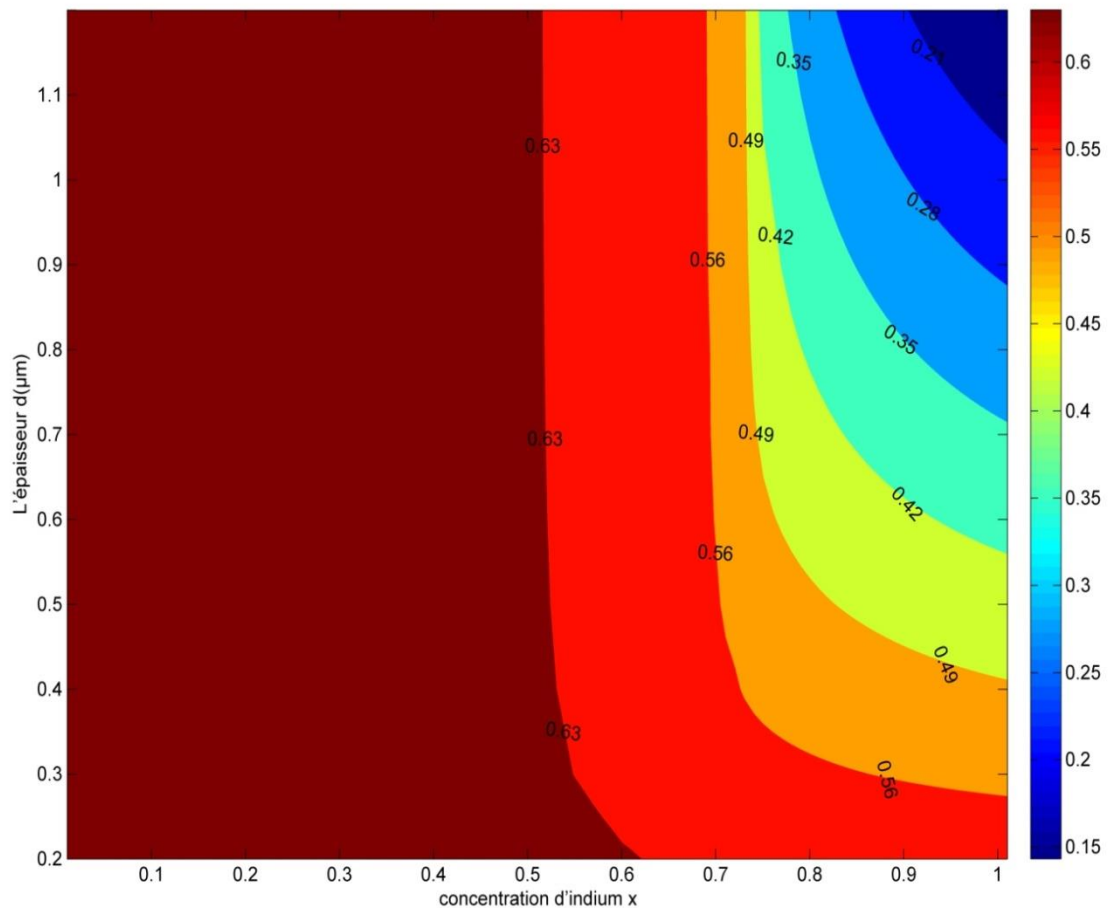
Dans la structure silicium, le courant de court-circuit  $J_{cc}$  diminue lorsque la concentration d'indium  $x$  et l'épaisseur  $d_1$  augmentent. Cette diminution est due à l'augmentation de l'absorption dans la cellule InGaN du haut.  $J_{cc}$  atteint des valeurs supérieures à  $0.04 \text{ A/cm}^2$  pour des concentrations d'indium de 10% et sature pour des épaisseurs supérieures à  $0,4\mu\text{m}$ .



**Figure (3.9)** : variation du courant court-circuit  $J_{cc}$  en fonction de la concentration d'indium  $x$  et l'épaisseurs  $d$ .

## 3.6.3 Tension de circuit ouvert

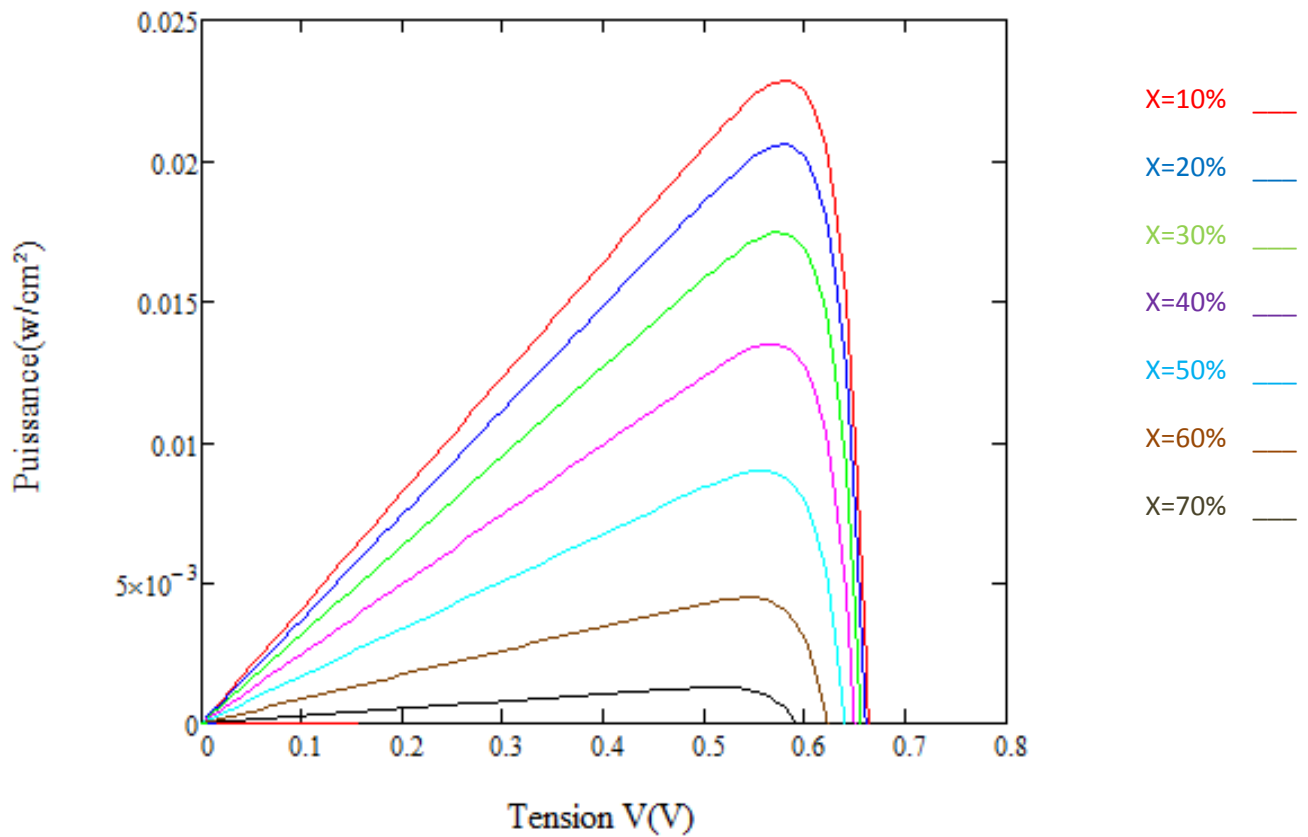
La figure (3.10) représente la variation de la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  en fonction de la concentration d'indium  $x$  et de l'épaisseur  $d_1$ . L'augmentation de la concentration d'indium  $x$  et de l'épaisseur  $d_1$  induit une diminution de la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  due à la diminution du courant de court-circuit  $J_{cc}$  avec  $V_{co} = \frac{KT}{q} \ln \left( \frac{J_{ph}}{J_0} + 1 \right)$ .



**Figure (3.10)** : variation de la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  en fonction de la concentration d'indium  $x$  et l'épaisseur  $d_1$ .

### 3.6.4 Puissance délivrée

Sur la figure (3.11) sont représentées les variations de la puissance délivrée en fonction de la tension pour différentes concentrations d'indium  $x$ . Ces courbes présentent des maximums correspondants aux puissances maximales  $P_{\max}$ .



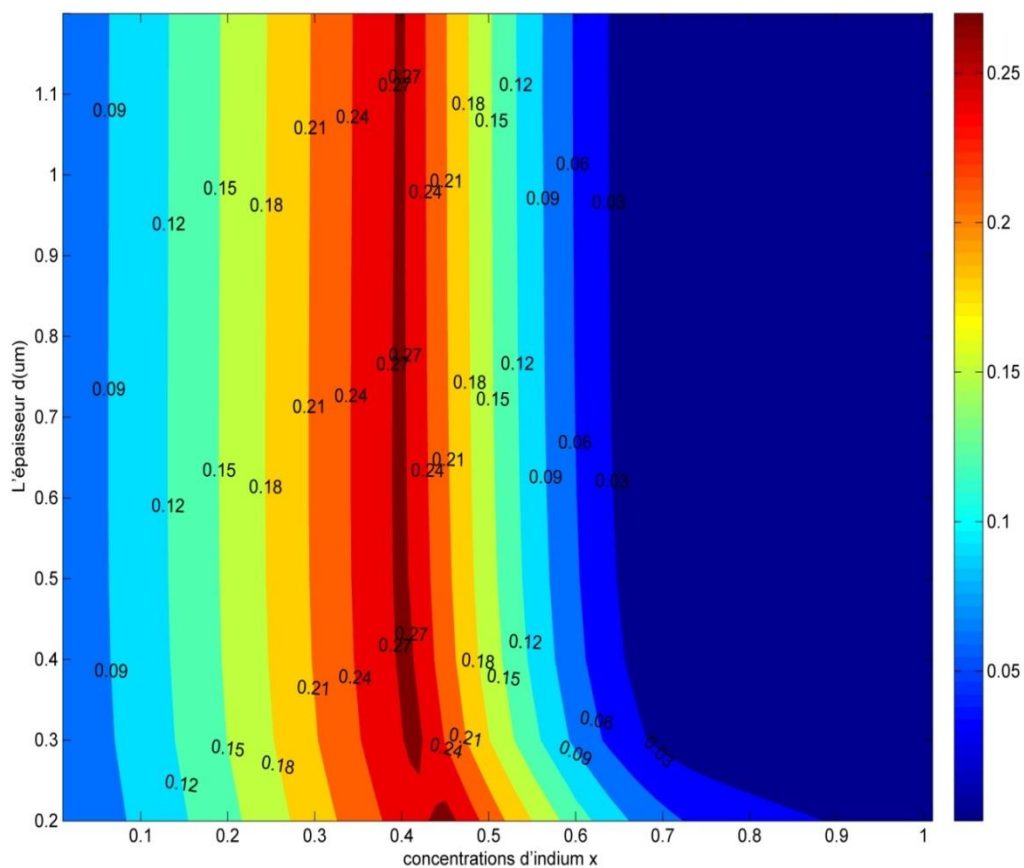
**Figure (3.11)** : puissance délivrée par la jonction Silicium pour plusieurs concentrations d'indium. ( $d_1=0,2 \mu\text{m}$ ,  $d_2=50 \mu\text{m}$ ).

La puissance diminue lorsque la concentration d'indium augmente due à la diminution du courant de court-circuit  $J_{cc}$  et de la tension de circuit-ouvert  $V_{co}$ .

### 3.7 Le rendement de conversion

#### 3.7.1 Rendement d'une cellule tandem

C'est le paramètre le plus important qui caractérise une cellule photovoltaïque, il est illustré dans la figure (3.12) qui présente la simulation du rendement de la structure étudiée en fonction de la concentration d'indium et de l'épaisseur  $d_1$ . Le rendement atteint une valeur maximale de 27% pour une concentration d'indium  $x=40\%$ .

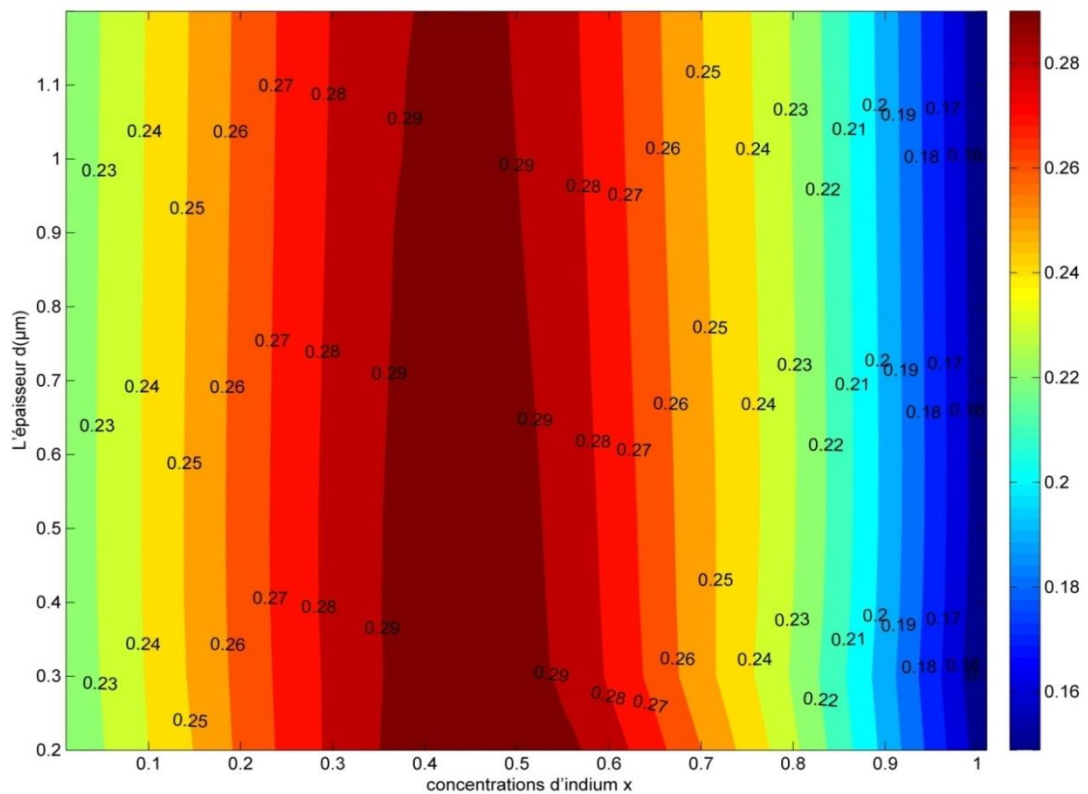


**Figure (3.12) :** Représentation du rendement pour une cellule tandem InGaN/Si en fonction de la concentration d'indium  $x$  et de l'épaisseur  $d$ .

Un rendement théorique de 27% est important pour une cellule solaire. Ce rendement résulte d'une unification des différents paramètres internes et externes, ainsi que des propriétés électriques et optiques du des matériaux InGaN et silicium.

### 3.7.2 Rendement d'une cellule cascade

C'est le paramètre le plus important qui caractérise une cellule photovoltaïque, il est illustré dans la figure (3.13) qui montre la variation du rendement de la structure étudiée en fonction de la concentration d'indium. Le rendement atteint une valeur maximale de 29%, pour une concentration d'indium  $x=40-50\%$ .



**Figure (3.13) :** Représentation du rendement d'une cellule cascade de la structure InGaN/Si en fonction de la concentration d'indium  $x$  et de l'épaisseur  $d$ .

On note que le rendement d'une cellule cascade est plus important que celui d'une cellule tandem.

### 3.8 Conclusion

Les performances optimales de la cellule solaire InGaN/Si ont été simulées en calculant le rendement avec différents paramètres de la structure : l'épaisseur et la concentration d'indium de la cellule du haut InGaN.

Les simulations réalisées dans ce chapitre montrent que pour une cellule à double jonctions InGaN/Si, le rendement maximum est de l'ordre de 27% en cellule tandem et 29% en cellule cascade.

Cette simulation va contribuer à la conception et la fabrication des cellules solaires double jonctions à base des matériaux InGaN et silicium pour des applications extraterrestres et terrestres.

# Liste des figures

	<b>Introduction Générale</b>
Figure (1) : Pénétration des énergies renouvelables dans la production nationale TWh.	2
<b>Chapitre 1</b>	
Figure (1.01) : Spectre solaire haute résolution.	9
Figure (1.2): Spectre électromagnétique.	10
Figure (1.3) : Composantes du rayonnement solaire.	12
Figure (1.4) : Différentes constantes d'illumination.	15
Figure (1.5) : Distribution spectrale de l'énergie solaire AM0 (bleu) et AM1.5 (rouge).	15
Figure (1.6) : L'irradiation spectrale (AM0, AM1.5G, corps noir) en fonction de la longueur d'onde.	17
Figure (1.7) : Tableau de Mendeleïev ou tableau périodique des éléments. L'InGaN est composé des éléments de la colonne IIIA et de l'azote N.	20
Figure (1.8) : Bande interdite de divers composés semi-conducteurs en fonction de leur paramètre de maille.	21
Figure (1.9) : Structure wurtzite selon plusieurs directions, exemple du GaN : (a) [0001], (b) [1120], (c) [1010].	23
Figure (1.10): Structure cubique zinc-blende selon différentes directions, exemple du GaN:(a) [100], (b) [110], (c) [111].	23
Figure (1.11) : Diagramme des énergies pour un matériau.	24
Figure (1.12) : Diagramme de la bande du GaN. Le maximum de la bande de valence est pris comme le 0 des énergies. Le gap d'énergie interdite correspond à la partie grisée.	27
Figure (1.13) : Diagramme de bande de l'InN. Le maximum de la bande de valence est pris comme le zéro des énergies. Le gap d'énergie interdite correspond à la partie grisée.	28
Figure (1.14): Schéma des chemins optiques au niveau d'un dioptre plan.	32

## Chapitre 2

Figure (2.1) : Structure et diagramme de bande d'une cellule photovoltaïque	41
Figure (2.2.a) : Image MEB de la surface d'une couche de silicium texturée en forme de pyramide	45
Figure (2.2.b) : structure de la cellule HIT à base de silicium avec une texturation de toutes ses couches	46
Figure (2.2.c) : structure de cellule PERL à base de silicium avec une texturation de pyramides inversées en face avant.	46
Figure (2.3) : schéma d'une cellule solaire avec la jonction PN, les électrodes, la couche antireflets, et une charge électrique.	48
Figure (2.4) : Structure d'une jonction InGaN éclairée.	48
Figure (2.5.a) : Caractéristique I(V) d'une cellule photovoltaïque.	53
Figure (2.5.b) : Le rendement en fonction du gap d'énergie.	57
Figure (2.6.a) : cellule tandem	59
Figure (2.6.b) : cellule cascade	60
Figure (2.6.c) : Recouvrement du spectre solaire par une cellule triple-jonctions avec $Eg_1$ , $Eg_2$ et $Eg_3$ les gaps de la cellule <i>top</i> , <i>middle</i> et <i>bottom</i> , respectivement ( $Eg_1 > Eg_2 > Eg_3$ ).	61
Figure (2.6.d) : Schéma d'une cellule triple-jonctions. La cellule <i>top</i> a un grand gap pour absorber les photons dans le bleu. La cellule <i>middle</i> à un gap dans le proche infrarouge, et la cellule <i>bottom</i> a un petit gap dans l'infrarouge pour capter les photons de petite énergie. Les cellules sont connectées entre elles par les jonctions tunnel.	62

### Chapitre 3

Figure (3.1) : Schéma de la structure simulée	65
Figure (3.2) : Le flux incident F en fonction de la longueur d'onde $\lambda$ à T = 6000 K.	66
Figure (3.3) : variation du coefficient d'absorption $\alpha$ en fonction de l'énergie des photons incidents E.	67
Figure (3.4) : Caractéristique courant-tension de la structure $In_xGa_{1-x}N$ pour plusieurs concentrations d'indium x : (d1=0,2 $\mu$ m).	68
Figure (3.5) : variation du courant de court-circuit Jcc en fonction de la concentration d'indium x et l'épaisseur d.	69
Figure (3.6): variation de la tension de circuit ouvert $V_{co}$ en fonction de la concentration d'indium x et l'épaisseur d.	70
Figure (3.7) : puissance délivrée par la jonction InGaN pour plusieurs concentrations d'indium. (d1=0,2 $\mu$ m).	71
Figure (3.8) : Caractéristique courant-tension Silicium pour plusieurs concentrations d'indium x : (d1=0,2 $\mu$ m, d2=50 $\mu$ m).	72
Figure (3.9) : variation du courant court-circuit Jcc en fonction de la concentration d'indium x et l'épaisseurs d.	74
Figure (3.10) : variation de la tension de circuit ouvert $V_{co}$ en fonction de la concentration d'indium x et l'épaisseur $d_1$ .	75
Figure (3.11) : puissance délivrée par la jonction Silicium pour plusieurs concentrations d'indium. (d1=0,2 $\mu$ m, d2=50 $\mu$ m).	76
Figure (3.12) : Représentation du rendement pour une cellule tandem InGaN/Si en fonction de la concentration d'indium x et de l'épaisseur d.	77
Figure (3.13) : Représentation du rendement d'une cellule cascade de la structure InGaN/Si en fonction de la concentration d'indium x et de l'épaisseur d.	78

# Liste des tableaux

## Introduction générale

Tableau (1) : Potentiel solaire en Algérie.	.....	1
---	-------	---

## Chapitre 1

Tableau (1.1) : Résumé des différentes distributions spectrales.	.....	16
--	-------	----

Tableau (1.2) : Paramètres structuraux a, c et u pour le GaN et l'InN.	.....	22
--	-------	----

Tableau (1.3) : Paramètres de la variation de la bande interdite en fonction de la température.	.....	35
---	-------	----

Tableau (1.4) : Propriétés électriques du silicium (Si).	.....	36
--	-------	----

Tableau (1.5) : Propriétés physiques du Si.	.....	37
---	-------	----

## Chapitre 3

Tableau (3.1) : Donnée de la structure simulée	.....	65
--	-------	----

## Listes des acronymes et abréviations

AM	Air mass (masse d'air)	
h	Constante de Planck	$4,136 \times 10^{-15} \text{ F.m}^{-1}$
$\lambda$	Longueur d'onde	$\mu\text{m}$
H	La densité de puissance des photons	
$\Phi$	Flux de photons	
$\Delta\lambda$	Les longueurs d'ondes du spectre	
E	L'énergie de photon incident	
v	Fréquence de la lumière	
R <sub>s</sub>	Rayon du soleil	
D	Distance soleil – terre	
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann	
V <sub>n</sub>	Potentiel dans le matériau N	
V <sub>p</sub>	Potentiel dans le matériau P	
K	La constante de Boltzmann	$8,617 \times 10^{-5} \text{ eV.K}^{-1}$
T	La température	
N <sub>i</sub>	La concentration de porteurs libres intrinsèques	$\text{cm}^{-3}$
P <sub>0</sub>	La concentration de trous à l'équilibre	
N <sub>d</sub>	La concentration de dopants donneurs ionisés dans le matériau N	
N <sub>a</sub>	La concentration de dopants accepteurs ionisés dans le matériau P	$\text{cm}^{-3}$
N <sub>c</sub>	Densité d'états au bord de la bande de conduction	$\text{cm}^{-3}$
N <sub>v</sub>	Densité d'états au bord de la bande de valence	$\text{cm}^{-3}$
V <sub>0</sub>	Le potentiel de diffusion	
V	Le potentiel de polarisation imposé aux bornes de la jonction	

I	Le courant de saturation
N	Le facteur d'idéalité
F	Flux des photons incidents
$S_n$	La vitesse de recombinaison de surface des électrons en excès à la Surface avant
$L_n$	Longueur de diffusion des électrons dans le matériau P
$D_n$	Le coefficient de diffusion des électrons
$S_p$	La vitesse de recombinaison de surface des trous en excès à la surface arrière
$L_p$	Longueur de diffusion des trous dans le matériau N
$D_p$	Le coefficient de diffusion des trous
$\lambda_{min}$	La longueur d'onde la plus petite
$\lambda_{max}$	La longueur d'onde la plus grande
$J_0$	Courant de saturation
$\tau_n$	Durée de vie des porteurs minoritaires pour les électrons
$\tau_p$	Durée de vie des porteurs minoritaires pour les trous
$P_i$	Puissance d'éclairement reçue par unité de surface
S	La surface de la cellule PV
b	Le paramètre de courbure
$\mu$	La mobilité des porteurs
$\sigma$	La section efficace de capture
v	La vitesse moyenne des porteurs libres
n	La densité d'électrons libres

$n_1$	Indice de réfraction de l'air
$n_2$	Indice de réfraction du matériau $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$
$\theta_1$	Angle de rayon lumineux par rapport à la normale
$\theta_2$	Angle de rayon lumineux par rapport à la normale
$I_r$	L'intensité réfléchie
$I_i$	L'intensité incidente
In	Indium
Ga	Gallium
N	Azote
x	La concentration de l'indium
$x_j$	Profondeur de la jonction
$B_c$	Bande de conduction
$B_v$	Bande de valence
$E_g$	Energie de la bande interdite
$E_c$	Energie de la bande de conduction
$E_v$	Energie de la bande de valence
$\Delta E_c$	Décalage de bande de conduction
$\Delta E_v$	Décalage de bande de valence
$\alpha$	Coefficient d'absorption
n	Indice de réfraction
R	Coefficient de réflexion
q	Charge élémentaire
k	Constante de Boltzmann

ZCE	Zone de charge d'espace
$J_n$	La densité de courant d'électrons
$J_p$	La densité courant de trous
$J_d$	La densité de courant photoélectrique
$J_{ph}$	Le photo-courant
$J_{tot}$	La densité de courant totale
$J_{obs}$	Le courant d'obscurité
$J_{cc}$	Densité de court-circuit
$V_{co}$	Tension de circuit ouvert
$V_m$	Tension maximale correspondant à Pmax
$I_m$	Courant maximale correspondant à Pmax
$I_{cc}$	Courant de court-circuit
FF	Facteur de forme
$\eta$	Rendement
$n_0$	La concentration d'électrons à l'équilibre
c	La vitesse de la lumière dans le vide 299 792 458 m. s <sup>-1</sup>

## Conclusion générale

---

En pratique, la conversion d'énergie lumineuse en énergie électrique n'est pas totale, différentes pertes viennent influencer le rendement d'une cellule. Elles sont dans la plus part des cas dues à la nature du matériau et à la technologie utilisée.

Tous les photons possédant une longueur d'onde supérieure à celle associée au gap du semi-conducteur ne peuvent générer de paires électron-trou, et sont donc perdus. Le rendement d'une cellule dépend aussi à la base du nombre de photons y pénétrant.

Le spectre solaire est un spectre très large pour être exploité par un seul semi-conducteur, de vastes recherches sont faites afin de trouver des matériaux à moins coût et avec des rendements maximales pour les différents technologies des cellules photovoltaïques.

Les objectifs tracés dans le cadre de notre travail consistent à étudier et simuler une structure photovoltaïque à base de matériaux silicium et InGaN, afin d'absorber le maximum du rayonnement solaire et de délivrer aussi un maximum d'énergie électrique.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté des généralités sur l'énergie solaire et ses caractéristiques. Les caractéristiques cristallines, électriques et optiques des matériaux InGaN et Silicium y sont présentées.

Dans le deuxième chapitre nous avons présenté la physique des cellules solaires à base des semi-conducteurs III-V afin de connaître leurs propriétés. Enfin nous avons abordé les différents facteurs de perte limitant le rendement de conversion.

## Conclusion générale

---

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté les résultats de nos simulations. Les simulations réalisées dans ce chapitre montrent que pour une cellule à double jonction, le rendement est maximum de l'ordre de 27% en cellule tandem et 29% en cellule cascade.

L'amélioration de ce travail peut être envisagée en considérant une cellule à trois jonctions en ajoutant une jonction InGaN avec une concentration d'indium adéquate qui permettrait d'améliorer le rendement.

# Bibliographie

---

Chapitre 2 :

- [1] A.Khelif : « Expérience, Potentiel et marché photovoltaïque Algérien » New Energy Algeria NEAL, 2010.
- [2] SONELGAZ : Programme national des énergies renouvelables, 2011.
- [3] Energie solaire photovoltaïque.doc / B. Flèche - D. Delagnes / juin 07
- [4] jcboulay.free.fr/astro/sommaire/astronomie/univers/galaxie/etoile/systeme\_solaire/soleil/page\_soleil.htm.
- [5] International Energy Agency (IEA). *Key World Energy Statistics*. Paris : Soregraph, 2011.
- [6] N.A.Sharp,NOAO/NSO/Kitt peak FTS/AURA/NSF
- [7] Color wave length table,[www.usbyte.com](http://www.usbyte.com) /common/ approximate\_wavelength.htm, 02/05/2007.
- [8] Faruk Kurker, " *Microfabrication based design and simlation of hétérojunction olar cell*", MSc Thesis. INAS, çukurova university, ADANA, 2010.
- [9] Energie solaire photovoltaïque.doc / B. Flèche - D. Delagnes / juin 07, Page 2
- [10] R.Bernard, G.Menguy, M.Schwartz, le rayonnement solaire, conversion thermique et application. thechnique et documentation, Paris, 1979.
- [11] D.R. di valdalerbo : 'La recherche énergétique européenne : pont de coopération sur la méditerranée'. Liaison énergie – francophonie, N°71 (énergie et développement durable en méditerranée) ,2em trimestre 2006, page 71-76
- [12] Energie solaire, les machines élévatoires, archives document FAO, dpt du développement durable
- [13] V.GORGE, "Caractérisation de matériaux et test de composants des cellules solaires à base des nitrures des éléments III-V", Thèse de doctorat, université paris-sud 11, 2012. (s.d.).

# Bibliographie

---

- [14] P.Michalopoulos, " A novel approach for the development and optimisation of state-of-the-art photovoltaic devices using Silvaco", Master's thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, California, 2002.
- [15] R Sekuler : Perception, New York, 1985.
- [16] [www.wikipedia.org/wiki/fichier:Mendeleïev.jpg](http://www.wikipedia.org/wiki/fichier:Mendeleïev.jpg).
- [17] Wu, J., et al. Small band gap bowing in  $In_{1-x}Ga_xN$  alloys. *Applied Physics Letters*. 2002, Vol. 80,4741.
- [18] Morkoç, H. *Handbook of Nitride Semiconductors and Devices*. Weinheim : WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2008. Vol. 1. 978-3-527-40837-5.
- [19] Yam, F.K. and Hassan, Z. InGaN : An overview of the growth kinetics, physical properties and emission mechanisms. *Superlattices and Microstructures*. 2008, Vol. 43, 1.
- [20] N.Grandjean, J.Massies. Les nitrides d'éléments III: des semiconducteurs singuliers? CRHEA, [www.CNRS.fr/publications/imagesdephysique/couv-pdf/IdP01.../07.pdf](http://www.CNRS.fr/publications/imagesdephysique/couv-pdf/IdP01.../07.pdf). (s.d.).
- [21] Bernardini, F., Fiorentini, V. and Vanderbilt, D. Spontaneous polarization and piezoelectric Communications. 11, 1972, 617.
- [22] A. Dussaigne, " Diodes électroluminescentes blanches monolithiques", thèse de doctorat, Université de Nice-Sophia Antipolis, 2005.
- [23] Wright, A.F. and Nelson, J.S. Explicit treatment of the gallium 3d electrons in GaN using the plane-wave pseudo potential method. *Physical Review B*. 1994, Vol. 50, 2159. [23]
- [24] Liu, L. and Edgar, J.H. Substrates for gallium nitride epitaxy. *Materials Science and Engineering R*. 2002, Vol. 37, 61.
- [25] V.GORGE, "Caractérisation de matériaux et test de composants des cellules solaires à base des nitrides des éléments III-V", Thèse de doctorat, université paris-sud 11, 2012. (s.d.).
- [26] Pousse, A., Atkins, P. and Jones, L. Chimie : molécules, matière, métamorphoses. 3ème édition.Paris : DeBoeck Université, 1998. p. 255 à 257. (s.d.).

## Bibliographie

---

- [27] Yam, F.K. and Hassan, Z. *InGaN : An overview of the growth kinetics, physical properties and emission mechanisms. Superlattices and Microstructures*. 2008, Vol. 43, 1.
- [28] Clàudio de Carvalho, L., Schleife, A. and Bechstedt, F. Influence of exchange and correlation on structural and electronic properties of AlN, GaN, and InN polytypes. *Physical Review B*. 2011, Vol. 84, 195105. (s.d.).
- [29] Vegard, L. *Z. Phys.* 1921, Vol. 5, 17. (s.d.).
- [30] Denton, A.R. and Ashcroft, N.W. Vegard's Law. *Physical Review A*. 1991, Vol. 43, 3161. (s.d.).
- [31] Katsikini, M., et al. Raman study of Mg, Si, O, and N implanted GaN. *Journal of Applied Physics*. 2003, Vol. 94, 4389. (s.d.).
- [32] Axon, H.J. and Hume-Rothery, W. *Proc. R. Soc. London A*. 1948, Vol. 1, A193. (s.d.). [33]
- [34] Ioffe Physico-Technical Institute. InN - Indium Nitride. *New Semiconductor Materials. Characteristics and properties.* [Online] [Cited: 12 13, 2011.] <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/InN/index.html>. (s.d.).
- [35] <http://www.goodfellow.com/csp/active/static/F/Silicium.html>
- [36] <http://membres.lycos.fr/procession/electronique/smcd06.pdf>.
- [37] Istophe DELERUE « Théorie des nanostructures de silicium » Mémoire présenté à l'université des Sciences et Technologies de Lille pour obtenir l'Habilitation à diriger des recherches.
- [38] <http://ipn2.epfl.ch/LNM/cours/solide/pres/9.pdf>  
2004/PhysSemi/Cours/Sem/node2.html
- [39] S. M. SZE, *Physics of Semiconductor Devices*, John Wiley & Sons, 1981.
- [40] M. Willander, H.L. Hartnagel, *High Temperature Electronics*, Chapman & Hall, London, 1997. ISBN: 0-412-62510-5.

# Bibliographie

---

[41] ] F.P. McCluskey et al, High Temperature Electronics, CRC Press, New York, 1997.

ISBN: 0-8493-9623-9

[42] S. Wolf. R. Tauber. "Silicon Processing for the VLSI Era (Lattice Press. Sunset Beach, California, 1986)".

Chapitre 2 :

[39] *H.Mathieu, "Physique des semiconducteurs et des composants électroniques", 2ème édition, Mas.*

[40] M.A Green :Progress and outlook for high-efficiency crystalline silicon solar cells, Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 65, 9,2001.

[41] C. Fklingshirn : Energy Materials and Solar Cells,2001.

[42] M.A Green : Solar Energy Materials and Solar ,Vol65,2001.

[43] [www.sanyosolar.eu/en/products/hit-nxxxse10/](http://www.sanyosolar.eu/en/products/hit-nxxxse10/).son 1990.

[44] [www.energiesdouce.com/conseils-faq-panneaux-solaires-photovoltaiques-faq](http://www.energiesdouce.com/conseils-faq-panneaux-solaires-photovoltaiques-faq).

[45] [www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/detailed-balance](http://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/detailed-balance).