



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET
POPULAIRE



MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID-TLEMCEN

FACULTE DES SCIENCES
UNITE DE RECHERCHE
MATERIAUX ET ENERGIES RENOUVELABLES

MEMOIRE DE MAGISTER
EN
PHYSIQUE ENERGETIQUE ET MATERIAUX

Thème

**Analyse, Modélisation et Simulation des Pertes dans un Module
Photovoltaïque à Base de Silicium Monocristallin**

Présente par : MOHAMED OULED SALEM

Mr N. CHABANE-SARI	<i>Professeur à l'université de Tlemcen</i>	Président
Mr A. CHEKNANE	<i>Maître de Conférences à l'université de Laghouat</i>	Directeur de Thèse
Mr B. BENYOUCEF	<i>Professeur à l'université de Tlemcen</i>	Examineur
Mr T. BENOUAZ	<i>Professeur à l'université de Tlemcen</i>	Examineur
Mr A. CHERMITTI	<i>Maître de Conférences à l'université de Tlemcen</i>	Examineur
Mr B. BOUAZZA	<i>Maître de Conférences à l'université de Tlemcen</i>	Invité

Année universite2009/2010

DEDICACES

Je dédie ce travail :

A mes parents

A toute ma famille

A tous ceux qu'ils me sont chers

A tous ceux qui utilisant la science pour le sien et la prospérité de l'humanité.

REMERCIEMENTS

Je remercie en premier lieu Dieu le Tout Puissant de nous avoir accordé la puissance et la volonté pour terminer ce travail.

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectuée à l'unité de recherche matériaux et énergies renouvelables(URMER), département de physique, faculté des sciences, université de Tlemcen.

Il m'est agréable d'exprimer ma profonde reconnaissance à Monsieur **ALI CHEKNANE**, maitre de conférences à l'université d'Amar Telidiji de LAGHOUTE pour ses encouragements, de son expérience dans l'orientation et la direction de ce travail.

Monsieur le professeur **N. CHABEN SARI**, Professeur à l'Université de TLEMCCEN, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire, je lui exprime mon respect et mes sincères remerciements.

Je formule mes sincères remerciements à Mr **B. BENYOUCEF** Professeur à l'Université de TLEMCCEN, de m'avoir honoré par sa présence au jury en tant que Co-encadreur.

J'adresse mes sincères remerciements à Mr **T. BENOUAZ** Professeur à l'Université de TLEMCCEN, de m'avoir honoré par sa présence au jury en tant qu'examinateur.

J'adresse mes sincères remerciements à Mr **A. CHERMITTI** maitre de conférences à l'Université de TLEMCCEN, de m'avoir honoré par sa présence au jury en tant qu'examinateur.

J'adresse mes sincères remerciements à Mr **B. BOUAZZA** maitre de conférences à l'Université de TLEMCCEN, de m'avoir honoré par sa présence au jury en tant qu'invité.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	2
-----------------------------	---

CHAPITRE I

GENERALITES SUE LES SYSTEMES

PHOTOVOLTAIQUES

I-1-Introduction.....	5
I.2. La conversion photovoltaïque.....	5
I.2.1. Principe de la conversion photovoltaïque.....	5
I.3.La cellule photovoltaïque.....	6
I.3.1. Fonctionnement de la cellule photovoltaïque a base de silicium.....	6
I.4. la modélisation d'une cellule.....	9
I.5. caractéristique $I=f(V)$ d'une cellule solaire.....	12
I.6. Paramètres essentiels caractérisant une cellule solaire.....	13
I-7- réponse spectrale.....	15
I-8-Spectre solaire.....	16
I-9- Groupements des cellules	17
I-10-Module photovoltaïque.....	22
I-10-1-Rendement d'un module	23
I-10-2-Nombre de cellule par module.....	23
I-10-3-Encapsulation et encadrement	24
I-14-conclusion.....	26

CHAPITRE II

Outils de Simulation numérique du comportement d'une photopile

II-1-Introduction.....	28
II-2-Logiciel de simulation.....	28
II-3-Outils de simulation d'une photopile.....	29
II-4-Paramètres de simulation.....	33
II-5-Résultats de la simulation	34
II-5-1-Caractéristique I-V	34
II-5-2-Influence de la température.....	35
II-5-3-Influence de l'éclairement.....	36
II-6-Conclusion.....	37

CHAPITRE III

Modélisation et simulation des pertes dans un module photovoltaïque

III-1-INTRODUCTION.....	39
III-2- PERTES FONDEMANTELES.....	39
III-2-1 -Pertes par Photons de grande longueur d'onde du spectre solaire.....	39
III2-2- Pertes par énergie excédentaire des photons.....	42
III-2-3- Facteur de tension.....	44
III-3-PERTES TECHNOLOGIQUES.....	45
III-3-1-Réflexion.....	45
III3-2-Absorption partielle due à l'épaisseur limitée de la cellule.....	48
III3-3- Collection partielle.....	50
III-4-PERTES HOMIQUE.....	52
III.4.1- Résistance série R_s	53
III.4.1.1-Modélisation de perte par résistance série.....	53
III.4.1.2-Perte de puissance max due à la résistance série.....	55
III.4.1.3-Influence de résistance série dans différentes connexions.....	57
III.4.2- Résistance parallèle R_p	62
III.4.2.1-Détermination de la résistance parallèle.....	62
III.4.2.2-La puissance perdue par la résistance parallèle.....	63
III.4.2.3-Influence de résistance shunt dans différentes connexions.....	65
III-5-Le rendement en fonction des différents facteurs pertes.....	71
III-6-Pertes par l'encapsulation.....	72
III-6-1-Pertes par verre.....	72

III-6-2-Pertes par résine.....	74
III-7-ombrage.....	75
III-7-1-Taux d'ombre due aux pertes causées par la métallisation du module.....	75
III-7-2- Pertes par ombrage causées par environnement	78
III-8-Conclusion	82
Conclusion générale et perspectives	84

BIBLIOGRAPHIE

Références bibliographie.....	87
Liste de symboles.....	90

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Le développement de l'exploitation des énergies renouvelables a connu une forte croissance ces dernières années. La production d'électricité par des sources d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant les normes écologiques. Le soleil est une source d'énergie renouvelable inépuisable. L'énergie solaire reçue à la surface de la terre varie, par m^2 , de 1100KWh à 2300KWh/an (au total $720 \cdot 10^5$ KWh).

L'effet photovoltaïque a été découvert en 1839 par Alexandre Edmond Becquerel, qui a démontré qu'il s'agissait d'une conversion directe de la lumière en énergie électrique. A cette époque, les appareils électriques n'existaient pas encore donc il n'y avait pas d'utilisation pratique de cette découverte.

En 1905, Albert Einstein a écrit que la lumière pouvait entrer à l'intérieur des atomes, et que la collision entre les photons et les atomes pouvait faire sortir des électrons de leurs orbites et permettre la création d'un courant électrique.

Il faut attendre le XX^{ème} siècle pour voir se développer aux États-Unis une série de travaux et de réalisations se rapportant à l'énergie solaire. Les laboratoires de Bell Telephone (États-Unis) vont en 1954 mettre au point la première cellule photovoltaïque de rendement acceptable (environ 6%) [9]. Ce rendement sera par la suite augmenté grâce à la découverte selon laquelle, la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des impuretés, et atteindra, de ce fait, 15% au début des années 1960.

Au cours de ces dernières années, des améliorations considérables concernant les performances des cellules solaires ont permis d'aboutir à des rendements de conversion photovoltaïque respectivement de 24.8 % et de 23 % pour des cellules solaires à base d'arsenic de gallium et de silicium, sous la condition d'éclairement du soleil.

Le rendement élevé des cellules solaires à base de silicium a pour origine de minimiser les pertes (pertes par les photons de grande longueur d'onde du spectre solaire, pertes par énergie excédentaires des photons, Facteur de Tension, Réflexion, absorption incomplète, résistance série, résistance parallèle,...).

Durant ces dernières années, les chercheurs se sont orientés vers la simulation à cause des coûts élevés de l'expérimentation (méthodes d'élaboration et techniques de fabrication).

La simulation des cellules solaires à l'aide de différents simulateurs consiste à comprendre leur comportement. Matlab est l'un de ces simulateurs et est un langage simple et très efficace. Il est beaucoup plus concis que les "vieux" langages (C, Pascal, Fortran, Basic). Associé à Simulink qui est un outil pour la modélisation, l'analyse et la simulation d'une

large variété de systèmes physiques et mathématiques, Matlab permet, entre autre, la visualisation des paramètres qui influencent le comportement des cellules solaires.

Dans ce cas, l'objectif essentiel est l'accroissement du rendement. Ceci explique et justifie les recherches concernant l'étude des programmes numériques de conception, de modélisation et de simulation. Dans cet objectif, ce travail est abordé selon les chapitres suivants :

Dans un premier chapitre, nous rappelons quelques notions fondamentales nécessaires des systèmes photovoltaïques. Puis, nous montrons les déséquilibres dans différents types de groupement des cellules solaires dans le module photovoltaïque.

Le deuxième chapitre est consacré à la simulation numérique du comportement d'une cellule photovoltaïque à base de silicium monocristallin.

Dans le troisième chapitre, nous présentons la caractérisation et la modélisation des différents types des pertes dans une cellule solaire et les effets des différentes pertes sur les performances de la cellule. Nous simulons les pertes dans le module photovoltaïque qui se produisent à la suite de l'interconnexion et de l'encapsulation de ces cellules dans le module par MATLAB/Simulink. Les résultats obtenus ainsi sont commentés et comparés aux valeurs expérimentales dans la littérature.

Enfin, des conclusions sont tirées tout comme sont formulées quelques perspectives d'avenir.

CHAPITRE I
GENERALITES SUR LES SYSTEMES
PHOTOVOLTAIQUES

I.1-INTRODUCTION

L'énergie solaire photovoltaïque convertit directement le rayonnement lumineux en électricité. Elle utilise pour cela des modules photovoltaïques composés de cellules solaires ou de photopiles qui réalisent cette transformation d'énergie.

L'utilisation des modules photovoltaïques comme source d'énergie électrique a fait apparaître le besoin d'étudier ces systèmes afin de les optimiser.

Dans ce chapitre, nous présentons des généralités sur les systèmes photovoltaïques.

I.2- LA CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE

I.2.1-Principe de la conversion photovoltaïque :

Le mot « photovoltaïque » vient du grec « photos » qui signifie lumière et de « Volta » du nom du physicien italien qui en 1800 découvrit la pile électrique [32].

L'effet photovoltaïque a été découvert par E. Becquerel en 1839[33].il découvrit que certains matériaux délivreraient une petite quantité d'électricité quand ils étaient exposés à la lumière. Albert Einstein explique le phénomène photoélectrique en 1912, mais il fallut attendre le début des années 50 pour sa mise en application pratique dans la réalisation d'une cellule PV en silicium d'un rendement de 4,5% [10].

La conversion de l'énergie solaire en énergie électrique repose sur l'effet photoélectrique, c'est-à-dire sur la capacité des photons à créer des porteurs de charge électrons et trous, dans un matériau. Lorsqu'on illumine un semi-conducteur avec un rayonnement de longueur d'onde appropriée (l'énergie des photons doit être au moins égale à celle du gap énergétique du matériau), l'énergie des photons absorbés permet des transitions électroniques depuis la bande de valence vers la bande de conduction du semiconducteur, créant ainsi des paires électron-trou, qui peuvent contribuer au transport du courant par le matériau lorsqu'on le polarise.

Si on illumine une jonction PN (dispositif dans lequel le dopage du semiconducteur passe brusquement d'un type P à un type N), les paires électron-trou qui sont créées dans la zone de charge d'espace de la jonction sont immédiatement séparées par le champ électrique qui règne dans cette région, et entraînées dans les zones neutres de chaque côté de la jonction. Si le dispositif est isolé, il apparaît une différence de potentiel aux bornes de la jonction ; s'il est connecté à une charge électrique extérieure, on observe le passage d'un courant alors qu'on

n'applique aucune tension au dispositif. C'est le principe de base d'une cellule photovoltaïque.

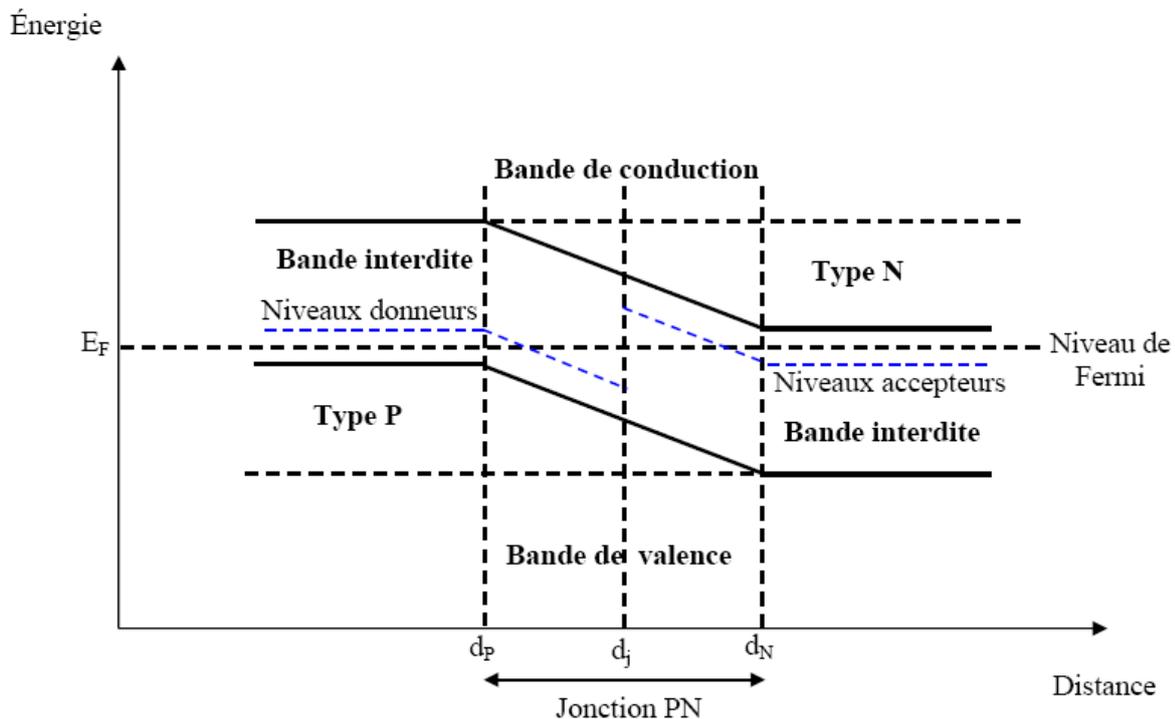


Figure (I-1) : Diagrammes de bandes d'énergie au voisinage de la jonction [3]

I.3-La cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et du vieillissement de la cellule [14].

I.3.1- Fonctionnement de la cellule photovoltaïque a base de silicium [34]

La cellule photovoltaïque est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique.

La couche supérieure de la cellule est composée de silicium dopé par un élément de valence supérieure dans la classification périodique, c'est-à-dire qui possède plus d'électrons sur sa couche de valence que le silicium. Le silicium possède 4 électrons sur sa couche de valence on peut donc utiliser des éléments de la colonne 15, par exemple le Phosphore (P). Cette

couche possédera donc en moyenne une quantité d'électrons supérieure à une couche de silicium pur. Il s'agit d'un semi-conducteur de type N.

La couche inférieure de la cellule est composée de silicium dopé par un élément de valence inférieure au silicium. Il peut s'agir de Bore (B) ou d'un autre élément de la colonne 13. Cette couche possédera donc en moyenne une quantité d'électrons inférieure à une couche de silicium pur. Il s'agit d'un semi-conducteur de type P.

Lorsqu'on met ces deux semi-conducteurs en contact (de manière à ce qu'il puisse y avoir conduction), on crée une jonction PN, qui doit permettre le passage des électrons entre les deux plaques. Cependant, dans le cas d'une cellule photovoltaïque, le gap du semi-conducteur de type N est calculé de manière à ce que le courant ne puisse pas s'établir seul : il faut qu'il y ait un apport d'énergie, sous forme d'un photon de lumière, pour qu'un électron de la couche N soit arraché et vienne se placer dans la couche P, créant ainsi une modification de la répartition de la charge globale dans l'édifice. Cette valeur seuil est propre à chaque matériau semi-conducteur et va de 1,0 à 1,8 eV pour les applications photovoltaïques. Elle est de 1,1 eV pour le silicium cristallin [35].

Deux électrodes sont placées, l'une au niveau de la couche supérieure et l'autre au niveau de la couche inférieure : une différence de potentiel électrique et un courant électrique sont créés.

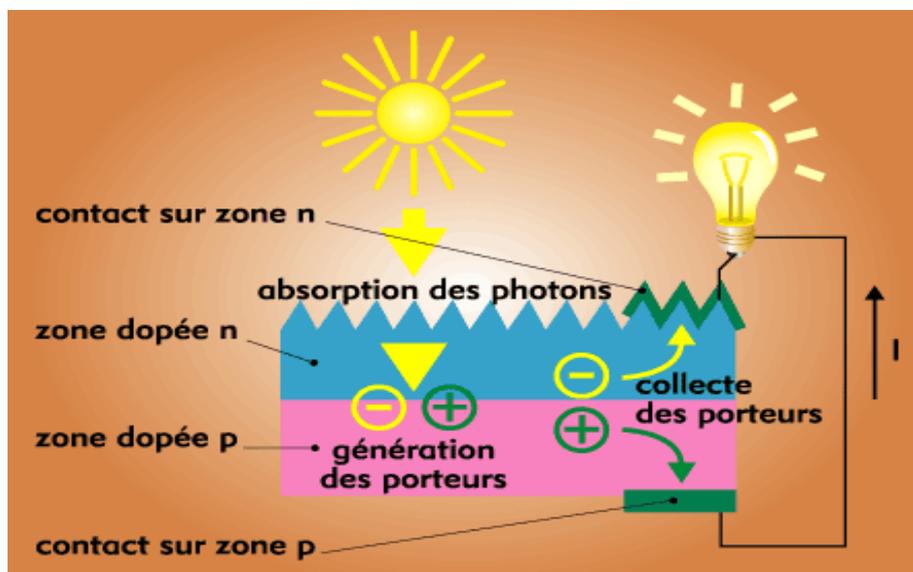


Figure (I.2) : description d'une cellule photovoltaïque [28]

Il existe trois types principaux de cellules [25]:

1- Les cellules monocristallines.

C'est la première génération des photopiles. elle s'approche le plus du modèle théorique , ces cellules sont effectivement composée d'un seul cristal divise en deux couches.les matériaux de base pour de telles cellules ont de nombreux cristaux de silicium spécialement produits à cet effet , d'une taille d'environ de 10cm .ces cristaux sont ensuite scies en plaques ultrafines, dopées est connectées .les cellules monocristallines actuelles permettent d'obtenir des rendement élevés ,de l'ordre de 15 à 20% (le rendement théorique maximal pour des cellules au silicium est de l'ordre de 40%)[18] .

Ces cellules souffrent néanmoins des inconvénients:

- Méthode de production laborieuse et difficile, et donc, très chère.
- Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir un cristal pur.
- Une durée d'amortissement de l'investissement en énergie élevée (jusqu'à 7 ans).



Figure (I-3) : Une cellule photovoltaïque monocristalline [18]

2- Les cellules poly-cristallines

Coût de production moins élevé.

Procédé moins gourmand en énergie.

Rendement de 13 % et jusqu'à 20 % en labo.

3- Les cellules amorphes

- Coût de production bien plus bas.
- Rendement de seulement 6 % par module et de 14 % en labo.

I.4- LA MODELISATION D'UNE CELLULE SOLAIRE**a- Cas idéal**

L'équation caractéristique d'une cellule solaire idéale est de la forme :

$$I = I_{CC} - I_D = I_{CC} - I_0 \left(e^{\frac{qV}{KT}} - 1 \right) \quad (\text{I-1})$$

Le circuit électrique équivalent correspondant à une cellule solaire est :

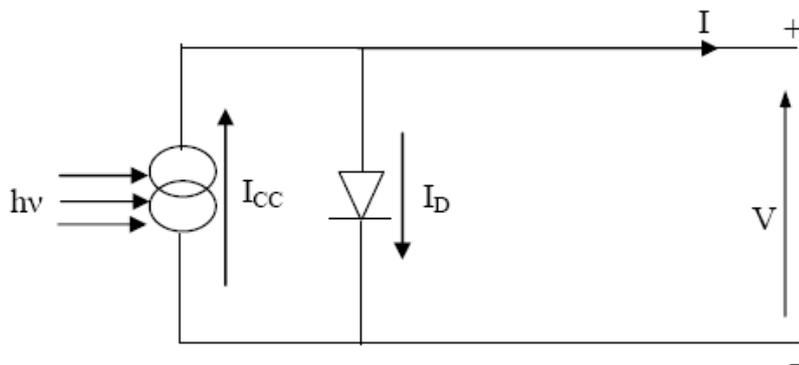


Figure (I- 4) : Cellule solaire idéale

I, V : Courant et tension fournis par la cellule.

I_D : Courant de diode donnée par 2 [16]:

$$I_D = I_0 (\exp (qV /KT)-1) \quad (\text{I-2})$$

b- Cas réel :

La performance d'une cellule solaire est limitée par l'influence de deux phénomènes physiques assimilables à deux résistances (R_S et R_P) .

- R_S : Résistance série, due essentiellement aux pertes par effets Joule à travers les grilles de collectes et la résistance propre des semi conducteurs, ainsi qu'aux mauvais contacts (Semi conducteur, électrodes).

- R_P : Résistance parallèle, dite 'Shunt', provient des pertes par recombinaisons dues essentiellement à l'épaisseur, aux effets de surface, ainsi qu'à la non idéalité de la jonction.

R_S et R_P modifient le courant de court-circuit de la cellule en photo- courant I_{Ph} , on aura donc le montage électrique équivalent suivant :

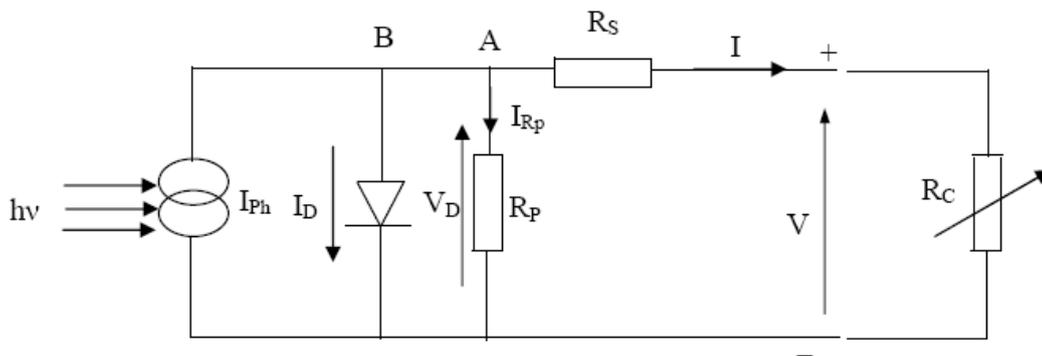


Figure (I- 5) : circuit équivalent d'une cellule solaire réelle

Appliquons la loi de Kirchoff aux noeuds A, B :

$$I = I_{ph} - I_D - I_{Rp} \quad (I-3)$$

Le courant I débité par la cellule est la somme algébrique de trois courant :

I_{Ph} : photo courant indépendant de V (ou de R_S), il est proportionnel au flux incident (taux de génération- recombinaison) et aux longueurs de diffusion des porteurs :

$$I = qg (L_n + L_p) \quad (I-4)$$

I_{R_p} : courant traversant R_p , si R_p est très grande, il devient très faible et est indépendant de la tension:

$$I_{RP} = \frac{V_D}{R_p} = \frac{V + R_S I}{R_p} \quad (I-5)$$

$$V_D = R_p I_{RP} = V + R_S I \quad (I-6)$$

I_D : Courant diode, il est de même ordre de grandeur que I_{R_p} pour les faibles tensions et il devient très grand au voisinage de V_{CO} , il s'écrit sous la forme 2 :

$$I_D = I_O \left(e^{\frac{qV_D}{AKT}} - 1 \right) \quad (I-7)$$

Remplaçons dans (I-3) les équations (I-4), (I-5) et (I-7), l'équation caractéristique deviendra :

$$I = I_{PH} - I_O \left(e^{\frac{qV}{AKT}(V+R_S I)} - 1 \right) - \frac{V + R_S I}{R_p} \quad (I-8)$$

A : c'est un paramètre qui indique le degré d'idéalité, il nous renseigne sur l'origine des mécanismes de courant circulant dans la diode. ce facteur a une valeur comprise entre 1 et 2, si A=1 le mécanisme qui l'emporte est la diffusion. par contre si A=2 il s'agit de la recombinaison des porteurs. Pour les cellules actuellement commercialisées au Silicium, on prend A=1[15].

La représentation graphique $I = f(V)$ de l'équation (I-9) est [3] :

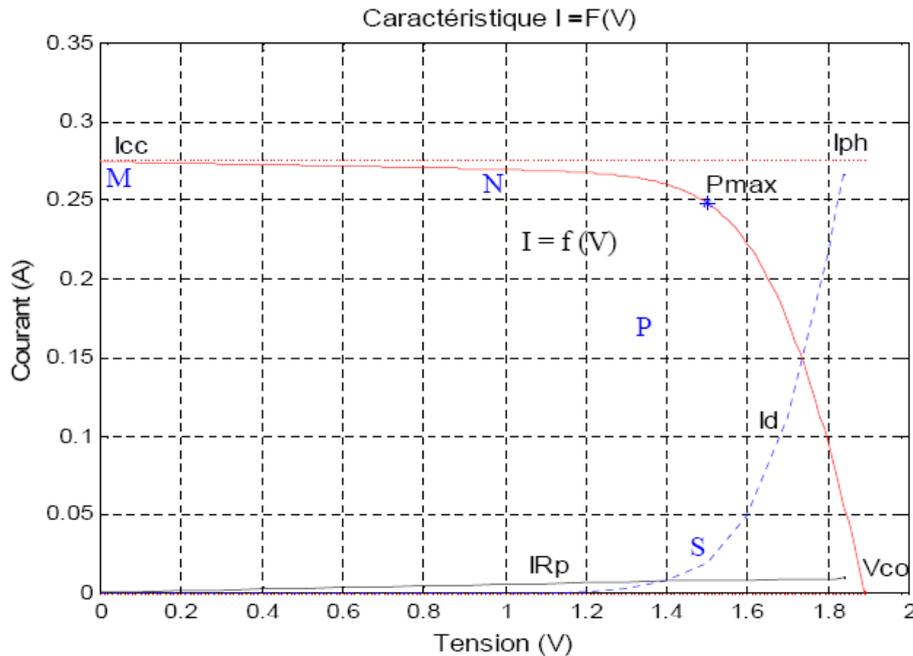


Figure (I- 6) : Caractéristique d'une cellule solaire

I.5- CARACTERISTIQUE $I=f(V)$ D'UNE CELLULE SOLAIRE :

La caractéristique $I=f(V)$ représente la courbe de puissance, sachant que le courant généré est donné par la formule (I-9) et que la cellule fonctionne sous un éclairage fixe Φ et une température constante T . Le fonctionnement du module est caractérisé essentiellement par trois zones :

Zone MN : le courant I est donné presque constant la cellule se comporte comme un générateur de courant (pratiquement constant de valeur voisine de I_{CC}). Le fonctionnement de la cellule dans cette zone donne des puissances faibles, des courants élevés et des tensions petites.

Zone PS : région correspondante aux valeurs élevées de R_C . La cellule se comporte comme un générateur de tension en circuit ouvert V_{CO} . Le fonctionnement de la cellule dans cette zone donne des puissances faibles, des courants petits et des tensions élevées.

Zone NP : le fonctionnement de la cellule dans cette zone donne des puissances élevées, des courants et des tensions acceptables.

I.6-PARAMETRES CARACTERISTIQUES D'UNE CELLULE SOLAIRE

Ces paramètres sont caractérisés par ceux des modules constituant le champ PV [1,21] :

I.6.1-Courant de court circuit I_{CC} :

Si les deux électrodes sont en court-circuit à travers un ampèremètre, les électrons drainés par un champ interne de la jonction vont donner naissance à un courant de court-circuit I_{CC} qui correspond au photocourant I_{ph} généré par le rayonnement. Pour une distribution spectrale donnée, ce photocourant est proportionnel à l'irradiation du rayonnement incident et à la surface active de captation. Il définit la quantité de paire électron-trou générée G qui traverse la jonction sans recombinaison entre les longueurs de diffusion L_n et L_p :

Il est obtenu pour une tension de sortie nulle :

$$I_{CC} = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{qR_S I_{CC}}{KT}} - 1 \right] - \frac{R_S I_{CC}}{R_P} \quad (I-9)$$

Dans le cas d'une cellule idéale ($R_S \rightarrow 0$ et $R_P \rightarrow \infty$)

$$I_{CC} = I_{ph} = qg(L_n + L_p) \quad (I-10)$$

Tenant compte de l'effet des résistances R_S et R_P ; le courant de court-circuit varie en fonction de ces deux résistances et est proportionnel au flux incident.

I.6.2- Tension en circuit ouvert V_{CO} :

Si la cellule est laissée en circuit ouvert, les porteurs générés par le rayonnement et séparés par le champ interne vont s'accumuler de part et d'autre de la jonction, induisant une autopolarisation de la jonction dans le sens passant. Cette autopolarisation induit un courant de diode dans le sens direct égal et opposé au photocourant. La tension alors mesurée aux bornes des électrodes est appelée tension de circuit ouvert V_{CO} . C'est la tension qu'il faudrait appliquer à la diode dans le sens passant pour générer un courant égal au photocourant,

Elle est obtenue pour un courant de sortie nul à partir de l'équation (I-9).

$$0 = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{qV_{CO}}{AKT}} - 1 \right] - \frac{V_{CO}}{R_P} \quad (I-11)$$

Dans le cas d'une cellule idéale ($R_S \rightarrow 0$, $R_P \rightarrow \infty$, $I_{ph} = I_{cc}$ et $A=1$)

$$V_{CO} = \frac{nkT}{q} \log \left[1 + \frac{I_{CO}}{I_0} \right] \quad (I-12)$$

V_{CO} augmente quand I_0 diminue, elle ne dépend que de la nature du cristal et de la jonction.

I.6.3- Facteur de forme FF :

Le facteur de forme représente l'efficacité de la cellule, il peut nous renseigner sur le vieillissement de la cellule. C'est le rapport entre la puissance maximale que peut fournir une cellule et la puissance qu'il est théoriquement possible d'obtenir (puissance optimale).

$$FF = \frac{P_{\max}}{P_{opt}} = \frac{I_m \cdot V_m}{I_{CC} \cdot V_{CO}} \quad (I-13)$$

Il caractérise l'influence mixte des résistances série et parallèle sur la caractéristique

$I = f(V)$. Sa valeur maximale est d'ordre de 0.82 pour une bonne cellule au Si.

I.6.4-Point de puissance maximale P_m :

L'utilisation optimale d'une photopile consiste à faire fonctionner une charge sous la tension maximale et à un courant maximal.

En effet, suivant la formule $P=V.I$, pour que P soit maximal : il faut être dans les conditions où le produit $V.I$ est maximale, c'est le point de charge idéal de la photopile, ou point de puissance maximale P_m [4].

I.6.5- Rendement énergétique maximum η_m :

Le rendement de conversion d'énergie est le rapport de la puissance générée et de la puissance du rayonnement solaire incident P_o . On appelle rendement maximal le rapport de la puissance maximale fournie (P_{max}) sur la puissance du rayonnement solaire incident (P_i) :

$$\eta_m = \frac{P_{max}}{P_i} = \frac{I_m \cdot V_m}{\phi \cdot S} \quad (I-14)$$

S : Surface de la cellule solaire.

ϕ : Flux incident.

(I_m, V_m) : Coordonnées du point de fonctionnement.

I.7-REPONSE SPECTRALE

La réponse spectrale est la valeur du courant de court-circuit I_{cc} de la cellule par unité de flux monochromatique incident.

$$R_s(\lambda) = \frac{I_{CC}(\lambda)}{P_g(\lambda)} \quad (I-15)$$

où $R_s(\lambda)$ est la réponse spectrale, exprimée en A/W; $P_g(\lambda)$ l'éclairement monochromatique global, exprimé en W/m² et $I_{cc}(\lambda)$ désigne le courant de court-circuit, exprimé en A/cm². La réponse spectrale interne est la valeur du courant de court-circuit de la cellule, par unité de flux monochromatique traversant la surface de la cellule.

$$R_{\text{sin } t}(\lambda) = \frac{I_{CC}(\lambda)}{P_g(\lambda)(1 - R(\lambda))} \quad (I-16)$$

Où $R(\lambda)$ est le coefficient de réflexion du silicium

Le photo courant collecté à chaque longueur d'onde relative au nombre de photons incidents sur la surface à cette même longueur d'onde détermine la réponse spectrale du dispositif [39].

I.8- SPECTRE SOLAIRE

Le spectre du soleil c'est sa décomposition en longueur d'onde .la lumière solaire est en effet composée de toutes sortes de rayonnements de couleurs différentes, caractérisées par leur gamme de longueur d'onde .les photons, grains de lumière qui composent ce rayonnement électromagnétique, sont porteurs d'une énergie qui est reliée à leur longueur d'onde par la relation :

Une courbe standard de la répartition spéciale du rayonnement solaire extraterrestre, compilée selon les données par les satellites est désignée sous le nom de AMO.sa distribution en énergie est répartie comme suit [13]:

Ultraviolet UV	$0,2 < \lambda < 0,38 \mu\text{m}$	6,4%
Visible	$0,38 < \lambda < 0,78 \mu\text{m}$	48%
Infrarouge IR	$0,78 < \lambda < 10 \mu\text{m}$	45,6%

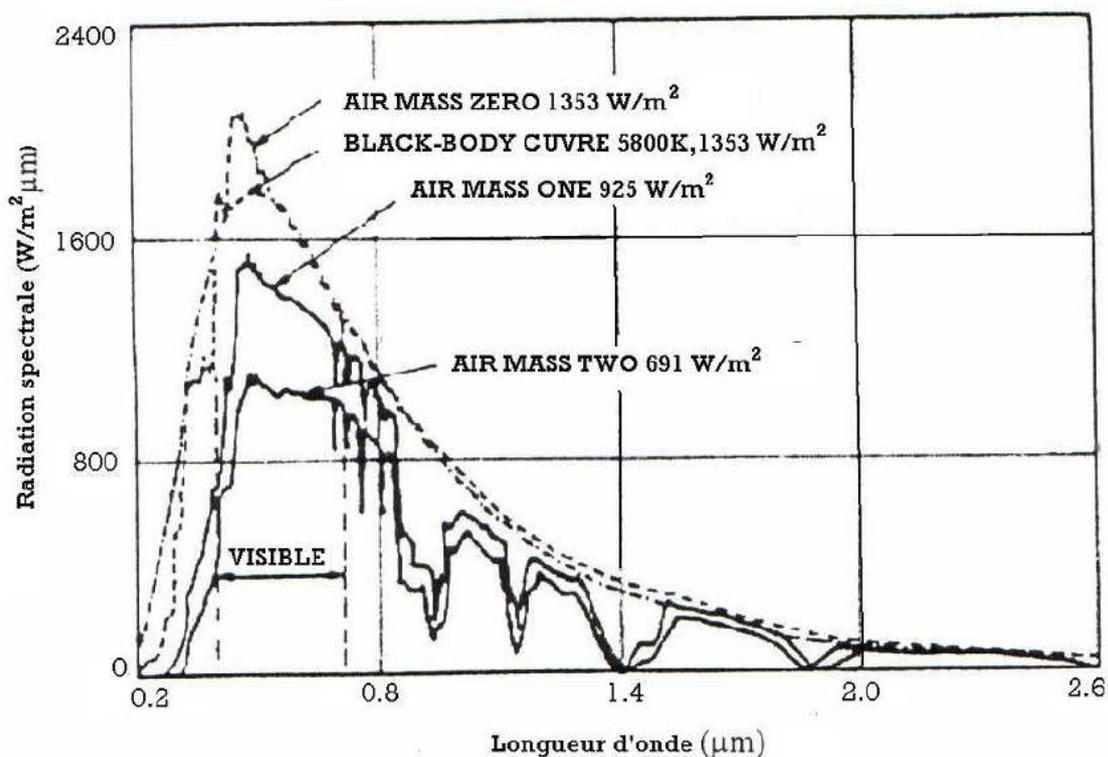


Figure (I-7) : Radiation spectrale pour différents air masses

Lorsqu'une cellule PV est soumise au rayonnement solaire, seule une partie du rayonnement solaire sera transformée en électricité. la cellule n'est sensible qu'à une partie du rayonnement solaire - celle comprise entre 0,35 et 1,1 microns - partie du rayonnement solaire

essentiellement visible, et une partie du rayonnement ultraviolet (de 0,35 à 0,4 μm) et du rayonnement infrarouge (de 0,7 à 1,1 μm)[37].

I.9- GROUPEMENT DES CELLULES SOLAIRES [3]:

La modélisation des parties de l'installation photovoltaïque, nous conduit à déterminer le fonctionnement du système à chaque heure de la journée et de l'année. La puissance débitée à l'utilisation est en fonction des caractéristiques des éléments du système, des données météorologiques (éclairage solaire et la température). A cet effet, la modélisation est nécessaire pour établir une relation directe entre l'énergie produite par l'installation et la demande de l'utilisation. Tandis que l'estimation des propriétés d'adaptation du système à chaque période de l'année, obtenue de l'étude théorique et expérimentale.

I.9.1- Groupement série des cellules solaires :

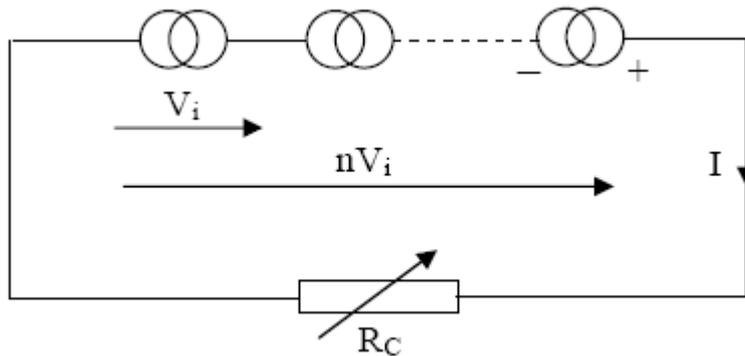


Figure (I-8) : Branchement en série de n cellules identiques.

Pour n cellules identiques, la tension V' et le courant I' fournis à la charge R_C sont :

$$I' = I \quad \text{et} \quad V' = \sum_{i=1}^n V_i = n.V_i \quad (\text{I-16})$$

La caractéristique de n cellules groupées en série est donnée par l'équation suivante :

$$I' = I_{PH} - I_0 \left(e^{\frac{qV}{n.AKT} (V' + R_{Se}I)} - 1 \right) - \frac{V' + R_{Se}I}{R_{Pe}}$$

(I-17)

Avec $R_{Se} = n.R_S$ et $R_{Pe} = n.R_P$

Si $R_S \rightarrow 0$ $R_P \rightarrow \infty$ les quatre grandeurs caractéristiques du groupement sont :

- _ La tension en circuit ouvert V'_{co} : $V'_{co} = n. V_{co}$
- _ Le courant de court circuit I'_{cc} : $I'_{cc} = I_{cc}$
- _ Le facteur de forme FF' : $FF' = FF$
- _ Le rendement η' : $\eta' = \eta$

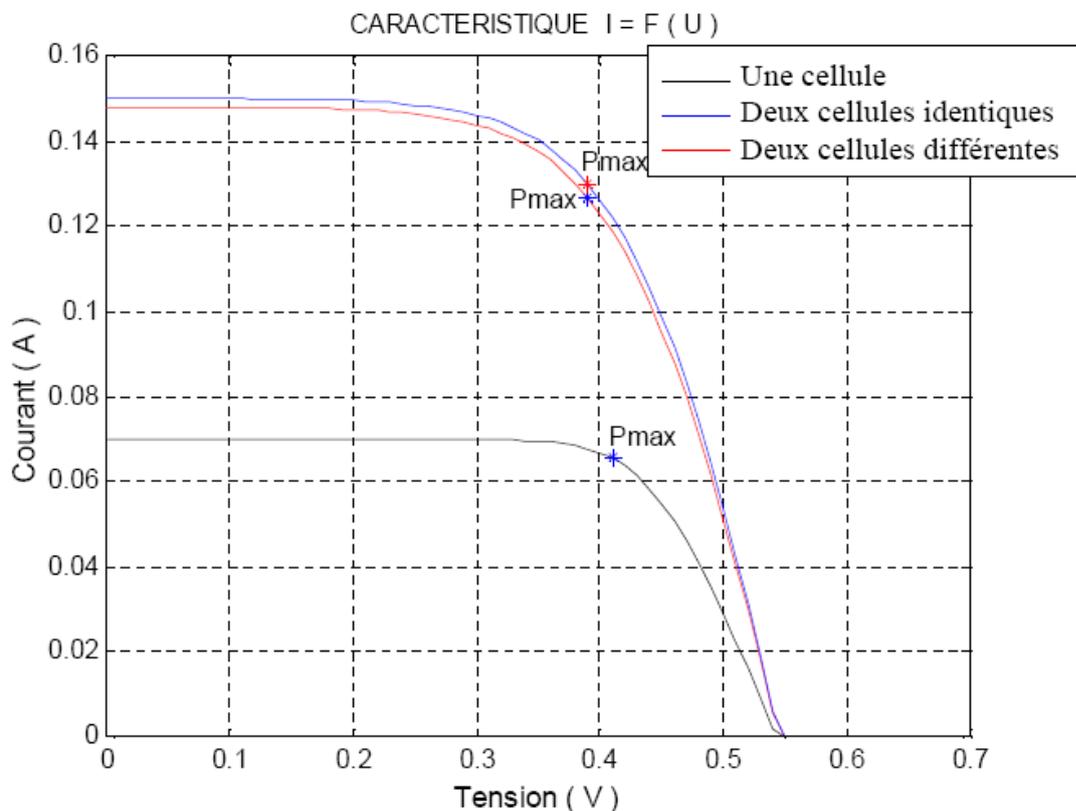


Figure (I-9) : Une cellule de $I_{cc} = 0.07$ A, $V_{co} = 0.55$ volt est montée en parallèle avec :

- a- Une cellule : $I_{cc2} = 0.09$ (A) même $V_{co} = 0.55$ volt
- b- Une cellule : $V_{co} = 0.6$ volt

Si une ou plusieurs cellules non identiques sont introduites dans un branchement en série, le courant le plus faible généré par les n cellules sera imposé à l'ensemble ; la tension du système sera la somme des n tensions pour les mêmes conditions d'éclairement et de

température, l'introduction d'une cellule non identique conduit à une diminution de la puissance maximale du système et par conséquent à une réduction du rendement.

I.9.2- Groupement parallèle des cellules solaires

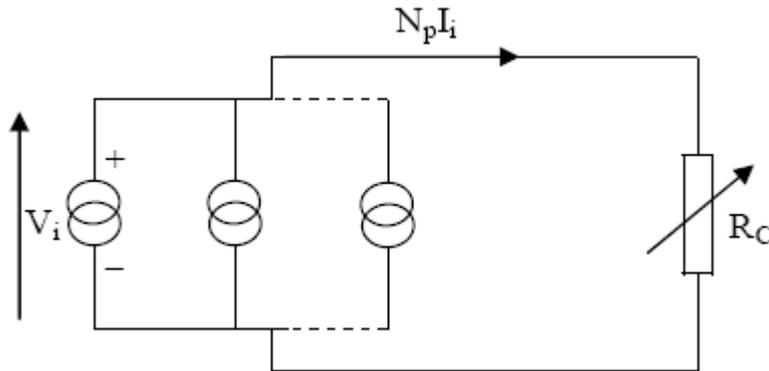


Figure (I-10) : Branchement en parallèle de m cellules identiques

Si on connecte m cellules identiques en parallèle, la tension sera toujours la même, le courant et la puissance seront multipliés par le nombre de cellules m :

$$V' = V, I' = \sum_{i=1}^n I_i = m.I_i \tag{I-18}$$

D'où la puissance sera :

$$P' = m, I_i V_i = m.P \tag{I-19}$$

La caractéristique de m cellules groupées en parallèles est donnée par l'équation suivante [18]:

$$I' = m.I_{PH} - m.I_O \left(e^{\frac{qV}{n.AKT}(V'+R_{se}I)} - 1 \right) - \frac{V' + R_{se}I}{R_{pe}} \tag{I-20}$$

Avec : $R_{se} = n.R_s$ et $R_{pe} = m.R_p$

Si $R_S \rightarrow 0$ $R_P \rightarrow \infty$ les quatre grandeurs caractéristiques du groupement sont :

- La tension en circuit ouvert V'_{co} : $V'_{co} = V_{co}$
- Le courant de court circuit I'_{cc} : $I'_{cc} = m. I_{cc}$
- Le facteur de forme FF' : $FF' = FF$
- Le rendement η' : $\eta' = \eta_1$

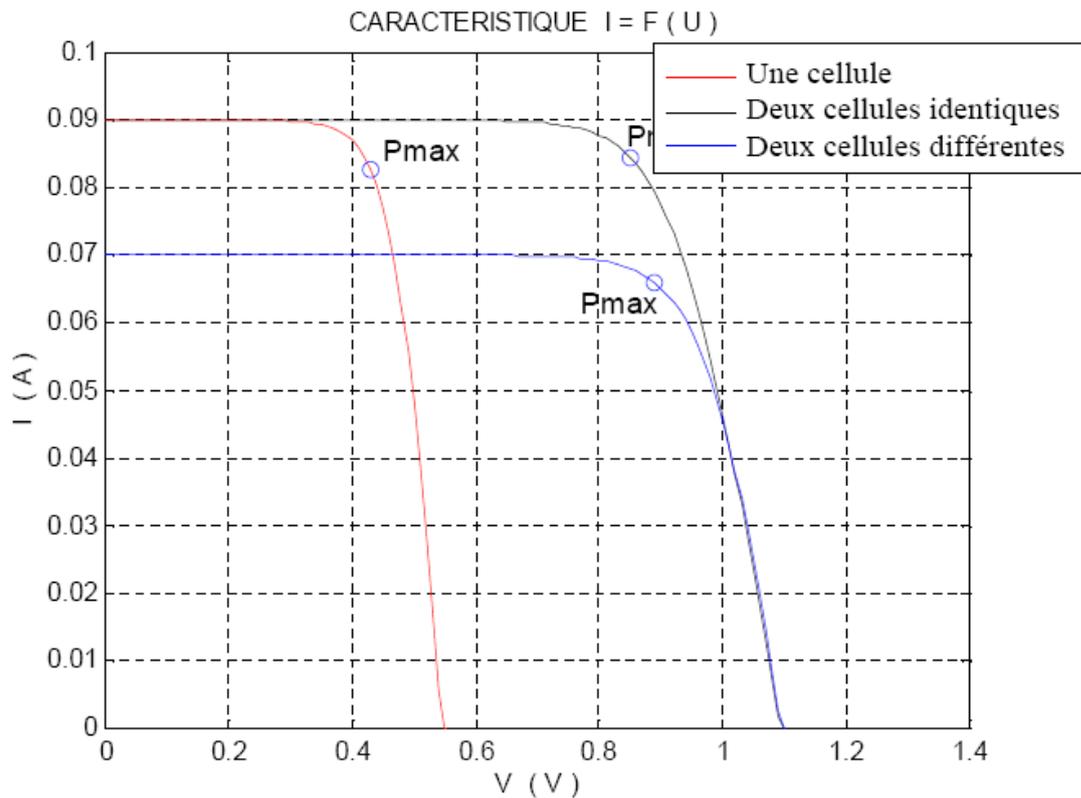


Figure (I- 11) : Une cellule est montée en série avec :

c- Une cellule identique $I_{cc1} = I_{cc2} = 0.09$ (A) même $V_{co} = 0.55$ volt

d- Une cellule différente $I_{cc1} = 0.09$ (A), $I_{cc2} = 0.07$ même $V_{co} = 0.55$ volt

Si les m cellules ne sont pas identiques, cette connexion est possible qu'avec des diodes anti-retour dans chaque branche. La tension en circuit ouvert sera la plus petite des m cellules et le courant de court-circuit du système sera alors la somme des courants de court-circuit.

I.9.3-Groupement mixte des cellules solaires :

Le groupement mixte (série- parallèle) permet d'augmenter le courant et la tension du système. Si on combine m branche parallèle et n cellules série dans chaque branche on aura [18].

$$V' = n V, \quad I' = m I \quad \text{et} \quad P' = m.n V I = mn.P \quad (\text{I-21})$$

L'équation caractéristique du système est donnée par l'équation suivante :

$$I' = m.I_{PH} - m.I_0 \left(e^{\frac{qV}{AKTn.m} (m.V' + n.R_S I)} - 1 \right) - \frac{m.V' + n.R_S I}{m.n.R_P} \quad (\text{I-22})$$

Si $R_S \rightarrow 0$ $R_P \rightarrow \infty$ les quatre grandeurs caractéristiques du groupement sont :

- _ La tension en circuit ouvert V'_{co} : $V'_{co} = n. V_{co}$
- _ Le courant de court circuit I'_{cc} : $I'_{cc} = m. I_{cc}$
- _ Le facteur de forme FF' : $FF' = FF$
- _ Le rendement η' : $\eta' = \eta$

Les différents branchements de douze modules identiques constituant un panneau photovoltaïque et leurs caractéristiques sont représentées par la figure (A- 5) :

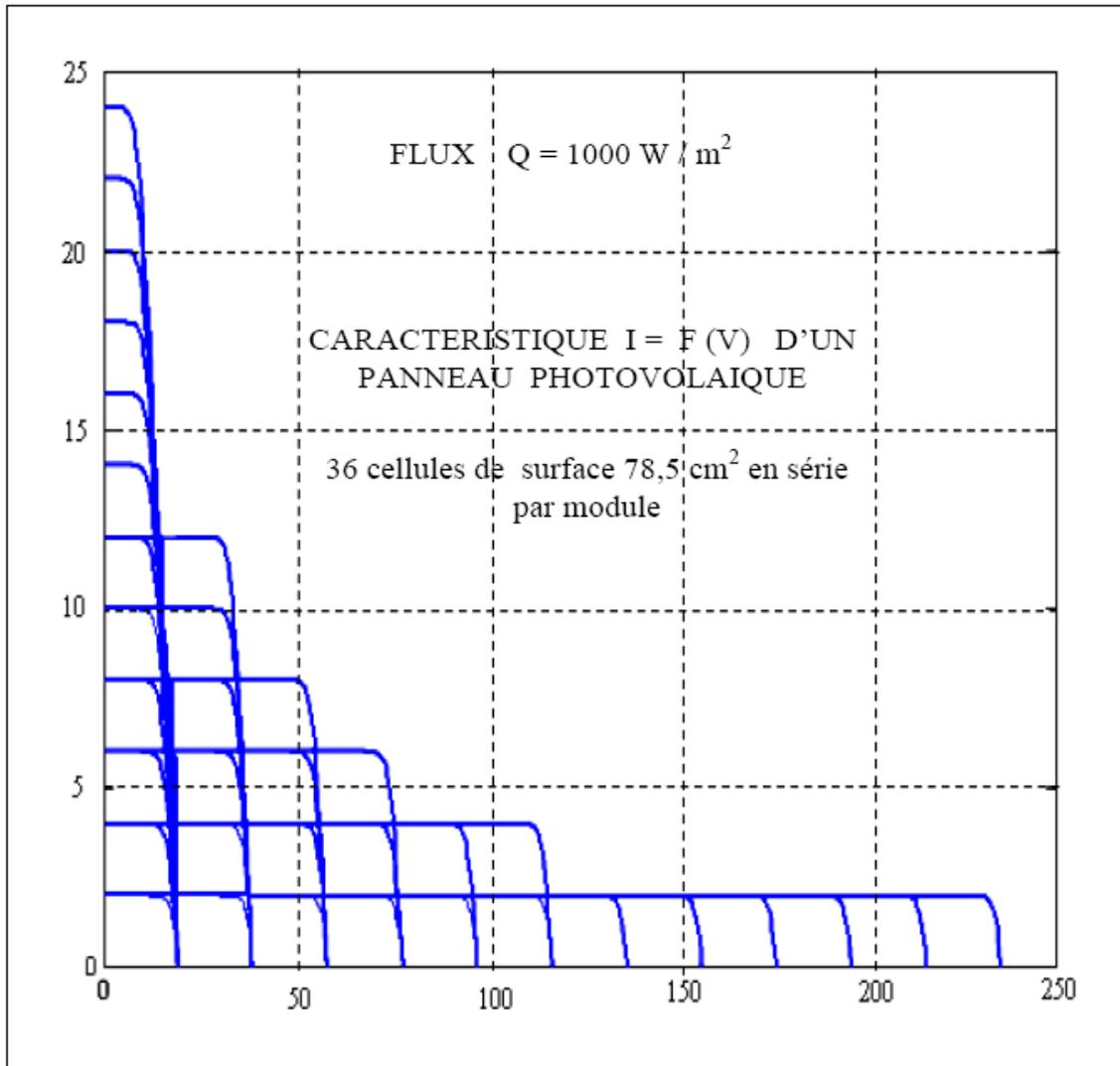


Figure (I- 12) : caractéristique pour différent branchements.

I.10- MODULE PHOTOVOLTAIQUE

Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module. Les connections en séries de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la même tension.

Le module standard commercialisé, connectant 36 cellules cristallines en série pour des applications en 12V, protégées de l'humidité par un capsulage de verre et de plastique. L'ensemble est ensuite muni d'un cadre et d'une boîte de jonction électrique, a généralement une tension à vide supérieure à 20 V et le point optimal de fonctionnement est au voisinage de 16 V à 25°C. Mais la température du module sous rayonnement est souvent supérieure à

40°C, et les performances des cellules sont réduites. On compte en général par cellule une baisse de 2 mV/°C, soit 72 mV/°C pour les modules de 36 cellules. La tension du module tombe alors aux alentours de 14 V ce qui est idéal pour la charge d'une batterie.

Les modules en silicium mono cristallin (64% du marché avec une efficacité de conversion de l'ordre de 15 à 18%), délivrent des tensions normalisées (12, 24, 48V) et des puissances comprises entre 10 et 100Wc (Watt- crête : puissance obtenue pour l'ensoleillement maximal) [3].

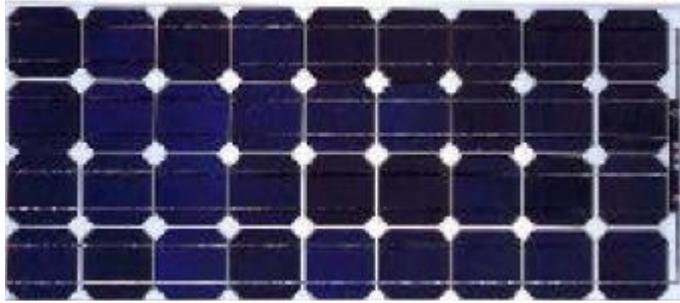


Figure (I-13) : module photovoltaïque de 36 cellules cristallin

I.10.1-Rendement d'un module :

Le rendement du module est le rendement d'une cellule diminué par les pertes dues aux connexions des cellules entre elles, à la transparence des matériaux d'encapsulation, et éventuellement à la chute de tension dans la diode « anti-retour » lorsqu'il faut protéger la batterie d'une éventuelle décharge nocturne.

$$\eta \text{ module} = \eta \text{ cellule} \times \eta \text{ connexion} \times \eta \text{ encapsulation} \times \eta \text{ diode}$$

1.10.2-Nombre de cellule par module

Une cellule au silicium cristallin présente une tension de circuit ouvert de 0.58 à 0.60 et un point de puissance maximale situé à 0.46-0.47 V. considérant que le module doit pouvoir charge une batterie 12V jusqu'à sa tension maximale d'environ 14V et que l'on va perdre 2 à 3 V en câblage et du fait des élévation de température il faudra disposer d'un module fournissant au minimum 16-17 V à sa puissance maximale. Si l'on divise 16.5 par 0.46, on trouve le nombre arrondi de 36, valeur extrêmement courant comme nombre de cellules en

séries des modules usuels du marché. De plus, cela permet de disposer les photopiles d'un module en 4 rangs de 9. En pratique, les modules les plus courants en 12 V comportent 32 à 34 cellules : cela dépend de la valeur exacte de la tension de chaque cellule et de la température d'utilisation [19].

I.10.3-Encapsulation et encadrement

Le but principal de l'encapsulation d'un ensemble de cellules solaires et des raccords électriques est de protéger leurs fils de l'interconnexion de l'environnement hostile dans lequel elles sont utilisées. Par exemple, les cellules solaires sont relativement minces et sujettes à des dommages mécaniques. En plus de cela, la grille métallique sur la surface supérieure de la cellule solaire et le fil de l'interconnexion des cellules solaires peuvent être corrodés par l'eau ou la vapeur d'eau. Les deux principales fonctions de l'encapsulation sont de prévenir les dommages mécaniques des cellules solaires et d'empêcher l'eau ou la vapeur d'eau de la corrosion des contacts électriques.

Une fois ces connexions effectuées, on réalise l'opération dite encapsulation : les photopiles sont enrobées dans une résine et prises en sandwich entre deux supports en éloignant les cellules d'environ 1 cm du bord pour éviter la corrosion :

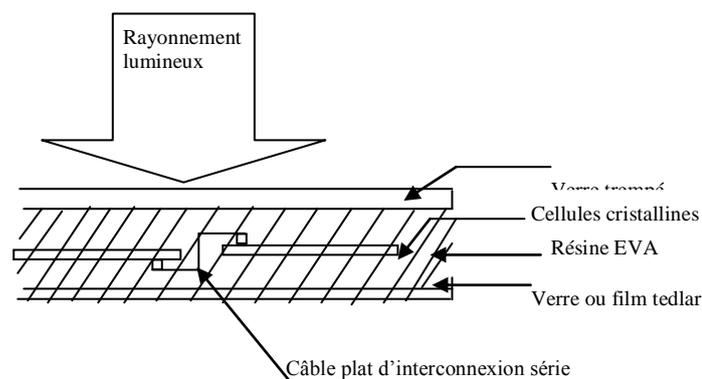


Figure (I-14) : Vue en coupe d'un module au silicium cristallin

-En face avant : il faut placer un revêtement transparent et résistant. Un verre trempé haute transmission est un bon choix. Il s'agit de verre de moindre concentration en oxyde de fer que le verre à vitre et donc plus transparent. L'épaisseur de ce verre est généralement de 3 ou 4 mm d'épaisseur selon la dimension du module.

-En face arrière : on a longtemps mis également du verre, selon la technique de bi-verre feuilleté inspirée de la fabrication des pare-brise automobiles. C'est évidemment la solution de plus résistance, qui de plus offre une transparence intéressante pour certaines applications architecturales. Mais il est plus économique et parfois aussi efficace d'utiliser un film plastique de type PVF (connu sous marque Tedlar), ou un autre film faisant barrière à l'humidité comme un multicouche plastique/métal.

La résine d'enrobage, quant à elle, est fréquemment de l'EVA (Ethyle-Vinyl-Acétate). Elle se présente sous forme de feuilles de couleur blanchâtre, qui sont placées entre les revêtements et les photopiles, l'EVA dit solaire adapté à cette opération, comporte des additifs pour amorcer la solidification ainsi que pour favoriser l'adhérence sur le verre. On chauffe l'empilement verre/EVA/photopiles câbles/EVA/verre (ou film plastique) jusqu'à 100-120°C pour liquéfier la résine, on exerce alors une pression pour chasser l'air et réaliser le collage, puis on maintient la température vers 140°C pendant environ 30 min afin de solidifier.

-Réticuler : l'EVA. Il devient alors transparent, avec un indice de réfraction proche de celui du verre, ce qui évite les pertes optiques. La technologie employée s'apparente à celle des pare-brise feuilletés, à la différence que le verre étant plat et non courbe, il suffit de 1 bar de pression pour effectuer ce collage (contre 3 à 5 bars dans les autoclaves de l'industrie automobile). Cette opération est réalisée dans un laminateur composé d'un plateau chauffant, d'une pompe à vide et d'une poche pour appliquer la pression atmosphérique sur les empilements.

Le module photovoltaïque est alors opérationnel. Et surtout, il est prêt à endurer tous les climats.

On lui ajoute souvent un cadre de fixation et une sortie électrique adéquate. Cette dernière phase est importante car le passage des connexions électriques vers le mode extérieur ne doit pas constituer un point d'infiltration d'eau ou de vapeur d'eau. Sur le cadre on fixe le plus souvent une boîte de raccordement, dite boîte de jonction, pour connecter le panneau avec des conducteurs compatibles avec son ampérage de sortie [38].

I.11-CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons rappelé quelques notions sur le rayonnement solaire .et son application dans le domaine photovoltaïque. Nous avons ensuite expliqué le fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales et leurs groupements dans le module photovoltaïque et nous avons donné des notions sur le module photovoltaïque : rendement, nombre des cellules dans le module, leur encapsulation et leur encadrement.

CHAPITRE II
Simulation comportementale d'une cellule solaire

Chapitre II Simulation comportementale d'une cellule solaire

II.1- INTRODUCTION

L'utilisation des cellules solaires comme source d'énergie électrique a fait apparaître le besoin d'étudier ces systèmes afin de les optimiser. Cependant, les coûts élevés de l'expérimentation justifient l'utilisation de la simulation qui constitue une bonne perspective.

Dans ce chapitre, nous présentons les outils de simulation numérique du comportement d'une photopile, et on va simuler leur comportement thermique.

II.2- LOGICIEL DE SIMULATION

Simulink est un environnement de simulation multidomaine et de conception par modélisation destiné aux systèmes dynamiques et embarqués. Il fournit un environnement graphique interactif et un ensemble personnalisable de bibliothèques de blocs qui nous permettrons de concevoir, simuler, mettre en œuvre et tester différents systèmes in stationnaires (en particulier dans le domaine des communications, des contrôles, du traitement des signaux, du traitement vidéo et du traitement de l'image).

Des produits complémentaires enrichissent le logiciel Simulink pour l'étendre à plusieurs domaines de modélisation, ainsi que pour fournir les outils nécessaires aux tâches de conception, de mise en œuvre, de vérification et de validation.

Simulink est intégré dans MATLAB, ce qui assure un accès immédiat à une gamme complète d'outils qui nous permettrons de développer des algorithmes, d'analyser et de visualiser les simulations, de créer des scripts de traitement par lots, de personnaliser l'environnement de modélisation et de définir les données des signaux, des paramètres et des tests [26 ,27].

II.3- OUTILS DE SIMULATION D'UNE CELLULE SOLAIRE

II.3.1-Système à simuler .

La cellule solaire peut être modélisée par un circuit électrique à une seule diode comme montré sur la figure 1.

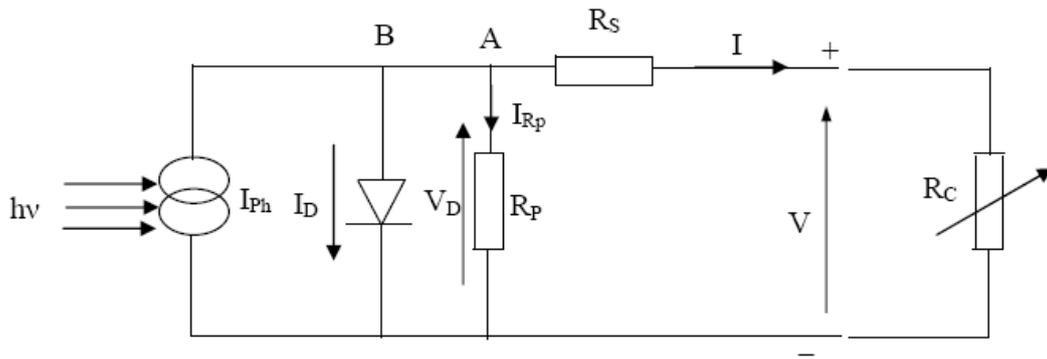


Figure (II.1) : la photopile à simuler

Pour simuler ce modèle nous pouvons utiliser différents logiciels ou programmes ; parmi ceux-ci on peut citer le logiciel Matlab par son package « Simulink » qui est un environnement souple pour simuler les différents circuits électriques. Dans la section suivante nous allons illustrer cet outil de travail.

II.3.2-Implantation

Nous traçons le schéma Simulink du système ainsi modélisé à l'aide d'intégrateurs, de gains, de sommateurs et de constantes. Nous identifions entre les variables et les expressions des gains en fonction des paramètres de notre circuit sur le schéma Simulink.

Postprocesseurs : nous utilisons différents outils de visualisation (oscilloscopes, traceurs XY, etc.) pour visualiser de manière conviviale les résultats de simulation du système.

II.3.3-Modélisation d'une cellule sous Simulink

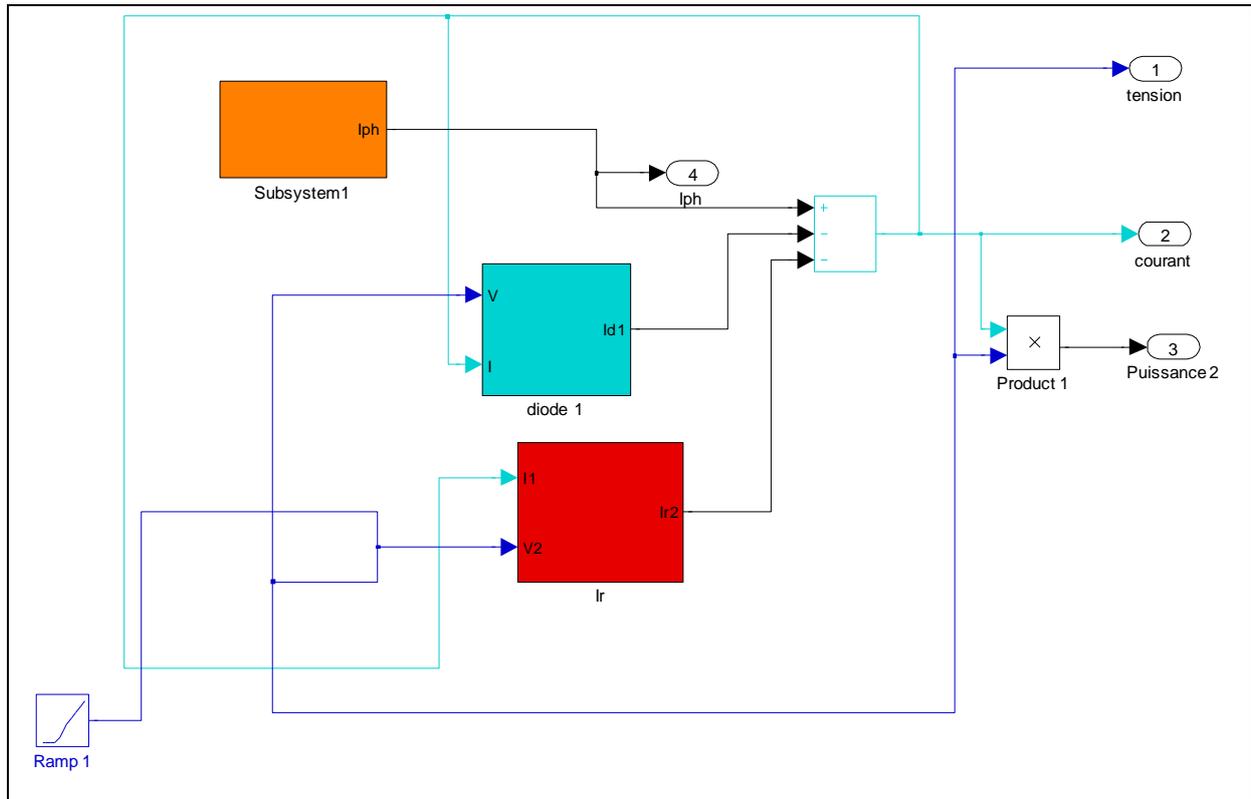


Figure (II.2) : Modèle d'une cellule sous Simulink

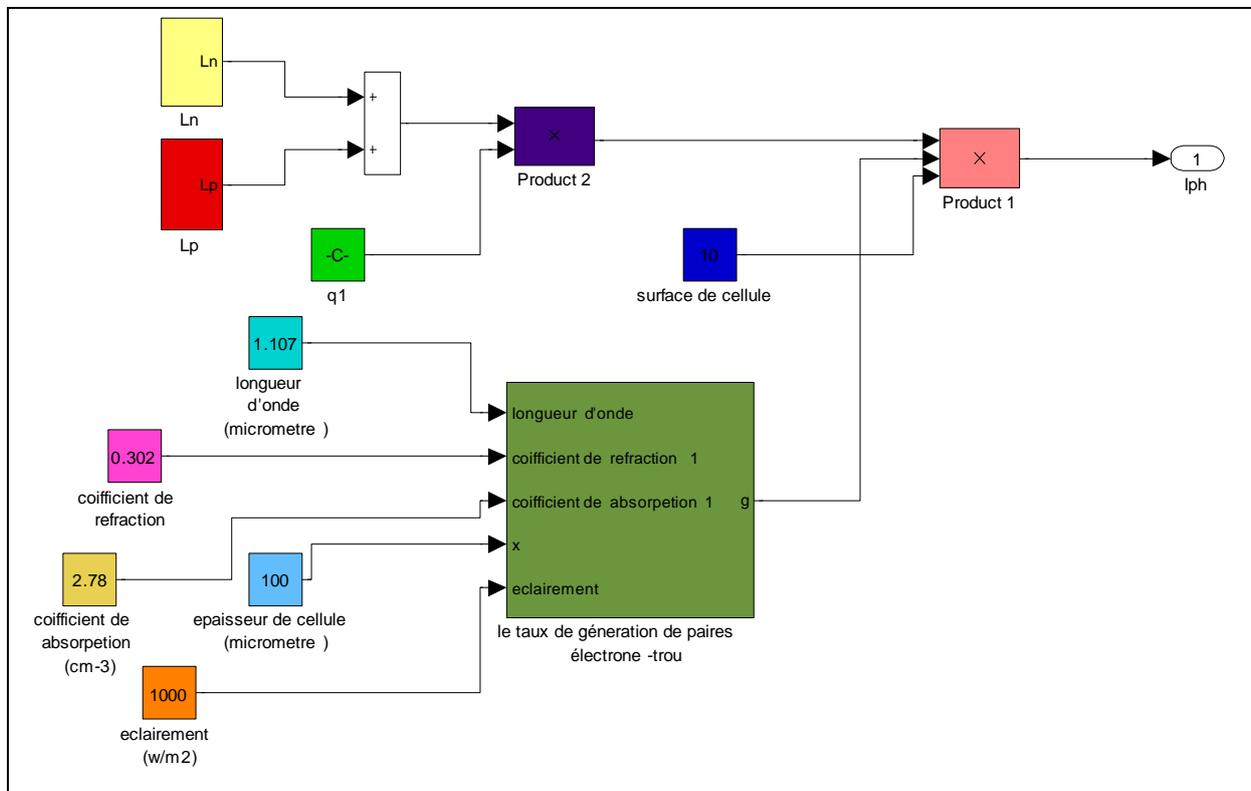


Figure (II.3) : modèle de courant photogénéré

Chapitre II Simulation comportementale d'une cellule solaire

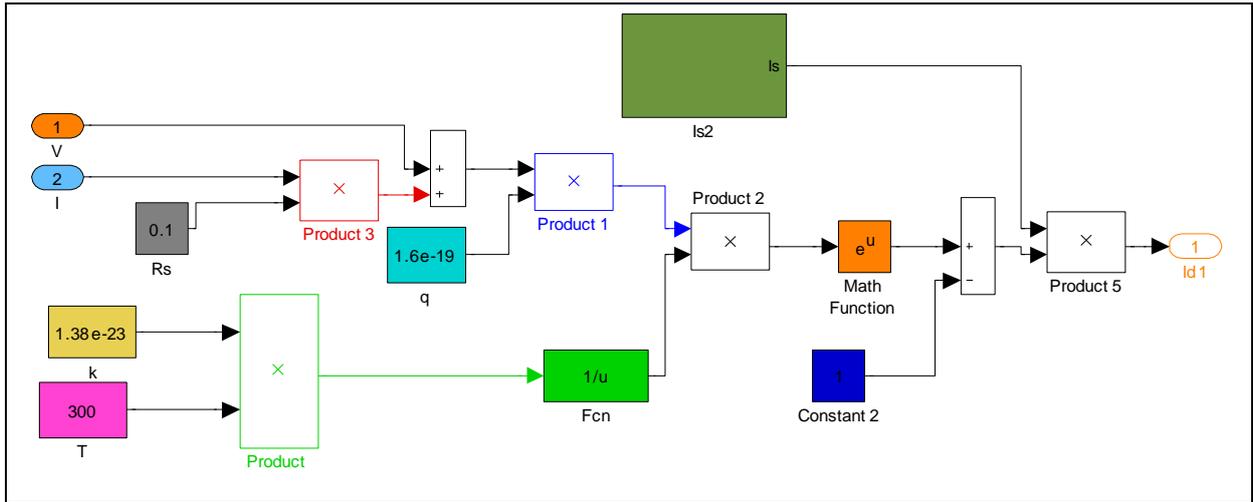


Figure (II.4) : modèle courant de diode

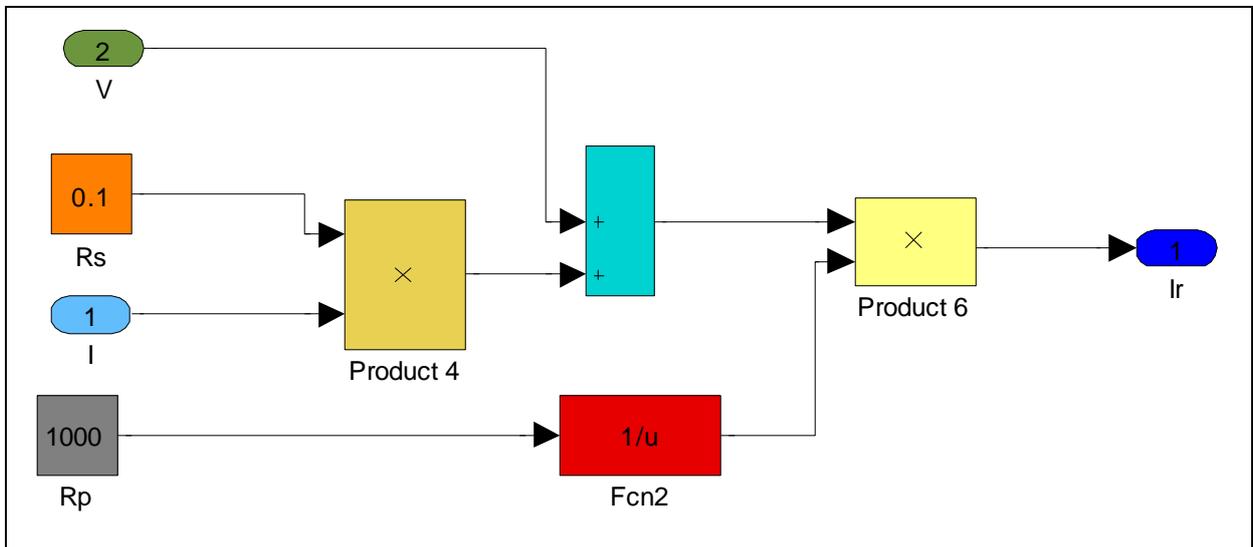


Figure (II.5) : modèle courant traversant R_P

Chapitre II Simulation comportementale d'une cellule solaire

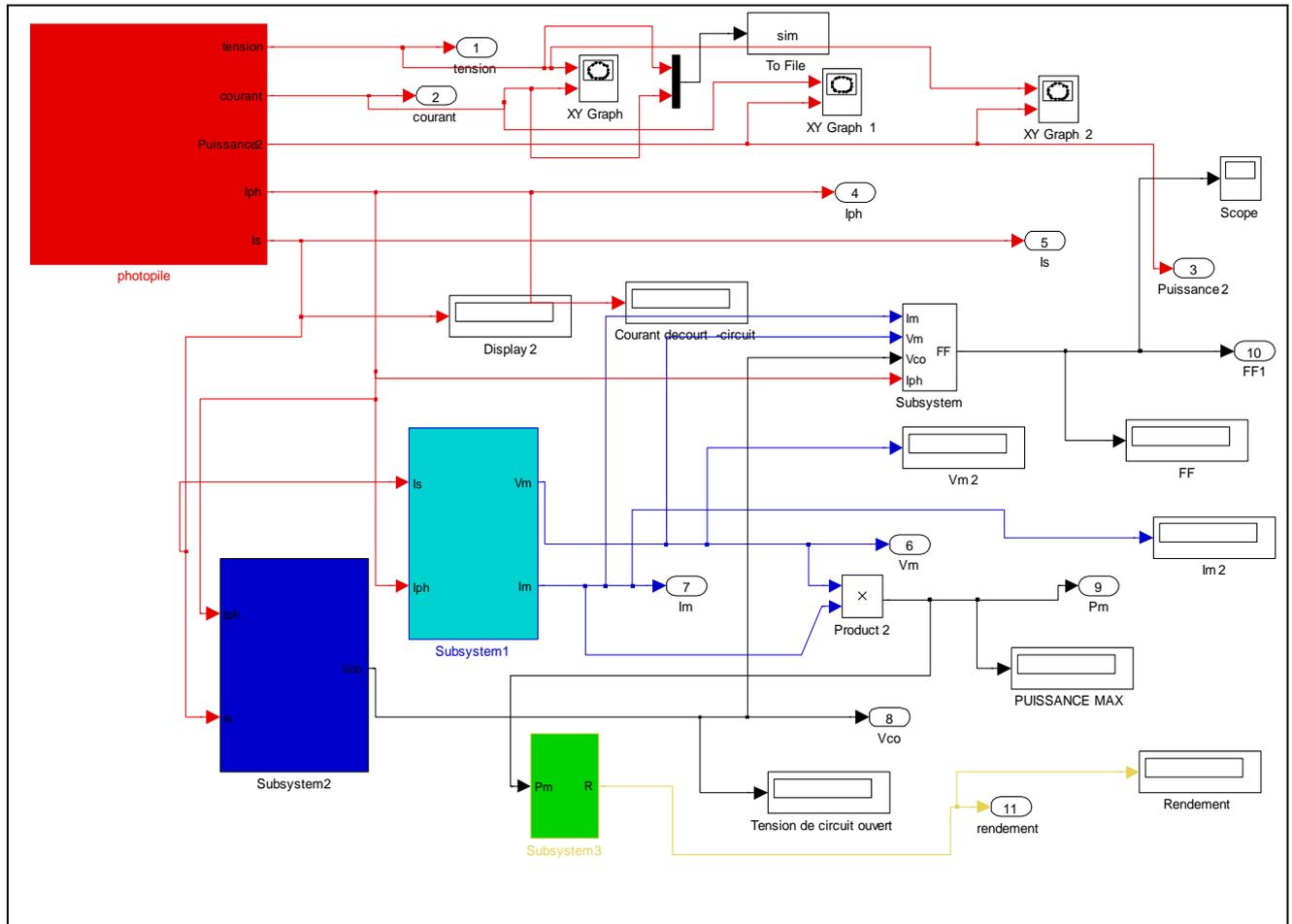


Figure (II.6) : Modélisation des paramètres caractéristiques d'une cellule solaire sous Simulink

Le modèle précédent est le plus développé pour la simulation d'une cellule solaire ; il nous permet de :

- Tracer la caractéristique $I=f(V)$,
- Déterminer les coordonnées du point de fonctionnement (I_m, V_m) ,
- Déterminer les quatre grandeurs caractéristiques $(I_{cc}, V_{co}, FF, \eta_m)$,
- Tracer les variations des quatre grandeurs $(I_{cc}, V_{co}, FF, \eta_m)$ en fonction d'un paramètre de la cellule à simuler.

Chapitre II Simulation comportementale d'une cellule solaire

II.4-PARAMETRES DE SIMULATION

La photopile simulée à base de silicium monocristallin a les paramètres suivant [23][5].

Paramètre	Valeur	Paramètre	Valeur	Paramètre	Valeur
Resistance série	$R_S=0, 1\Omega$	Coefficient de réfraction	$R_0, 32$	Concentration D'atomes	$n_i=2, 1.10^{20} \text{ cm}^{-3}$
Resistance parallèle	$R_P=1000 \Omega$	Coefficient d'absorption	$\alpha=2, 78\text{cm}^{-1}$	Dopage d'émetteur	$N_a=10^{16} \text{ cm}^{-3}$
Facteur d'idéalité	$n=1$	Surface de cellule	$S=10\text{cm}^2$	Dopage de substrat	$N_d=10^{18} \text{ cm}^{-3}$
Température ambiante	$T=300\text{K}$	Epaisseur de cellule	$x=100\mu\text{m}$	Mobilité d'électrons	$\mu_n=1500 \text{ (cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$
Eclairement	$I=1000\text{W /m}^2$	Constante de Boltzmann	$K=1, 3810^{-23} \text{ (J /K)}$	Mobilité de trous	$\mu_p= 450 \text{ (cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$
Longueur d'onde	$\lambda=1,1 \mu\text{m}$	Constante de Planck	$h=6,626 10^{-34} \text{ (Js)}$	Durée de vie de minoritaire	$\tau=2,5.10^{-3}\text{s}$

Tableau (II.1) : paramètres de photopile simulée

II.5-RESULTATS DE LA SIMUMLATION

II.5.1-Caractéristique I-V

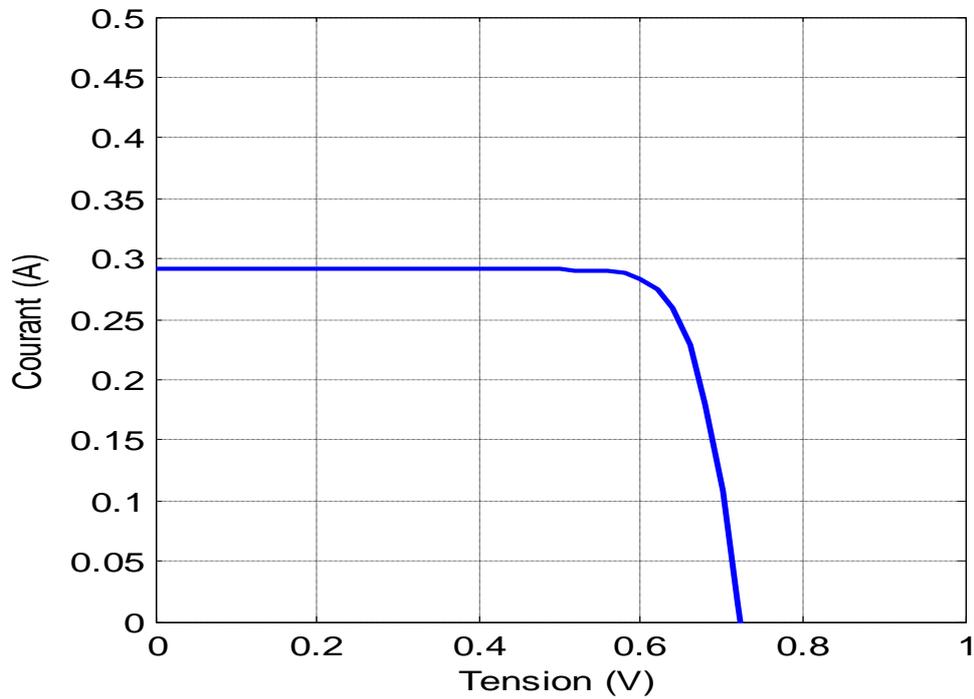


Figure (II.7) : Caractéristique I(V) d'une cellule solaire

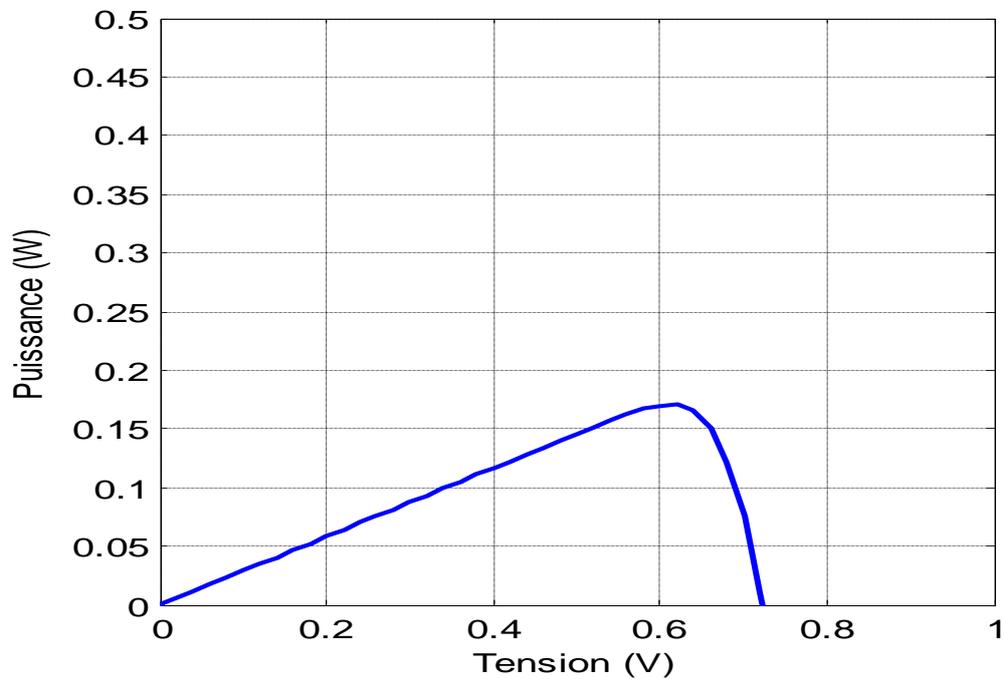


Figure (II.8) : Caractéristique P(V) d'une cellule solaire

Chapitre II Simulation comportementale d'une cellule solaire

II.5.2-Influence de la température

La température est un paramètre important dans le comportement des photopiles, ne serait-ce que parce qu'une cellule exposée à une irradiance de 1 kW /m^2 n'en transforme en électricité que 12 % au plus, le reste (soit 88 % !) étant dissipé en chaleur [36].

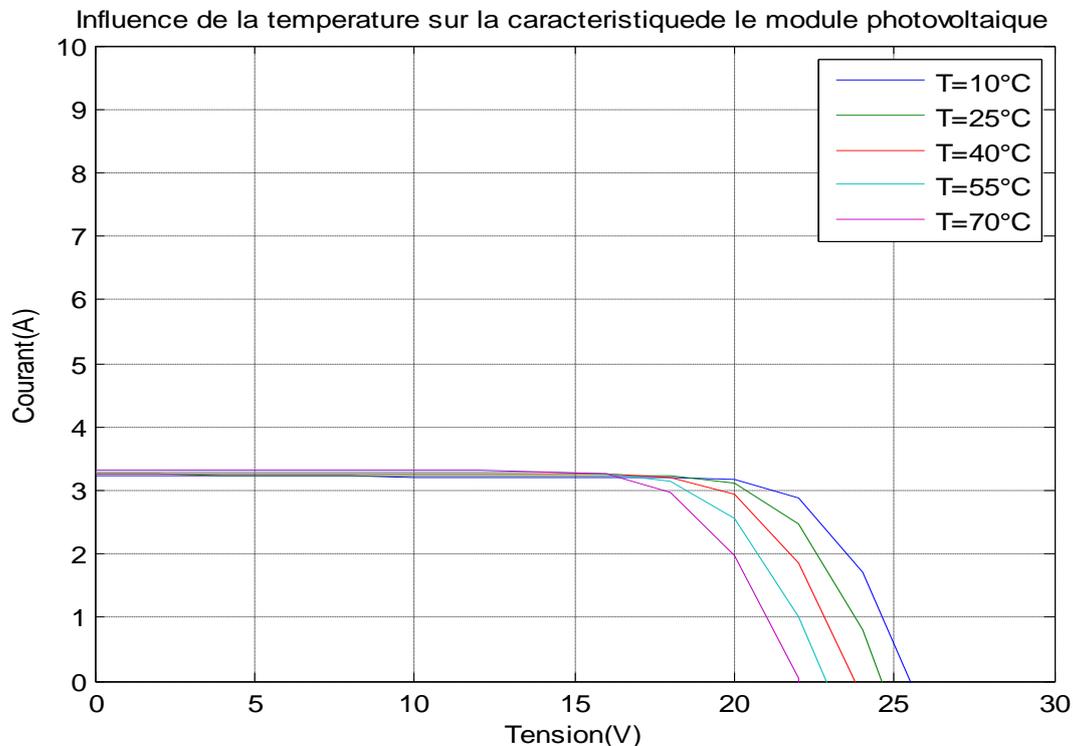


Figure (II.9) : Caractéristique courant-tension pour 5 températures différentes de cellule

On observe une augmentation du photocourant, notamment à cause de la diminution de la largeur de bande interdite. Cette augmentation est de l'ordre de $25 \mu\text{A /cm}^2 \cdot ^\circ\text{K}$, soit une variation de $+0.1 \text{ \% /}^\circ\text{K}$.

En même temps, on assiste à une augmentation notable du courant direct de diode, entraînant une diminution nette de la tension de circuit ouvert (environ $-2.2 \text{ mV /}^\circ\text{K}$, soit une variation relative de $-0.4 \text{ \% /}^\circ\text{K}$).

L'augmentation de température se traduit au total par une baisse relative de la puissance disponible de $-0.35 \text{ \% /}^\circ\text{K}$ et par une modification de la valeur de la charge permettant d'extraire cette puissance maximum.

Chapitre II Simulation comportementale d'une cellule solaire

D'après la simulation Nous avons trouvé les résultats suivants:

Température (K)	V_M	I_M	FF	η (%)
283	0,6148	0,1056	0,8022	16,23
298	0,6252	0,1612	0,8175	16,79
323	0,6325	0,2166	0,825	17,13
343	0,6382	0,2729	0,8292	17,35

Tableau II.2: variation des paramètres de la caractéristique $I=f(V)$ en fonction de température

II.5.3-Influence de l'éclairement

On trace la variation du courant par rapport à la tension pour plusieurs intensités de rayonnement solaire.

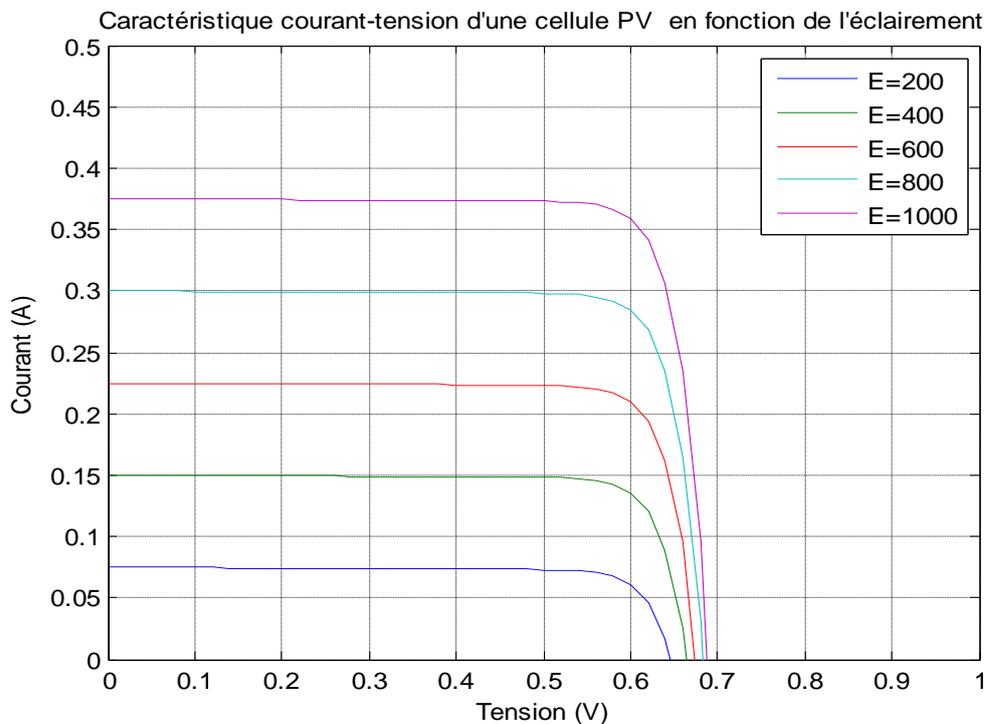


Figure (II.10) : Caractéristique courant-tension d'une cellule pour différentes valeurs d'éclairement

Dans la partie gauche des caractéristiques, le courant est directement proportionnel au rayonnement à ces niveaux d'éclairement. La tension par contre n'est pas très dégradée lorsque la lumière baisse ; dans une cellule monocristallin, la résistance parasite shunt reste assez élevée, la cellule peut fournir une tension correcte même à petit éclairage

Chapitre II Simulation comportementale d'une cellule solaire

D'après la simulation nous avons trouvé les résultats suivants :

Eclairement (W/m ²)	V _M	I _M	FF	η (%)
400	0,6148	0,1056	0,8022	16,23
600	0,6252	0,1612	0,8175	16,79
800	0,6325	0,2166	0,825	17,13
1000	0,6382	0,2729	0,8292	17,35

Tableau II.3: variation des paramètres de la caractéristique I=f(V) en fonction de flux

II.6-CONCLUSION

En résumé, la simulation du comportement d'une cellule solaire à base de silicium monocristallin sous Simulink nous indique que les comportements des cellules solaires sont étroitement liés à la température et à l'éclairement de fonctionnement.

Les résultats obtenus permettent de visualiser les effets des différentes pertes sur le rendement énergétique de conversion du système photovoltaïque (photopile/module). Ces différentes pertes de rendement feront l'objet des chapitres suivants.

CHAPITRE III

Modélisation et simulation des pertes dans un module photovoltaïque

III.1-INTRODUCTION

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 plupart des cas dues à la nature du matériau et à la technologie utilisée. Est le rendement d'un module photovoltaïque est un peu plus faible que celui des cellules qui le constituent, à cause des pertes qui se produisent à la suite de l'interconnexion et de l'encapsulation de ces cellules dans le module.

Dans ce chapitre, nous donnons les modèles fondamentaux des différentes pertes dans un module photovoltaïque à base de silicium monocristallin, afin de simuler leur influence sur le rendement.

III.2- PERTES FONDEMANTELES

2.1 -Pertes par Photons de grande longueur d'onde du spectre solaire :

Si chaque photon incident permettait d'injecter un électron dans le circuit électrique, les dispositifs photovoltaïques seraient très efficaces.

La première limitation vient de la longueur d'onde du rayonnement incident, qui doit être assez faible. Pour qu'un électron lié à son atome (bande de valence) devienne libre dans un semi-conducteur et participe à la conduction du courant, il faut lui fournir une énergie minimum pour qu'il puisse atteindre les niveaux énergétiques supérieurs (bande de conduction). C'est l'énergie du "band gap", E_g . Ainsi, avec un gap de 1.14 eV, le silicium monocristallin n'absorbe que les photons de longueur d'onde inférieure à 1100 nm.[1]

Tous les photons de longueur d'onde supérieure à celle associée au gap du semi-conducteur ne pourront pas générer de paire électron/trou donc seront perdus.

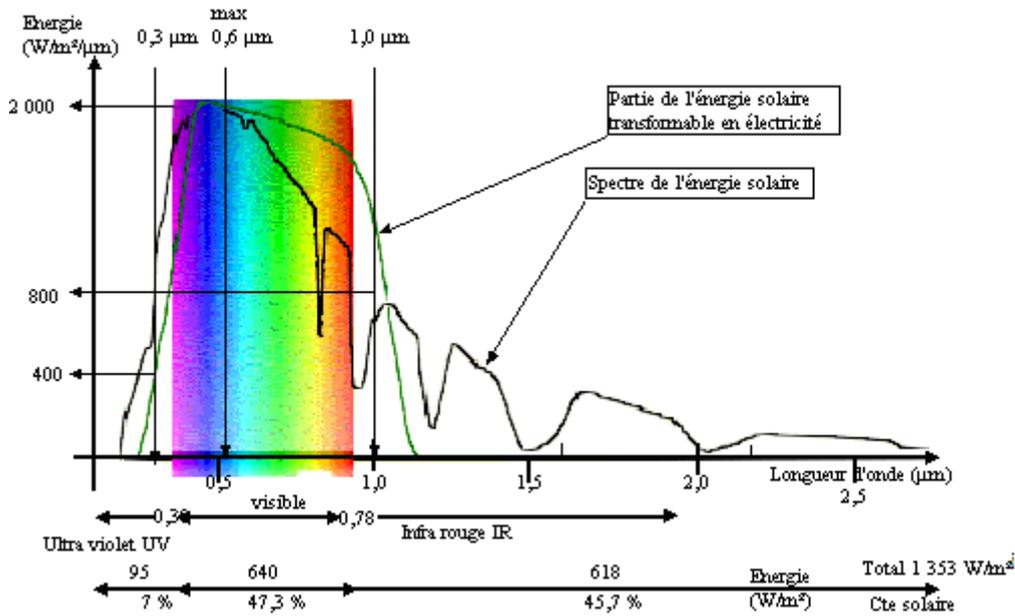


Figure (III-1) : Réponse spectrale d'une cellule PV au silicium comparée au rayonnement solaire au sol

Si nous définissons le flux monochromatique $N_0(\lambda)$ comme le nombre de photons incident par unité de surface

Pour une source polychromatique sera l'intégrale :

$$N_t = \int_0^{\infty} N_0(\lambda) d\lambda \quad (III-1)$$

Le nombre de photons qui ont une énergie supérieur à E_g ou bien le nombre de photons absorbés est donné par la formule suivante :

$$N_a = \int_0^{\lambda_c} N_0(\lambda) d\lambda$$

(III-2)

Est le nombre de photons perdus ou le nombre de photons ayant une énergie inférieure à E_g est :

$$N_p = N_t - N_a = \int_0^{\infty} N_0(\lambda) d\lambda - \int_0^{\lambda_c} N_0(\lambda) d\lambda \quad (III-3)$$

$$N_p = \int_{\lambda_c}^{\infty} N_0(\lambda) d\lambda$$

(III-4)

Donc le taux de pertes par photons de grande longueur d'onde du spectre solaire est donné par la relation suivant :

$$\tau_L = \frac{\int_{\lambda_c}^{\infty} N(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} N(\lambda) d\lambda}$$

(III-5)

La perte par photons de grande longueur d'onde du spectre solaire est à peu près de 23.5% [21].

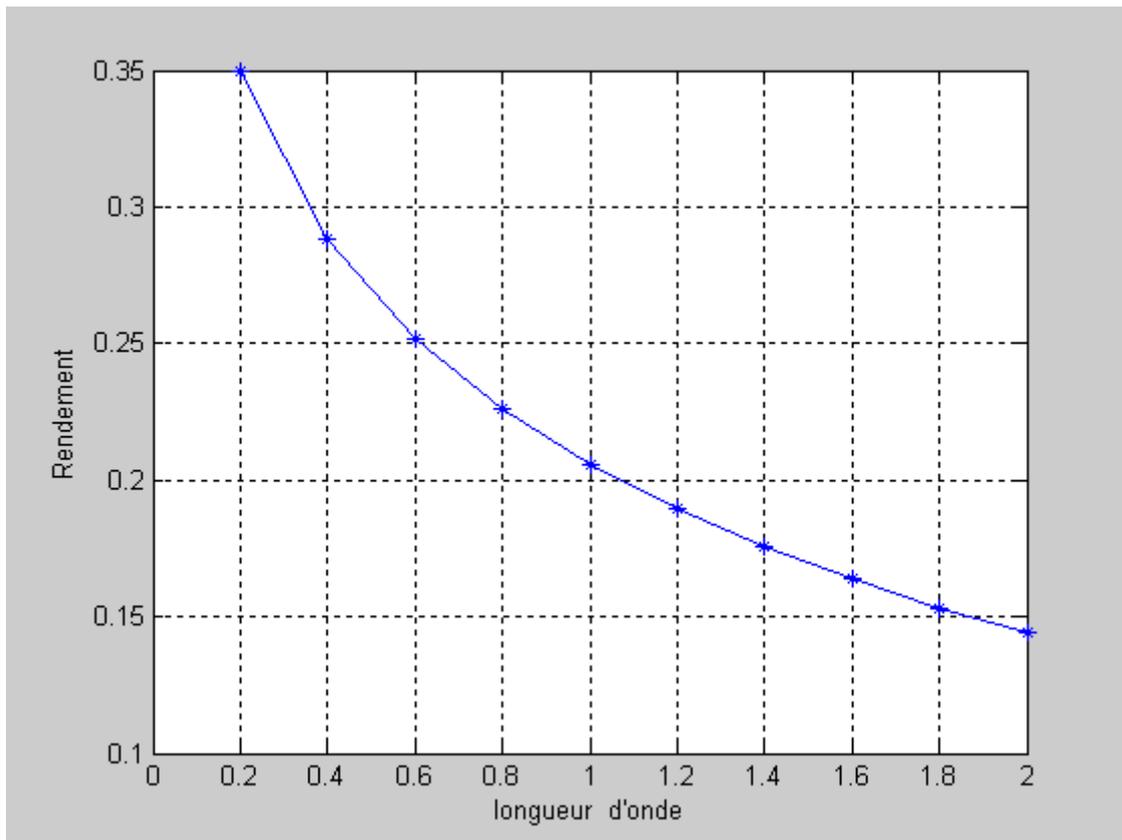


Figure (III-2) : Influence de la perte par photons de grande longueur d'onde sur la performance de la cellule

Nous remarquons que le rendement varie inversement à la longueur d'onde d'absorption.

L'augmentation de la longueur d'onde a un effet direct sur l'amélioration du photocourant et par conséquent sur le rendement de conversion de la cellule solaire. Le courant de court-circuit de la cellule varie inversement à la longueur d'onde.

Pour le Si, la perte correspondante est estimée à 23.5%.

2.2- Pertes par énergie excédentaire des photons :

Un photon génère seulement une paire électron-trou .le reste de l'énergie supérieure à la largeur de bande interdite .est principalement dissipé en chaleur [5].

La puissance optique absorbée par la cellule est transformée d'une part en énergie électrique, d'autre part en énergie thermique .si on néglige les phénomènes de recombinaison, l'énergie thermique résulte uniquement de la thermalisation des porteurs c'est-à-dire de l'énergie excédentaire de chaque photon par rapport au gap du matériau.

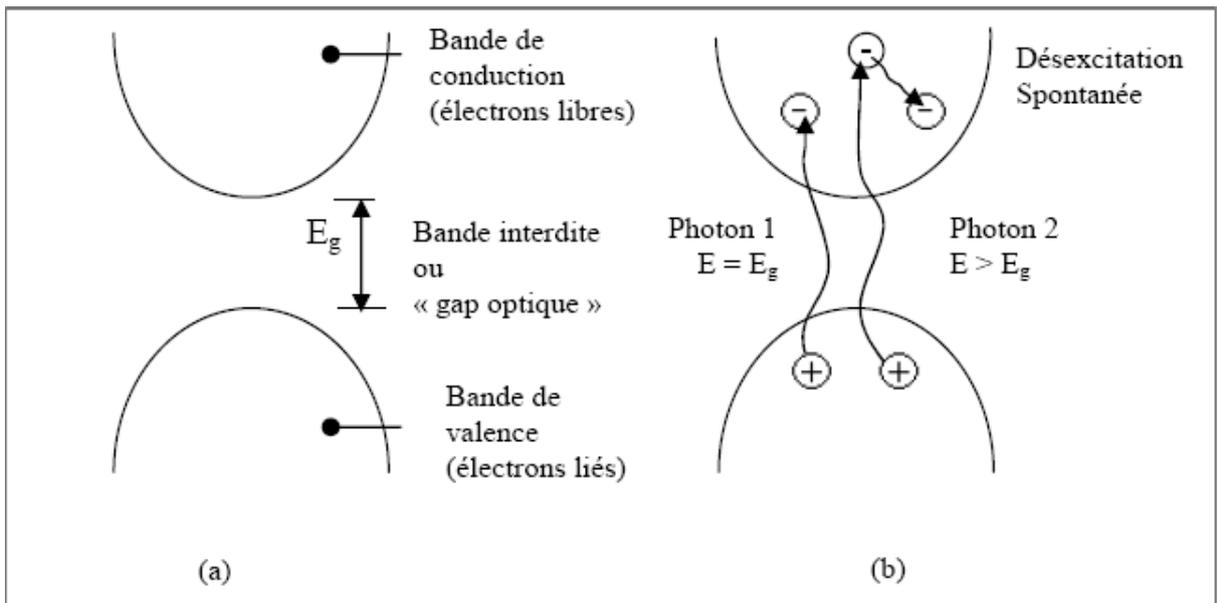


Figure (III-3) : Diagramme d'énergie d'un semi-conducteur

a)- Dans l'obscurité. b)- Sous illumination.

La puissance perdue par énergie excédentaire des photons est donnée par [22] :

$$P_{th} = \int_0^{\lambda_c} (E - E_g) N_0(\lambda) d\lambda$$

(III-6)

$$P_{th} = \int_0^{\lambda_c} E \cdot N_0(\lambda) d\lambda - E_g \int_0^{\lambda_c} N_0(\lambda) d\lambda$$

(III-7)

Le taux des pertes par énergie excédentaire des photons est donné par [20] :

$$\tau_{th} = \frac{\int_0^{\lambda_c} (E - E_g) N_0(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\lambda_c} N_0(\lambda) \frac{hc}{\lambda} d\lambda}$$

(III-8)

L'excès d'énergie pour une cellule au Si est évalué à 33% [21].

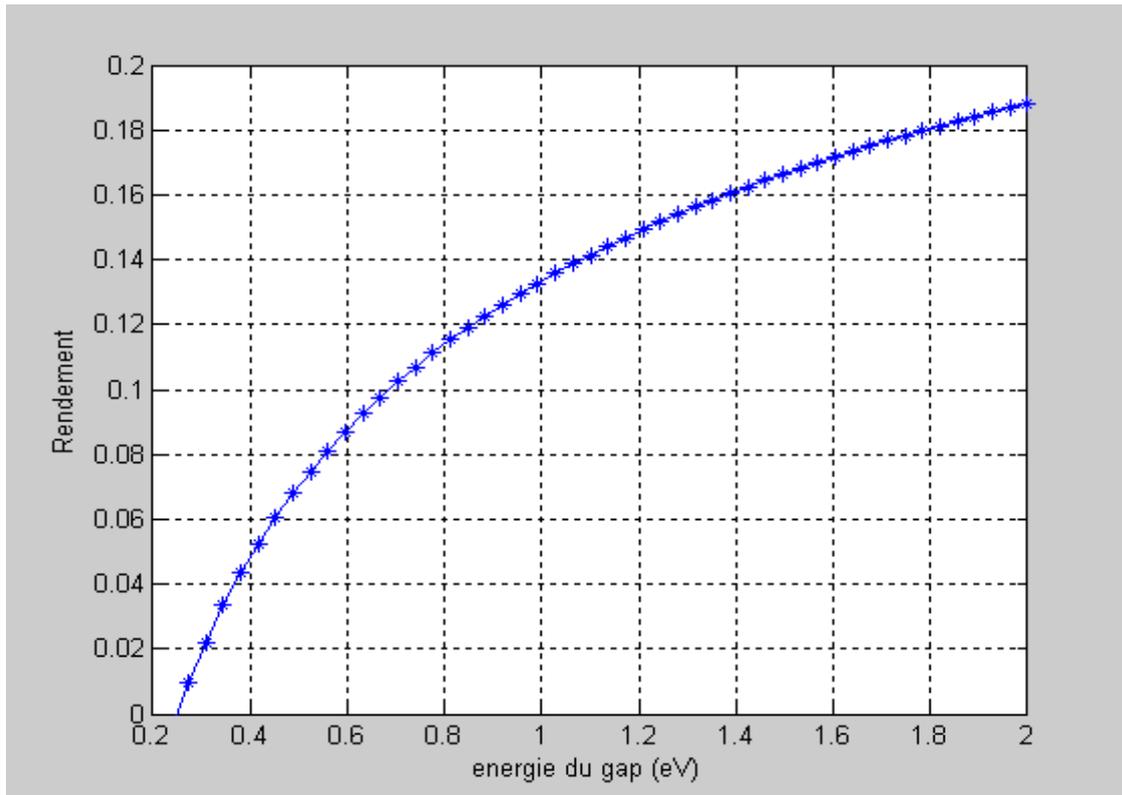


Figure (III-4) : Influence de la perte par énergie excédentaire des photons sur la performance de la cellule

Les pertes par énergie excédentaire diminuent beaucoup le rendement de la cellule et ceci est bien dû à la perte d'énergie du photon supérieur à l'énergie du gap et l'augmentation de la température de la cellule qui diminue aussi le rendement de conversion.

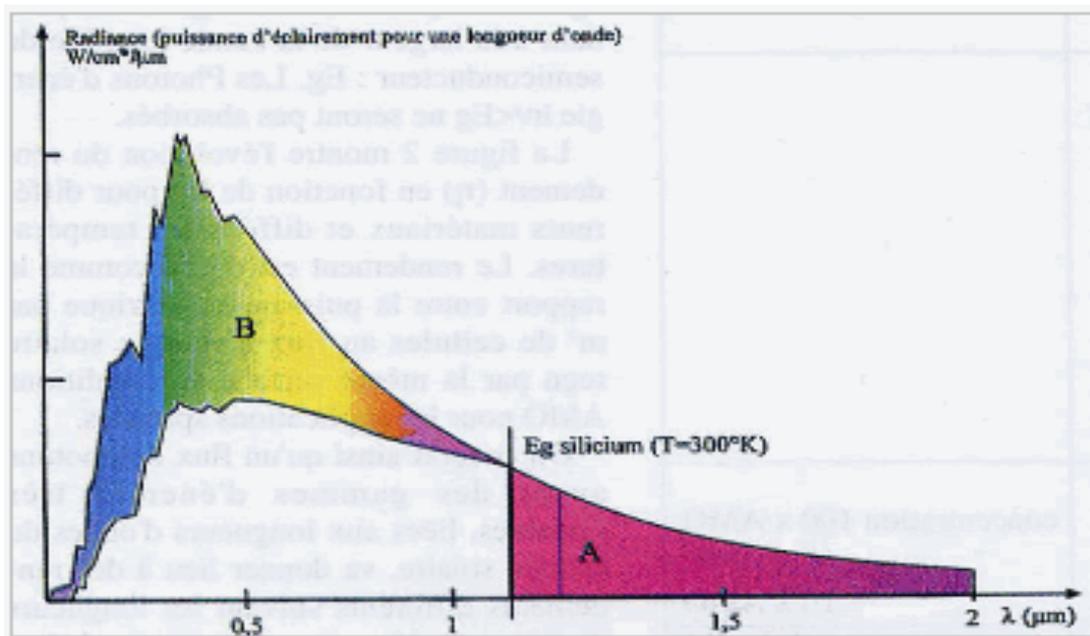


Figure (III-5) : L'exploitation du spectre solaire hors atmosphère par une photopile au silicium

Ce schéma montre l'exploitation du spectre solaire hors atmosphère par une photopile au silicium. La zone A correspond à l'énergie perdue par les photons non absorbés (environ 23,5 %). La zone B correspond à l'excès d'énergie, non utilisée, par les photons d'énergie supérieur à E_g (environ 33 %) [29].

2.3- Facteur de tension :

La tension maximale aux bornes de la cellule (V_0) ne pourra pas dépasser la tension de gap E_g/q . De plus, en raison des recombinaisons Auger, V_0 ne pourra dépasser 0,65 V pour le silicium, sauf dans le cas de cellules très minces ($V_0=0,72$ V pour une cellule de 20 μm) [5]. On définit un facteur de tension [20] :

$$\eta_v = \frac{qV_{co}}{E_g} \tag{III-9}$$

Pour une cellule au Si, le facteur de tension introduit une perte de 40% [21].

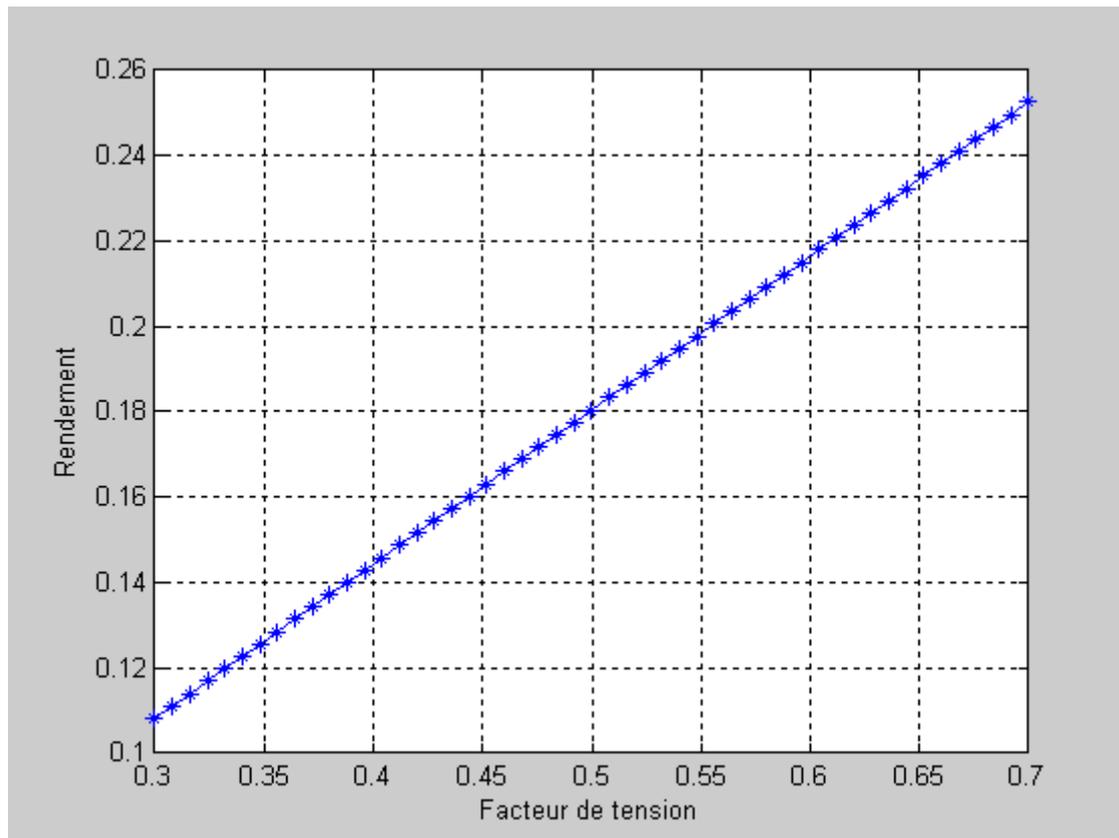


Figure (III-6) : Influence de pertes par facteur de tension sur la performance de la cellule

Nous pouvons conclure que le rendement augmente avec le facteur de tension, ce qui est confirmé par la relation entre le facteur de tension et la tension de circuit ouvert qui a un effet direct sur le rendement.

III.3-PERTES TECHNOLOGIQUES.

3.1-Réflexion :

Le phénomène de la réflexion est l'un des problèmes qui impose la meilleure conversion d'énergie. Ces pertes affectent principalement le courant de court circuit de la pile solaire. Généralement, la lumière se perd en deux formes, soit par réflexion, soit par transmission. Dans une structure photovoltaïque, les trois niveaux suivants de la réflexion sont responsables des pertes optiques :

- 1) Réflexion par les contacts ohmiques.
- 2) Réflexion par la surface avant du semi-conducteur.
- 3) Réflexion par la couche arrière (BSR) [11].

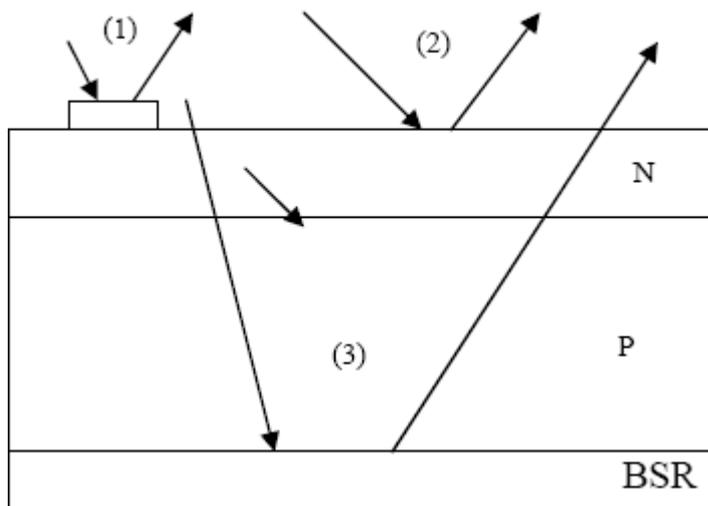


Figure (III-7) : les trois niveaux de la réflexion

Quant à la réflexion, elle dépend avant tout des indices de réflexion des matériaux traversés. Plus la différence d'indice est élevée de part et d'autre d'une surface plus elle est réfléchissante.

Le taux de réflexion s'écrit : $R = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2$ formule de Fresnel en incidence normale [40].

Donc du silicium brut ($n=3.75$ à $\lambda=0.6\mu\text{m}$) en contact avec l'air ($n=1$) réfléchit 33% de la lumière qu'il reçoit. Il n'est pas envisageable de perdre un tiers du flux lumineux juste pour cette raison [19]

Si I est l'intensité du rayonnement, $h\nu$ l'énergie des photons, le flux de photons est donné par :

$$\phi_0 = \frac{I(w/cm^2)}{h\nu(j)} \quad (\text{III-10})$$

Soit en exprimant la longueur d'onde en micromètre [6].

$$\phi_0 = \frac{I(w/cm^2) \lambda(\mu\text{m})}{1.24 * 1.6 * 10^{-19}} \quad (\text{III-11})$$

Le flux de photons pénétrant dans la cellule est :

$$\phi_0(1 - R) \quad (\text{III-12})$$

Où R est le coefficient de réflexion, pour le silicium $R=0.302$ à 25 °C [39].

$$\phi_0(1 - R) = 0.698\phi_0 \quad (\text{III-13})$$

La perte et donne par :

$$\tau = \phi_0 - 0.698\phi_0 = 0.302\phi_0 \quad (\text{III-14})$$

Pour le Si sans traitement anti-réfléchissant cette perte est estimée à 30%.

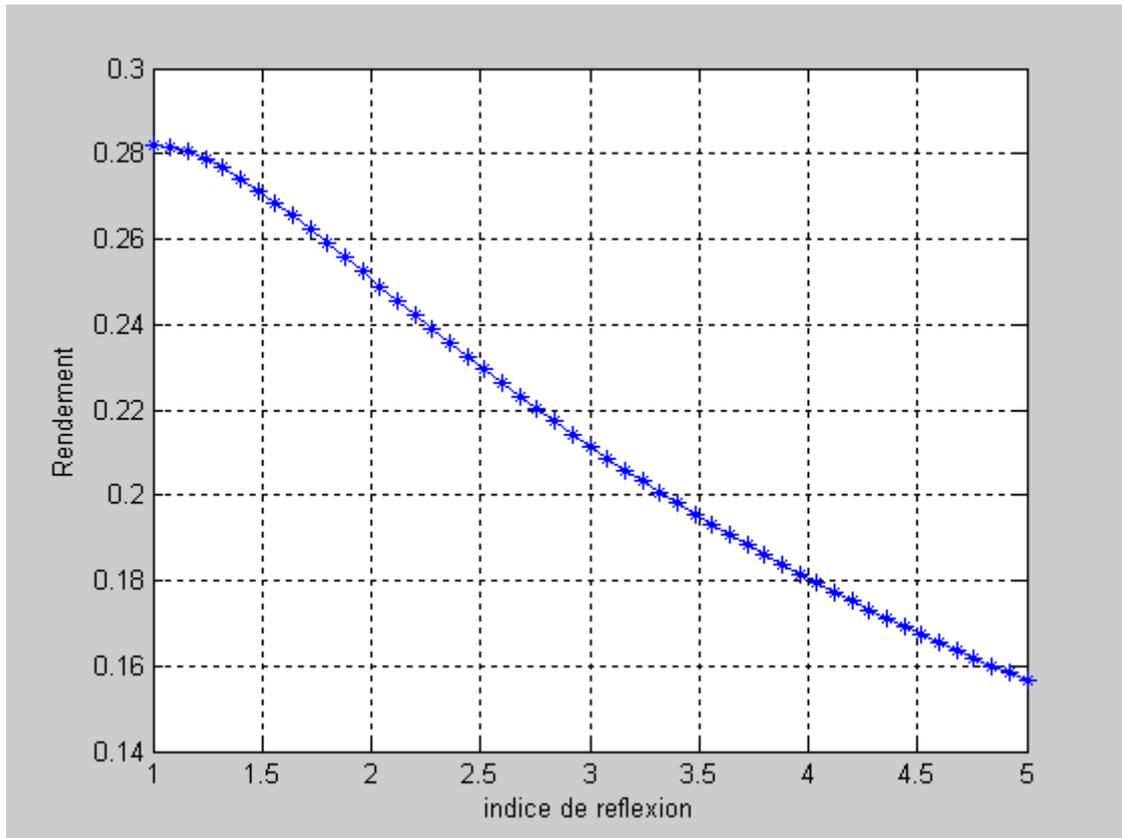


Figure (III-8) : Influence d'indice de réflexion des matériaux sur la performance de la cellule

La réflexion est l'un des problèmes qui impose la meilleure conversion d'énergie. Ces pertes affectent principalement le courant de court circuit de la cellule solaire et bien sur le rendement.

3.2-Absorption partielle due à l'épaisseur limitée de la cellule:

Une partie des photons traversent la cellule sans créer de paire électron-trou. Donc ils seront perdus. La transmission de la lumière est inexistante pour les cellules au silicium cristallin car elles sont suffisamment épaisses.

Quand un matériau absorbe de la lumière, l'énergie subit une loi exponentielle décroissante, car la part qui reste à absorber diminue au fur et à mesure que l'on pénètre dans la matière. Si E_{inc} est l'énergie incidente, l'énergie restante à la profondeur d s'écrit :

$$E = E_{inc} \exp(-\alpha d) \quad (III-15)$$

Le coefficient d'absorption α dépend du matériau et de la longueur d'onde de l'énergie incident .il s'exprime en cm^{-1} , avec l'épaisseur d exprime en cm.

Matériau	$\alpha[\text{cm}^{-1}]$
Silicium cristallin	4.5×10^3
Silicium amorphe	2.4×10^4
Arséniure de Gallium	5.4×10^4

Tableau (III- 2) : Absorption optique de quelques matériaux photovoltaïques (à la longueur d'onde $\lambda=0.59\mu\text{m}$)

$\lambda[\mu\text{m}]$	$\alpha(\lambda)[\text{cm}^{-1}]$	$x_0[\mu\text{m}]$
0.40	50000	0.4
0.50	10000	2
0.53	7500	3
0.60	4500	5
0.70	2000	11
0.80	900	26
0.90	300	76
1.00	100	230
1.06	15	1535
1.15	0.4	57500

Tableau (III-3) : Coefficient d'absorption du silicium monocristalline en fonction de la longueur d'onde [20]

Les pertes dues à Absorption partielle due à l'épaisseur de la cellule est donnée par :

$$P_X = E_{inc} - E_X \quad (\text{III-16})$$

$$\begin{aligned} P_X &= E_{inc} - E_{inc} \exp(-\alpha X) \\ &= E_{inc} (1 - \exp(-\alpha X)) \end{aligned} \quad (\text{III-17})$$

Et le taux de perte est :

$$\tau_X = \frac{E_{inc} (1 - \exp(-\alpha X))}{E_{inc}} = (1 - \exp(-\alpha X)) \quad (\text{III-18})$$

L'épaisseur de silicium nécessaire pour absorber 90% du spectre solaire doit être de 100 μm [31]

Pour une cellule solaire à base de silicium monocristallin, une épaisseur de 250 μm peut donner un rendement de 21%. En comparant une cellule de 250 μm et une cellule de 100 μm , nous pouvons dire qu'une différence de 150 μm peut augmenter le rendement que de 0,8% [1].

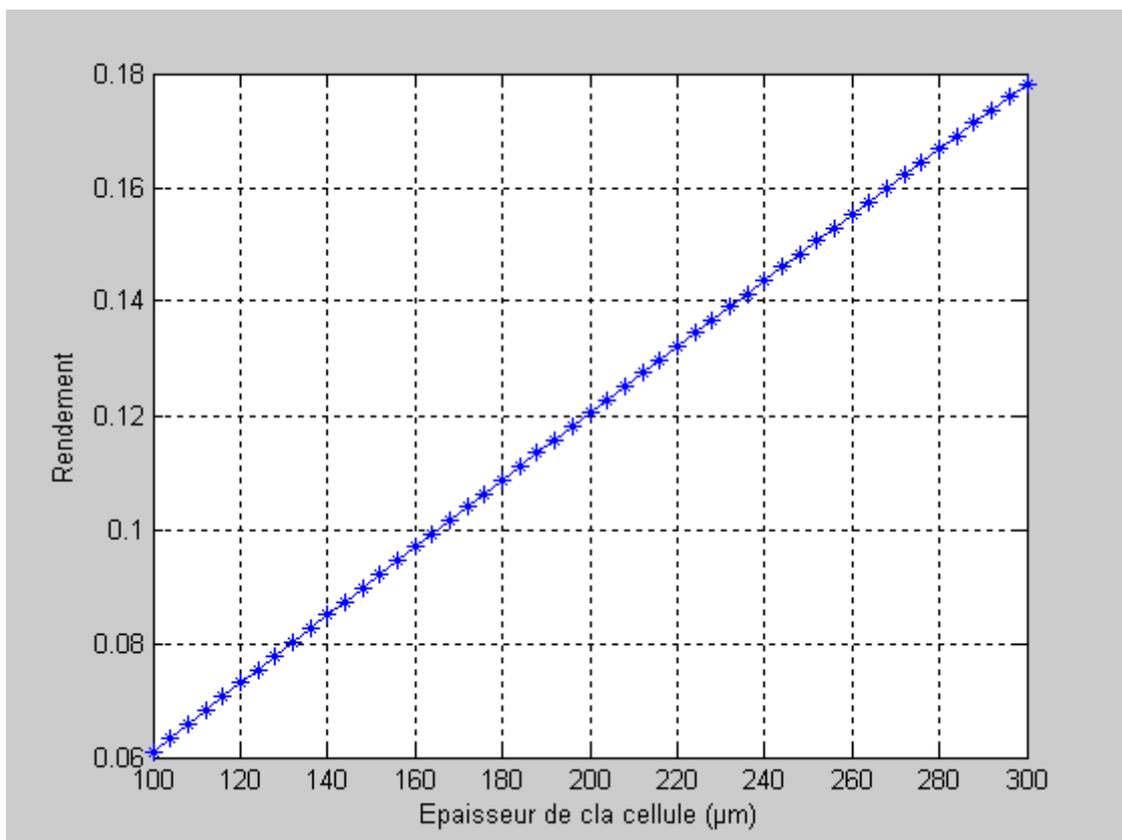


Figure (III-9) : Influence de l'épaisseur de la cellule sur la performance

Le rendement varie proportionnellement à l'épaisseur de la cellule. L'augmentation de cette épaisseur diminue le nombre des photons qui traversent la cellule sans créer de paire électron-trou et développe, par conséquent, le courant de court circuit.

3.3- Collection partielle :

Tous les porteurs photogénérés ne sont pas tous collectés. Certains se recombinent dans le matériau ou aux surface. Le taux de recombinaison, détermine le nombre de porteurs collectés par rapport au nombre de porteurs photogénérés. Il dépendant de la durée de vie t des porteurs minoritaires et de leur longueur de diffusion, Il dépend essentiellement de la qualité

crystalline du matériau. Des procédés de croissance du silicium et de réalisation des cellules peuvent réduire les recombinaisons à un minimum fondamental.

Si nous définissons le flux monochromatique $N_0(\lambda)$ comme le nombre de photons incidents par unité de surface, de temps et d'intervalle de longueur d'onde qui pénètrent dans la photopile, le photocourant qui lui correspond s'écrira [20] :

$$dI_{ph} = q(R_E(\lambda)R_B(\lambda)R_w(\lambda))N_0(\lambda)d(\lambda) \quad (\text{III-19})$$

$$dI_{ph} = qR(\lambda)N_0(\lambda)d(\lambda) \quad (\text{III-20})$$

Le courant résultant d'une source polychromatique sera l'intégrale [20] :

$$I_{ph} = q(1-r)R \int_0^{\infty} N_0(\lambda)d\lambda \quad (\text{III-21})$$

$$I_{ph} = q(1-r)R \int_0^{\lambda_c} N_0(\lambda)d\lambda \quad (\text{III-22})$$

Relation qui définit le coefficient de réflexion moyen r à la surface frontale, le rendement en courant polychromatique interne R relativement au spectre $N_0(\lambda)$, et la longueur d'onde de coupure λ_c qui correspond au gap du matériaux ($\lambda_c = hc/E_g$).

Le rendement en courant polychromatique interne R est lui-même le produit d'un rendement quantique (rapport du nombre de paires générées sur le nombre de photons absorbés) et d'un rendement de collecte (rapport des porteurs collectés sur le nombre de paires générées).

Le rendement de la collection partielle est donnée par la relation [9] :

$$\eta_c = \frac{I_{ph}}{q \int_0^{\infty} N_0(\lambda)d\lambda} \quad -53-$$

(III-23)

Nous avons que $R=76\%$ pour le silicium cristallin. [20] ce qui signifie que 24% sont perdus.

$$\tau_c = 1 - R$$

(III-24)

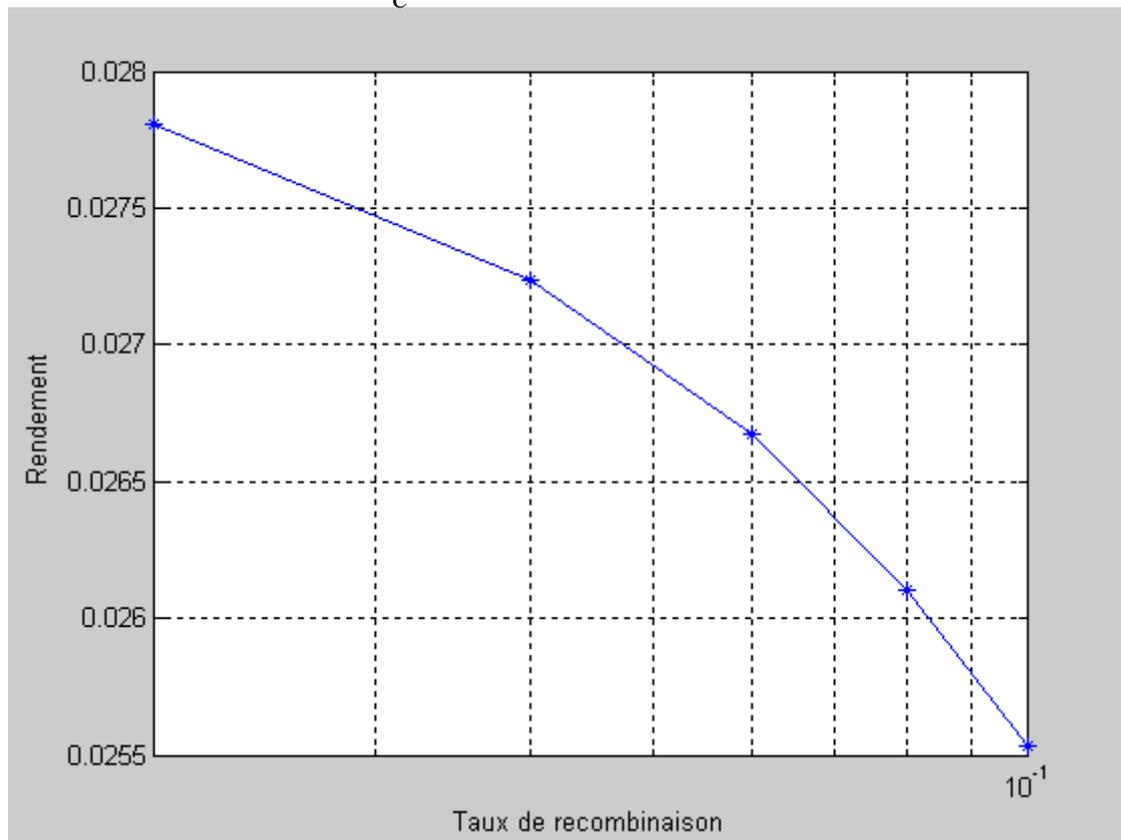


Figure (III-10) : Influence du rendement de collection partielle sur la performance

La recombinaison diminue le nombre de porteurs photogénérés. Donc, elle influe sur le courant photogénéré qui influe sur l'efficacité de la cellule et donc sur le rendement.

III.4- PERTES OHMOQUE

La réalisation d'une cellule solaire idéale est pratiquement impossible à cause des imperfections qui pourraient y avoir dans le matériau. Les résistances parasites ont des effets néfastes sur le rendement des cellules. La résistivité propre aux matériaux semi-conducteurs, les contacts métalliques avant et arrière de la cellule ainsi que d'autres contacts ohmiques

représentent la résistance série de la cellule R_s . En plus, lors de la mise en série et/ou parallèle des cellules pour fabriquer le module PV, la résistance série croît sous l'effet des point de soudures. Tandis que la résistance shunt R_{sh} , représente tous les chemins parallèles de haute conductivité (shunts) à travers la jonction de la pile solaire $p-n$ ou sur les bords des cellules. Une mauvaise encapsulation des modules fait aussi augmenter les courants de fuite et par conséquent pourrait diminuer la résistance shunt [30].

III.4.1- Résistance série R_s :

La résistance série d'une cellule solaire est un paramètre d'un grand intérêt puisqu'il influe considérablement sur le rendement de celle-ci c'est donc un paramètre indicateur de la qualité de ce dispositif.

4.1.1-Modélisation de perte par résistance série

Pour modéliser la perte par résistance série il est intéressant de pouvoir quantifier les éléments constitutifs d'une grille de collecte. Le calcul développé dans le paragraphe suivant se limite à une grille simple à un seul niveau et de géométrie rectangulaire [20].

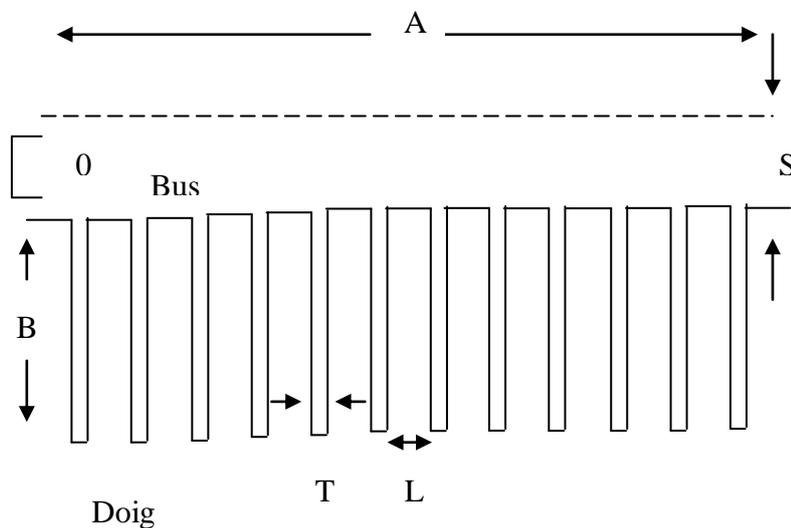


Figure (III-11) : Une grille simple à un seul niveau et de géométrie rectangulaire

Les éléments à prendre en compte dans le calcul des pertes engendrées par les métallisations frontales à grille sont les suivants :

- 1-Perte par ombrage créé par la grille, que l'on désigne par P_0 .
- 2-Perte due au courant horizontal dans l'émetteur, que l'on peut désigner par P_s .
- 3-Perte de contact à l'interface silicium-métal, P_i .
- 4-Perte de conduction dans les doigts métalliques, P_d .
- 5-Perte de conduction dans le bus principale, P_b .

L'élément de cellule sans perte fournirait :

$$P_m = ABI_m V_m \quad (\text{III-25})$$

La perte par ombrage est obtenue à partir du coefficient de couverture de la grille :

$$P_0 = \left(\frac{T}{L+T} + \frac{S}{B} \right) P_m \quad (\text{III-26})$$

La perte dans le silicium est obtenue par intégration du courant entre deux doigts :

$$P_s = \frac{R_{CE} I_m^2 L^3 A B}{12(L+T)} \quad (\text{III-27})$$

Où R_{CE} est la résistance par carré de l'émetteur ($R_{CE} = \rho/e$, e étant l'épaisseur de l'émetteur).

La perte de contact à l'interface, silicium-métal est égale à :

$$P_i = \frac{\rho_{CI} I_m^2 L^3 A B}{T(L+T)} \quad (\text{III-28})$$

Ou ρ_{CI} est la résistivité de l'interface, exprime en ohm .cm².

La perte de conduction dans les doigts métalliques est obtenue en intégrant le courant sur toute la longueur du doigt :

$$P_d = \frac{R_{CD} I_m^2 L^2 A B^3}{3T(L+T)} \quad (\text{III-29})$$

Ou R_{CD} est la résistance par carré de la métallisation.

Enfin, la perte dans le bus est égale à :

$$P_b = \frac{R_{CB} I_m^2 A^3 B^2}{3S} \left(1 - \frac{3}{2} \left(\frac{S}{B} + \frac{T}{L+T} \right) \right) \quad (\text{III-30})$$

La résistance série de l'ensemble s'obtient à partir des pertes par effet Joule, soit [25]:

$$R_s = \frac{P_b + P_d + P_s + P_i}{[I_m (AB - AS - NBT)]} \quad (\text{III-31})$$

On peut alors optimiser la géométrie de la grille en annulant la dérivée de la résistance série par rapport aux différents paramètres .on jouera notamment sur la distance L entre doigt et sur la résistance par carré de l'émetteur.

La valeur types des pertes relatives sont pour une photopile industrielle au silicium cristallin de 100cm de surface totale [20] :

- Pour le coefficient de couverture, environ 6 à 9 %.
 - Pour la perte dans le silicium, environ 3 à 4 % ;
 - Pour la perte dans l'interface, environ 0.5 à 1 % ;
 - Pour la perte dans les doigts, environ 0.5 à 1%
 - Pour la perte dans le bus, environ 3 à 6% dépendant grandement de sa géométrie ;
- ❖ Soit au total pour la résistance série : 7 à 12%.

4.1.2-Perte de puissance max due à la résistance série

La puissance maximum peut être définie comme la puissance dans l'absence de résistance série moins la puissance perdue dans la résistance série. L'équation pour la puissance maximum d'une cellule solaire devient alors:

La puissance perdue par la résistance série est [31] :

$$P_{R_s} = I_m^2 R_s \tag{III-32}$$

Donc la puissance max devient :

$$P'_m = V_m I_m - I_m^2 R_s = V_m I_m \left(1 - \frac{I_m}{V_m} R_s \right) \tag{III-33}$$

$$P'_m = P_m \left(1 - \frac{I_{cc}}{V_{CO}} R_s \right) \tag{III-34}$$

$$P_{R_s} = P_m - P'_m = P_m - P_m \left(1 - \frac{I_{cc}}{V_{CO}} R_s \right) = P_m \left(\frac{I_m}{V_m} \right) R_s \quad (\text{III-35})$$

Le taux de perte est :

$$\tau_{R_s} = \frac{P_{R_s}}{P_s} = \left(\frac{I_{cc}}{V_{CO}} R_s \right) \quad (\text{III-36})$$

Les contacts semi conducteur – électrodes à résistance élevée abaissent appréciablement la tension et le courant de sortie ce qui va limiter le rendement de conversion. Pour une cellule au Si, la perte résultante est estimée à 6%.

R_s augmente avec le groupement série de cellules solaires et diminue avec une connexion parallèle. Du fait que le rendement augmente quand R_s diminue, la technologie actuelle essaye de minimiser la valeur de R_s .

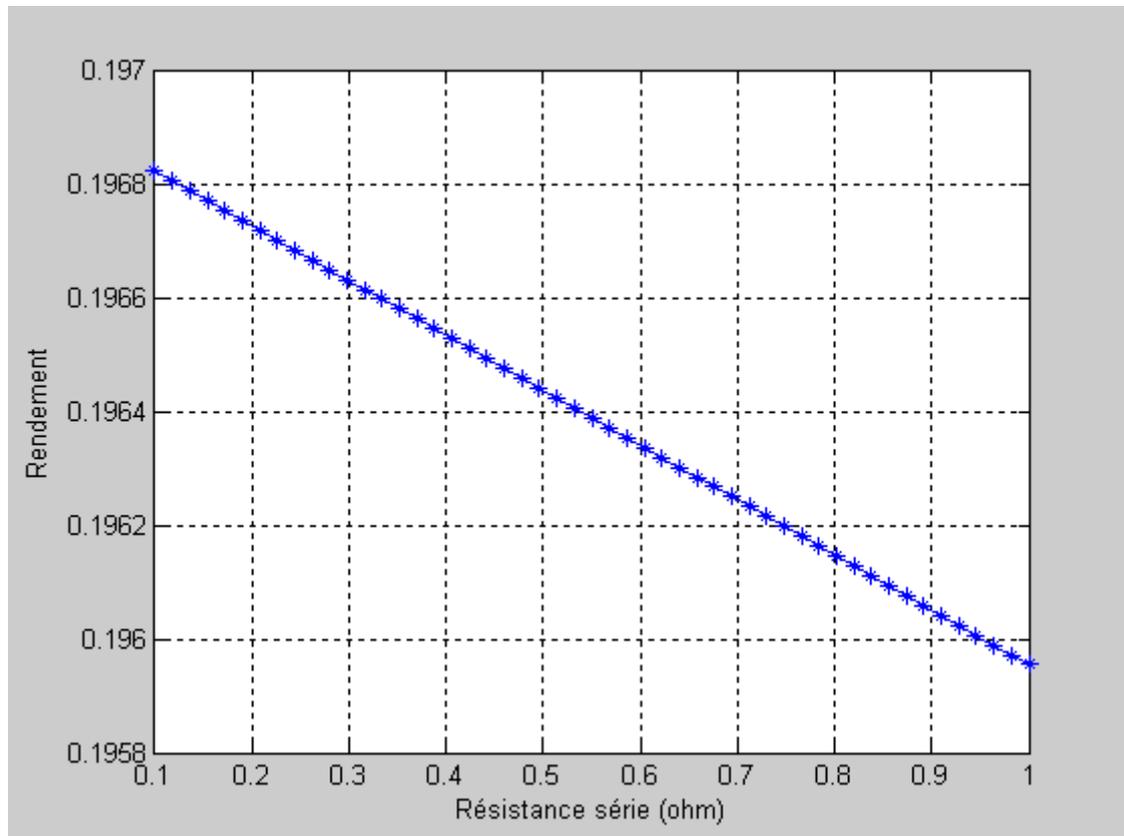


Figure (III-1 2) : Influence de la résistance série sur la performance de la cellule

La figure III-1 2 représente le rendement en fonction de la résistance série. Il diminue au fur et à mesure que la résistance série augmente. Nous avons constaté que pour un rendement maximal, une faible résistance série R_s est nécessaire ; cela est introduit par la relation entre la résistance série et le facteur de forme qui varie inversement à la résistance série.

4.1.3-Influence de résistance série dans différentes connexions

3.1-Connexion série-série

L'influence de la résistance série sur la caractéristique d'un module photovoltaïque constitué de 36 cellules solaires connectées en série-série, est représentée sur la figure (III-13), (III- 14).

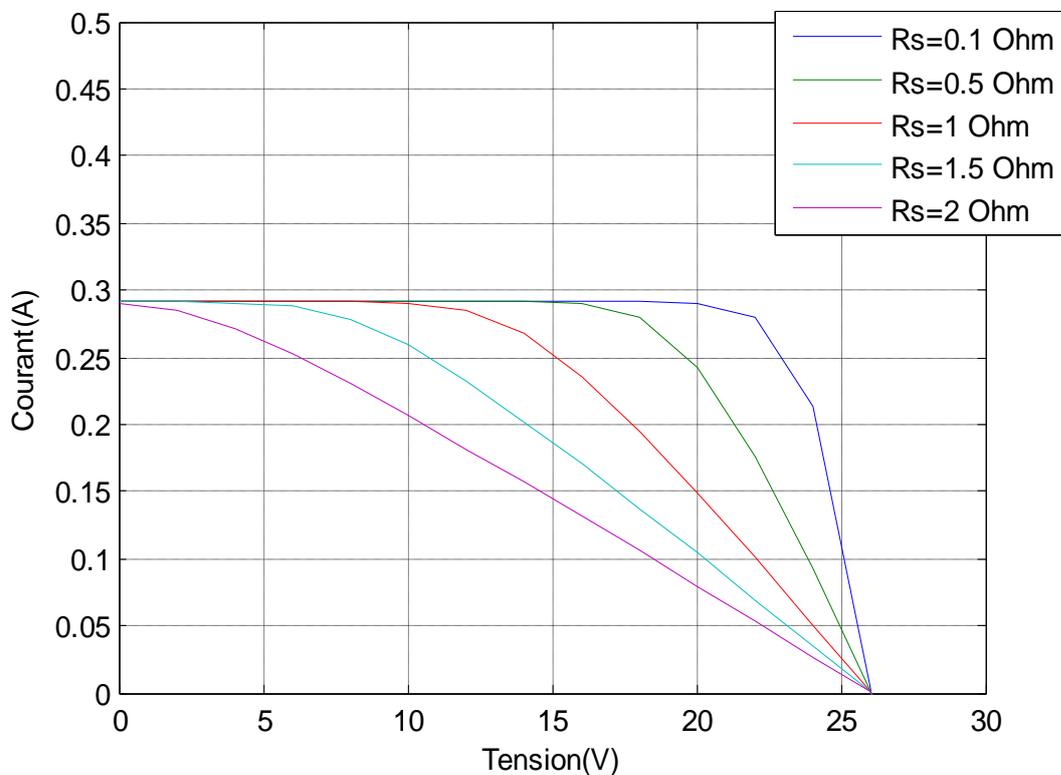


Figure (III.13) : Influence de R_s sur la caractéristique I(V) dans la connexion série-série.

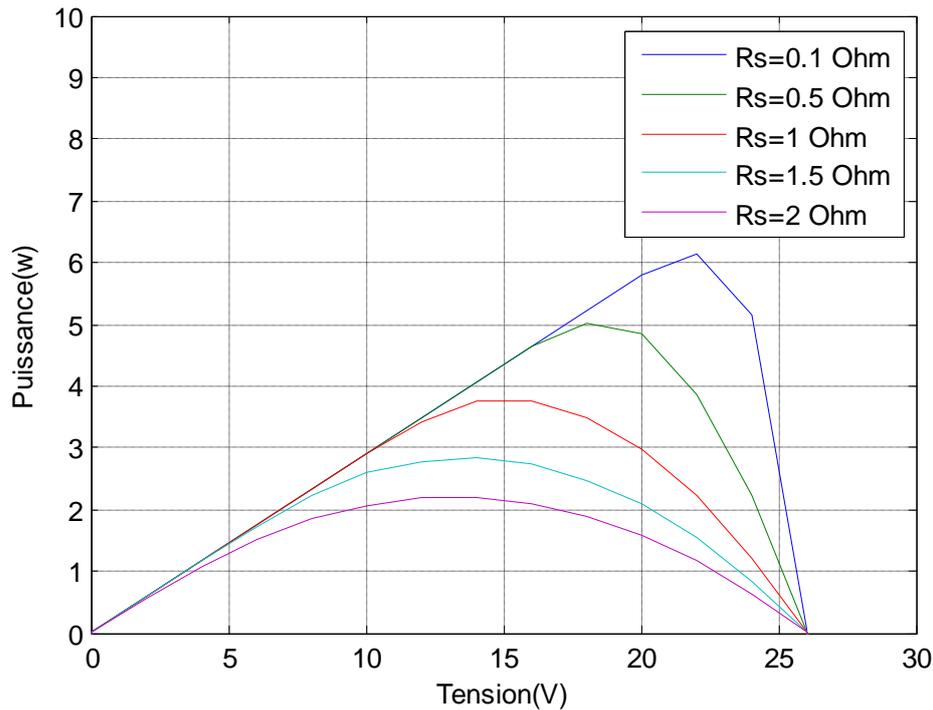


Figure (III.14) : Influence de R_s sur la caractéristique $P(V)$ dans la connexion série-série.

L'évolution de la variation de la puissance du courant et de la tension d'un module photovoltaïque en fonction de la résistance série dans la connexion série-série est illustrée par les figures III.13 et III.14. On peut remarquer que la puissance délivrée par un module photovoltaïque dépend fortement de la résistance série. En effet pour des résistances série plus élevées, on observe une décroissance sensible de la puissance.

3.2-Connexion parallèle-parallèle

L'influence de la résistance série sur la caractéristique d'un module photovoltaïque constitué de 36 cellules solaires connectées en parallèle-parallèle, est représentée sur la figure (III-15), (III- 16).

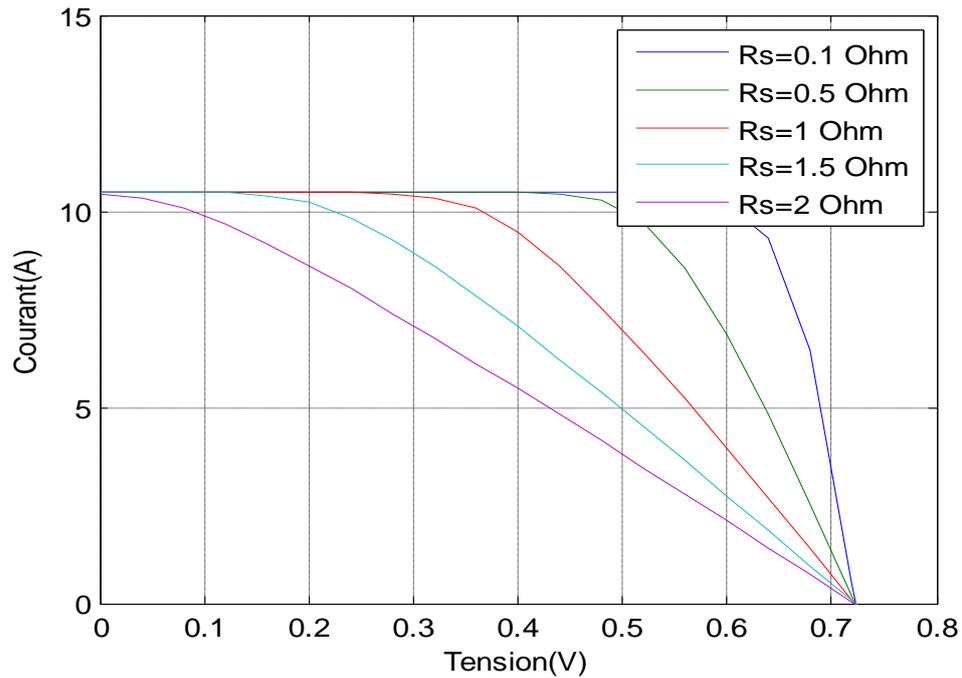


Figure (III.15) : Influence de R_s sur la caractéristique I(V) dans la connexion parallèle - parallèle.

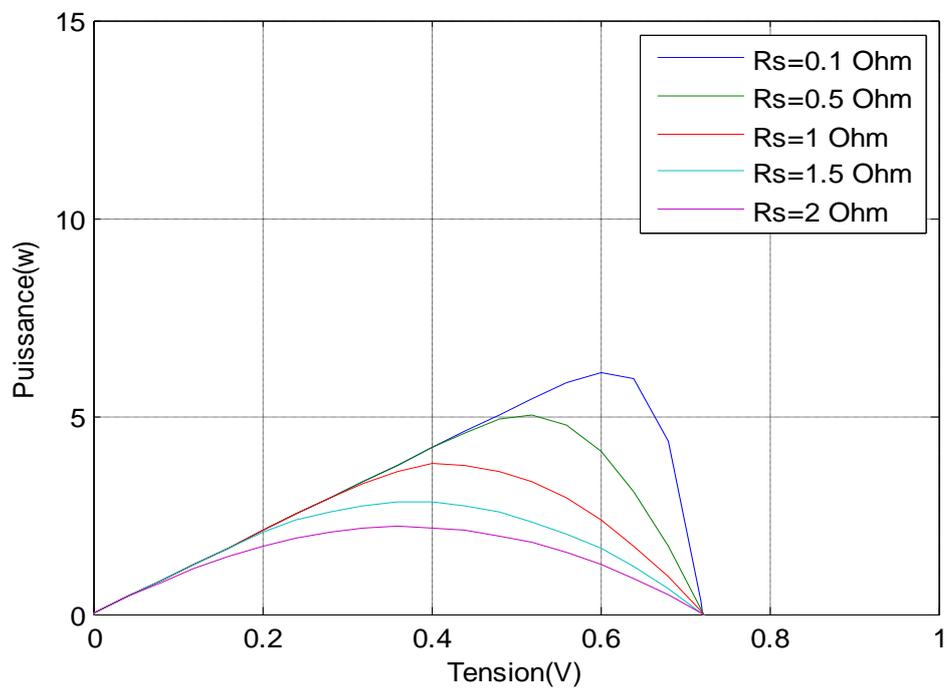


Figure (III.16) : Influence de R_s sur la caractéristique P(V) dans la connexion parallèle - parallèle.

D'après les résultats obtenus, nous pouvons conclure que la résistance série du module photovoltaïque est un facteur important dans la connexion parallèle-parallèle des cellules.

3.3-Connexion série-parallèle

L'influence de la résistance série sur la caractéristique d'un module photovoltaïque constitué de 36 cellules solaires connectées en série-parallèle, est représentée sur la figure (III- 17), (III- 18).

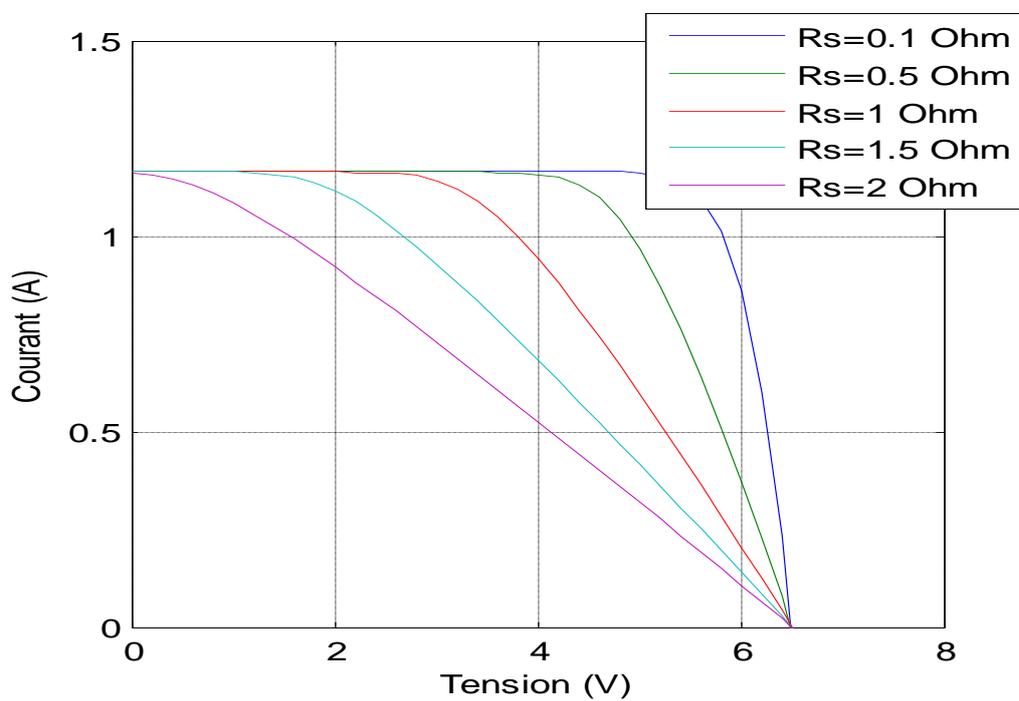


Figure (III.17) : Influence de R_s sur la caractéristique $I(V)$ dans la connexion série-parallèle.

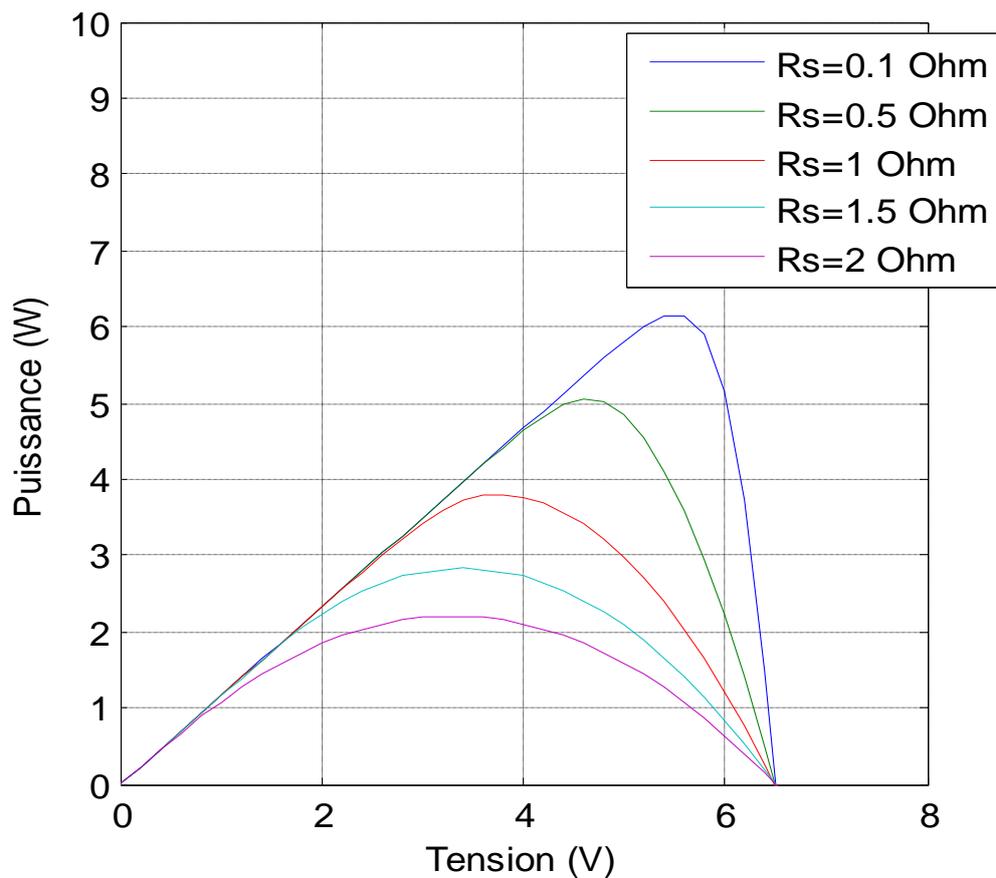


Figure (III.18) : Influence de R_s sur la caractéristique $P(V)$ dans la connexion série-parallèle.

D'après les résultats obtenus, on peut déduire que la puissance d'un module photovoltaïque dépend fortement des résistances série pour différents groupements des cellules dans le module photovoltaïque. Les cellules solaires à base de silicium monocristallin ont des rendements maxima pour les résistances de 0.1 à 0.4 Ω pour différents types de connexions de cellules.

La perte augmente avec le groupement série de cellules solaires et diminue avec une connexion parallèle. Du fait que la puissance délivrée par le module photovoltaïque augmente quand R_s diminue, la technologie actuelle essaie de minimiser la valeur de R_s .

Cette résistance diminue avec l'éclairement, de même qu'elle augmente avec la température.

Pour diminuer la résistance série R_s , un contrôle de la région éclairée, de la géométrie de la cellule et de la concentration d'impuretés est nécessaire. Pour réduire R_s , les contacts ohmiques doivent être réalisés par évaporation, ou par un placage métallique et une soudure en alliage d'indium.

III.4.2- Résistance parallèle R_p :

Les pertes causées par la présence d'une résistance de shunt, R_{sh} , sont généralement dues à des défauts de fabrication, plutôt qu'une mauvaise cellule solaire design. Une faible résistance de shunt provoque des pertes d'énergie dans les cellules solaires en offrant une autre voie actuelle de la lumière générée actuelle. Un tel détournement réduit la quantité de courant circulant dans la jonction cellule solaire et réduit la tension de la cellule solaire. L'effet d'une résistance de shunt est particulièrement grave à de faibles niveaux d'éclairement, car il y aura moins de lumière générée actuelle. La perte de ce courant à la dérivation a donc un impact plus important. En outre, aux tensions inférieures où la bonne résistance de la cellule solaire est élevée, l'impact d'une résistance en parallèle est grand.

4.2.1-Détermination de la résistance parallèle

La méthode décrite ci-dessus montre comment mesurer directement la résistance shunt d'une cellule solaire. Elle est déterminée à partir des mesures de tension des circuits ouverts et des courants courts circuits aux états très basses illuminations.

L'équation suivante peut être écrite en considérant le modèle simple du circuit lumped et la combinaison avec les conditions de court circuit et circuit ouvert :

$$I_{cc} \left(\frac{R_s}{R_{sh}} + 1 \right) - \frac{V_{co}}{R_{sh}} = I_s \left[\exp \frac{V_{co}}{n V_T} - \exp \frac{I_{cc} R_s}{n V_T} \right] \quad (\text{III-37})$$

L'équation est simplifiée quand on tient compte des approximations :

- pour la plupart des cellule solaire $R_s \ll R_{sh}$.
- dans les conditions très basses illuminations, $I_{cc} R_s$ est plus petit que $n \cdot V_T$ à condition que I_{cc} soit plus petite que 3mA.

$$I_{cc} - I_s \left[\exp \frac{V_{co}}{nV_T} - 1 \right] = \frac{V_{CO}}{R_{sh}} \quad (\text{III-38})$$

Théoriquement on peut obtenir R_{sh} par l'équation (III-38), mais seulement avec une connaissance de I_s et n .

On peut éviter n et I_s par l'application d'une approximation supplémentaire qu'à l'illumination très basse dans la limite que [17] :

$$I_s \left[\exp \frac{V_{co}}{nV_T} - 1 \right] \text{ Est négligé.}$$

L'équation devient :

$$R_{sh} = \frac{V_{CO}}{I_{cc}} \quad (\text{III-39})$$

Cette méthode est très applicable à la cellule solaire utilisée .Elle permet la mesure directe de la résistance shunt d'une cellule solaire sans avoir besoin de la connaissance antérieure de tous les autres dispositifs.

4.2.2-La puissance perdue par la résistance parallèle [31]:

$$P_{R_{sh}} = \frac{V_{mp}^2}{R_{sh}} \quad (\text{III-40})$$

$$P'_m = V_m I_m - \frac{V_m^2}{R_{sh}} = V_m I_m \left(1 - \frac{V_m}{I_m} \frac{1}{R_{sh}} \right) \quad (\text{III-41})$$

$$P'_m = P_m \left(1 - \frac{V_{co}}{I_{CC}} \frac{1}{R_{sh}} \right) \quad (\text{III-42})$$

$$P_{R_{sh}} = P_m - P'_m = P_m - P_m \left(1 - \frac{V_{co}}{I_{CC}} \frac{1}{R_{sh}} \right) \quad (\text{III-43})$$

$$P_{R_{sh}} = P_m \left(\frac{V_{co}}{I_{CC}} \frac{1}{R_{sh}} \right) \quad (\text{III-44})$$

Le taux de perte est :

$$\tau_{Rp} = \frac{P_{R_{sh}}}{P_m} = \left(\frac{V_{co}}{I_{CC}} \frac{1}{R_{sh}} \right) \quad (\text{III-45})$$

R_p augmente avec le groupement série de cellules solaires et diminue avec une connexion parallèle.

Pour une cellule au Si, la perte résultante est estimée à 3%.

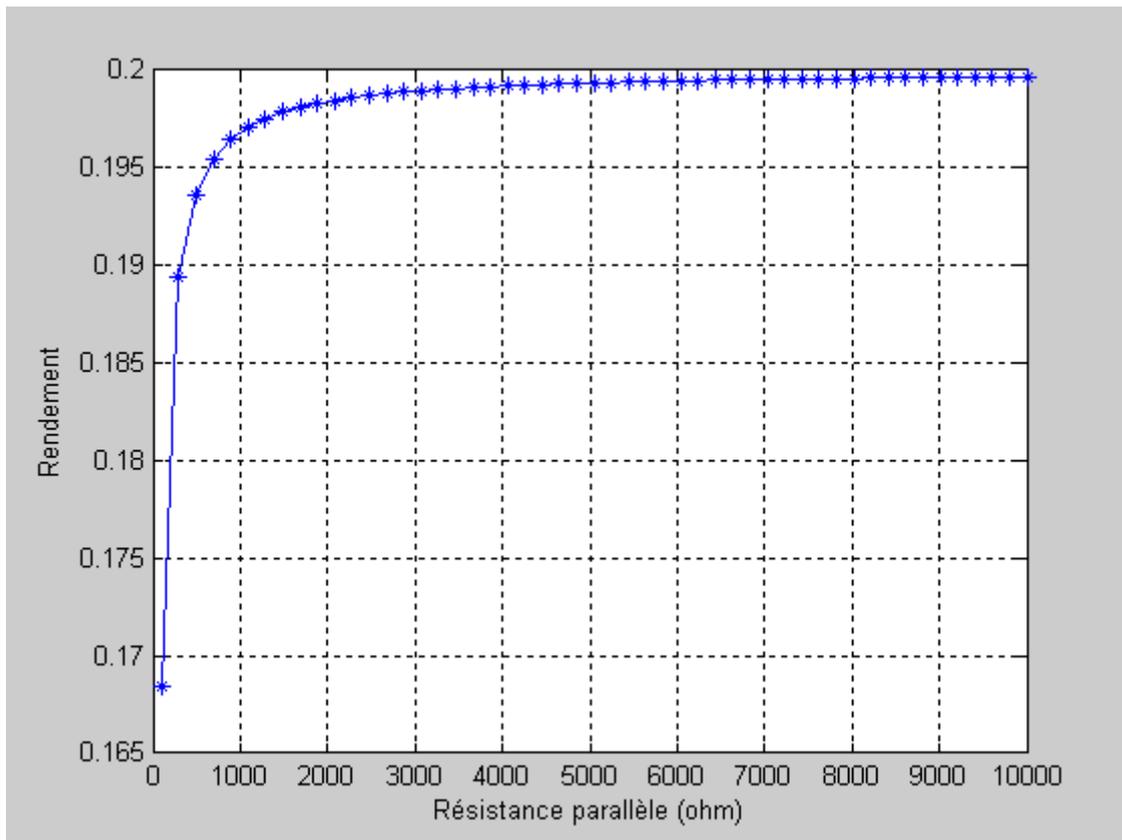


Figure (III-19) : Influence de la résistance parallèle sur la performance de la cellule

On constate que pour un rendement maximal une forte résistance parallèle R_{sh} est nécessaire parce qu'une forte résistance parallèle donne une bonne valeur de facteur de forme.

4.2.3-Influence de résistance shunt dans différentes connexions

3.1-Connexion série-série

L'influence de la résistance shunt sur la caractéristique d'un module photovoltaïque constitué de 36 cellules solaires connectées en série-série est représentée sur la figure (III-20), (III-21).

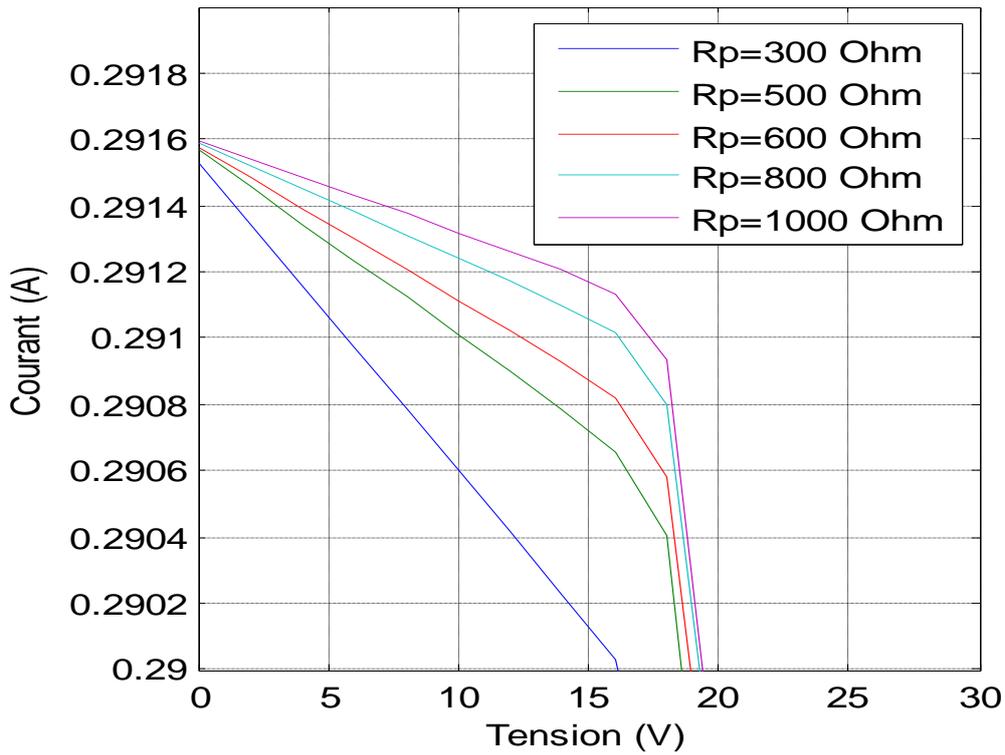


Figure (III.20) : Influence de R_p sur la caractéristique I(V) dans la connexion série- série.

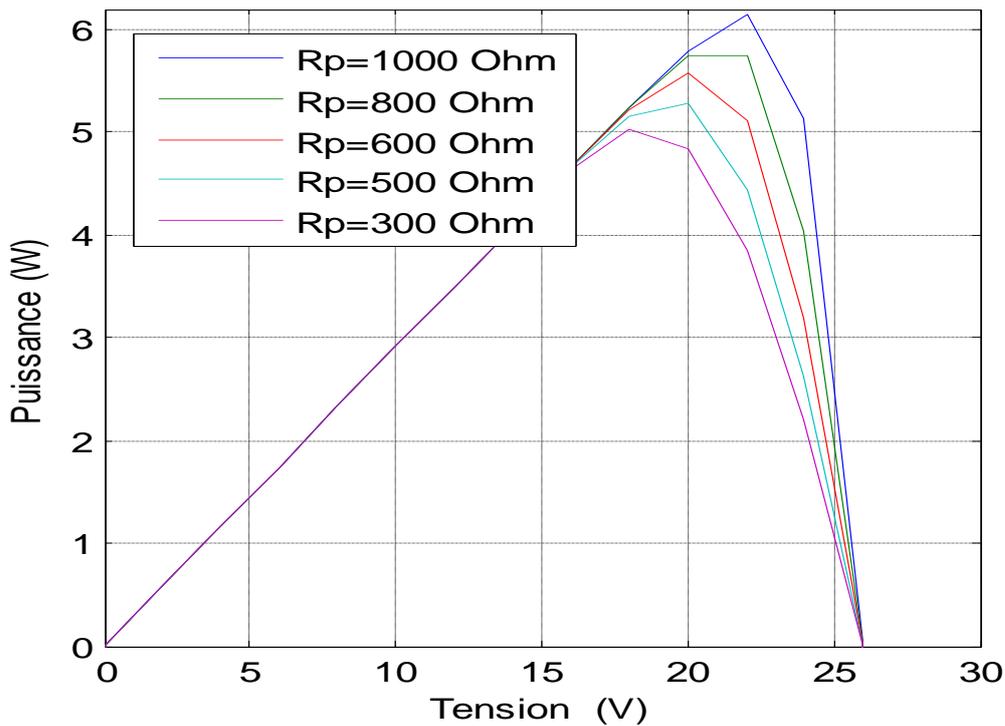


Figure (III.21) : Influence de R_p sur la caractéristique $P(V)$ dans la connexion série- série.

Nous remarquons que la caractéristique du module varie très peu en fonction de la résistance shunt dans la connexion série-série. Dans l'intervalle $[300, 1000] \Omega$ la puissance a une valeur presque constante.

3.2-Connexion parallèle-parallèle

L'influence de la résistance shunt sur la caractéristique d'un module photovoltaïque constitué de 36 cellule solaire connecte en parallèle-parallèle est représentée sur la figure (III-22), (III-23)

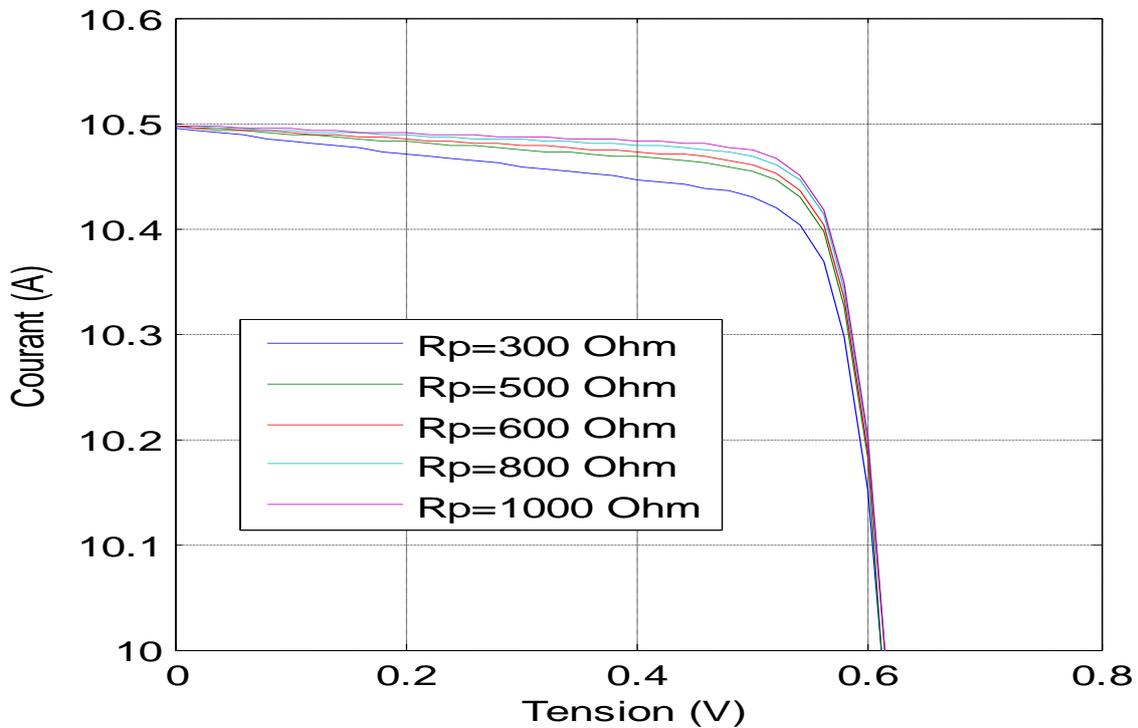


Figure (III.22) : Influence de R_p sur la caractéristique $I(V)$ dans la connexion parallèle-parallèle.

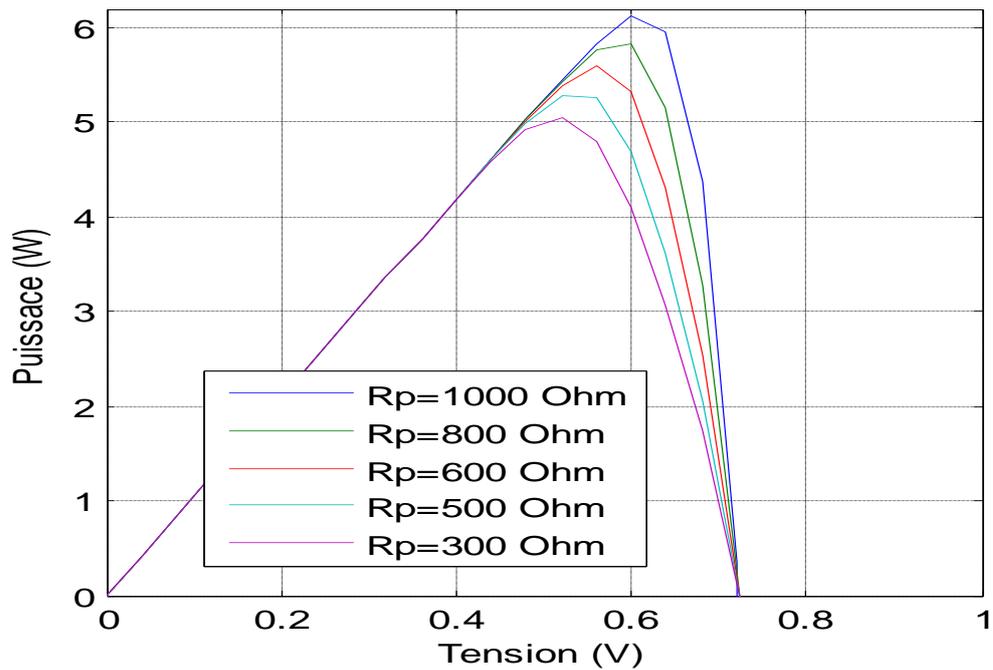


Figure (III.23) : Influence de R_p sur la caractéristique $P(V)$ dans la connexion parallèle-parallèle.

On constate que la résistance shunt est l'un des paramètres qui influe un peu sur la caractéristique du module photovoltaïque dans la connexion parallèle-parallèle des cellules solaires.

3.3-Connexion série-parallèle

L'influence de la résistance shunt sur la caractéristique d'un module photovoltaïque constitué de 36 cellules solaire connecte en série-parallèle est représentée sur la figure (III-24), (III-25).

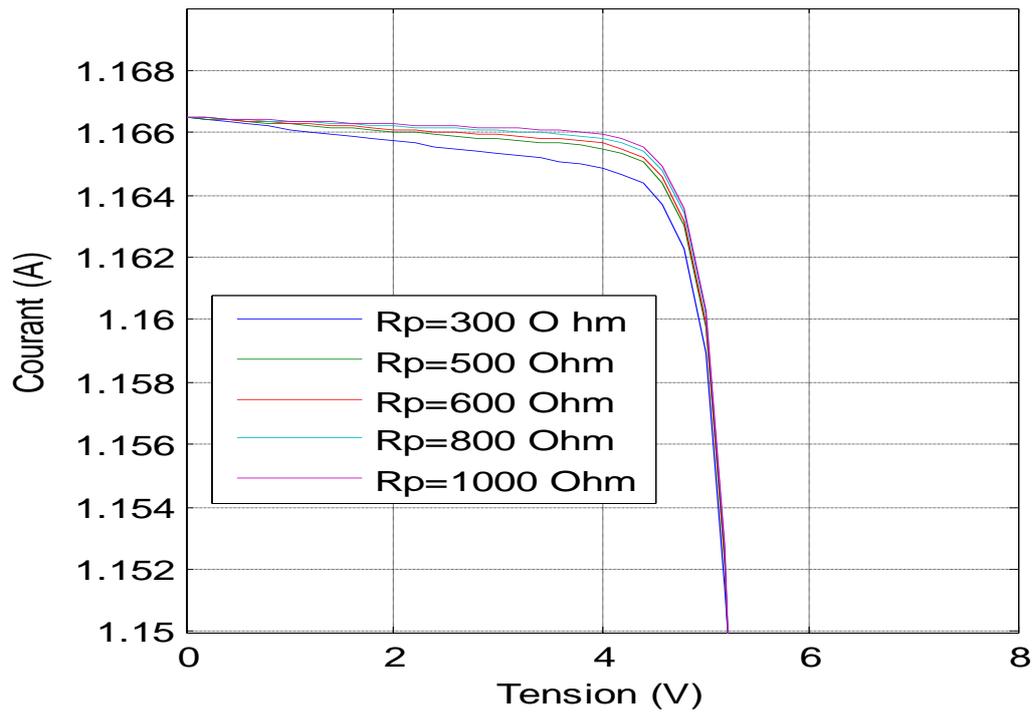


Figure (III.24) : Influence de R_p sur la caractéristique I(V) dans la connexion série-parallèle.

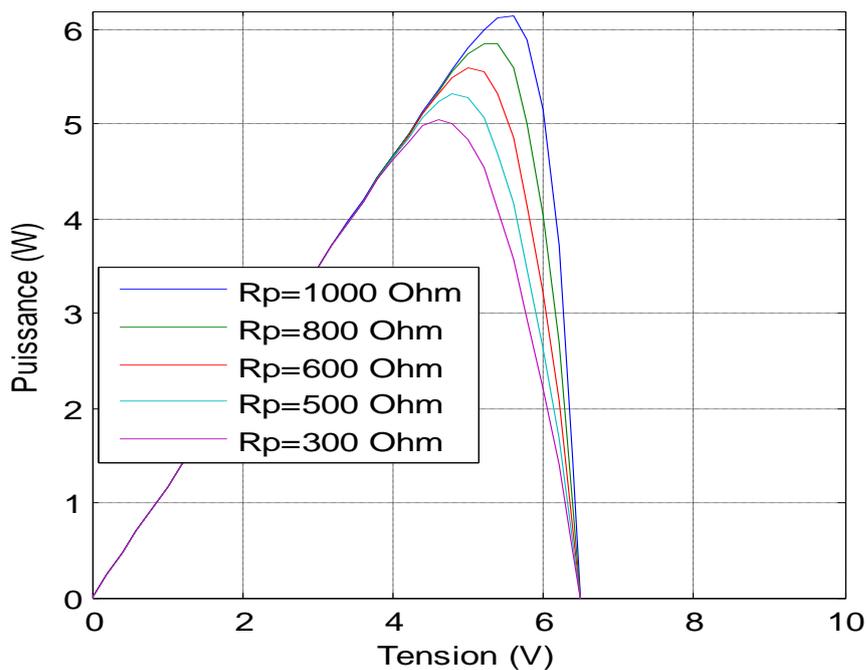


Figure (III.25) : Influence de R_p sur la caractéristique $I(V)$ dans la connexion série-parallèle.

D'après les résultats obtenus, on peut déduire que R_p augmente avec le groupement série de cellules solaires et diminue avec une connexion parallèle.

Afin d'avoir un bon rendement et réduire les pertes dues à R_p , on a qu'à minimiser l'épaisseur de la jonction et de la cellule puis déposer une couche de dioxyde de silicium.

L'influence de la résistance parallèle sur la caractéristique d'une cellule peut se traduire par une augmentation de la pente de la courbe de puissance dans la zone correspondant à un fonctionnement comme générateur à courant pratiquement constant. Ceci provient du fait qu'il faut soustraire du photocourant, outre le courant direct de diode, un courant supplémentaire de fuite donné par $I = V/R_p$.

III.5-LE RENDEMENT EN FONCTION DES DIFFERENTS FACTEUR DES PERTES:

Le rendement de conversion photovoltaïque peut être exprimé en tenant compte des facteurs de pertes [31][6] :

$$\eta = \frac{\int_0^{\lambda_c} P(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} P(\lambda) d\lambda} \cdot \frac{E_g \int_0^{\lambda_c} N_0(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} N_0(\lambda) \frac{hc}{\lambda} d\lambda} \cdot \frac{qV_{co}}{E_g} \cdot \frac{V_m I_m}{V_{co} I_{cc}} \cdot \left(1 - \left(\frac{1-n}{1+n}\right)^2\right) \cdot \left(\frac{S_t - S_m}{S_t}\right) \cdot e^{(-\alpha x)} \cdot \frac{I_{ph}}{q \int_0^{\infty} N_0(\lambda) d\lambda} \cdot \left(1 - \frac{I_{cc}}{V_{co}} R_s\right) \cdot \left(1 - \frac{V_{co}}{I_{cc}} \frac{1}{R_{sh}}\right)$$

(III-46)

III.6-PERTES PAR L'ENCAPSULATION

Le module photovoltaïque consiste en un lot de cellules, sensiblement de mêmes caractéristiques électriques, connectées entre elles puis enrobées dans une résine transparente, l'EVA. Les faces avant et arrière des cellules sont recouvertes respectivement d'un verre et d'un film multicouche étanche. La Figure 26 illustre en détail la composition du module photovoltaïque.

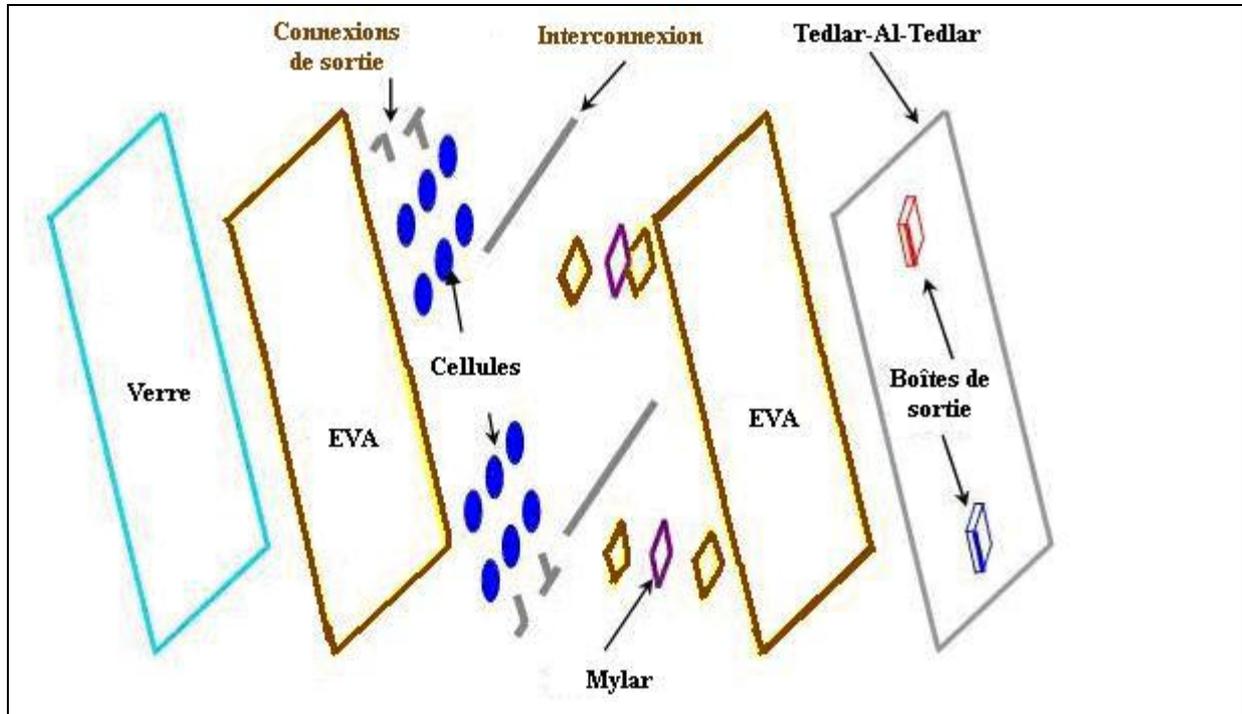


Figure (III.26) : Schéma éclaté d'un module [8].

6.1-Verre

C'est un verre trempé de 4 mm d'épaisseur avec une faible teneur en fer afin de permettre une meilleure transmission optique. Sa caractérisation avec un spectrophotomètre (Varian Cary 500 UV-VIS-NIR) montre une transmission supérieure à 95 % dans la gamme utile du spectre solaire 380 nm à 1200 nm. Sa face extérieure, traitée à l'acide fluosilicique (H_2SiF_6), est recouverte de nano pores qui piège la lumière incidente et réduit la réflexion en surface à une valeur inférieure à 8 % dans la gamme 380 nm à 1200 nm (Fig. 27 et 28) [24].

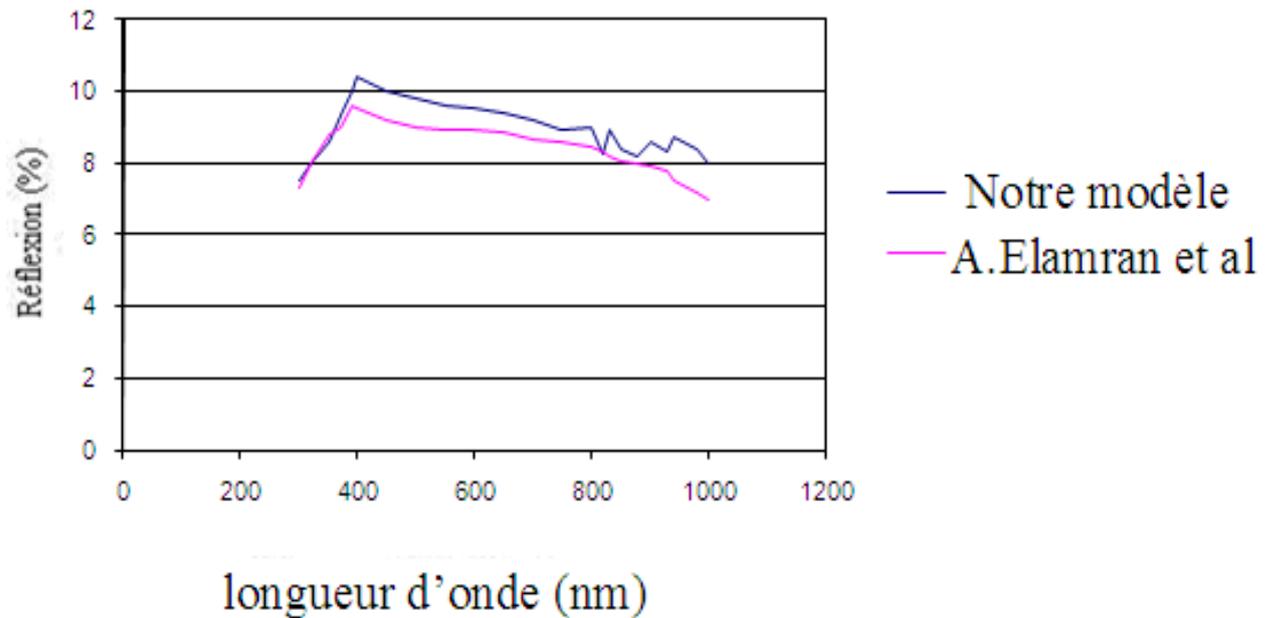


Figure (III. 27) : Spectres de réflexion du verre.

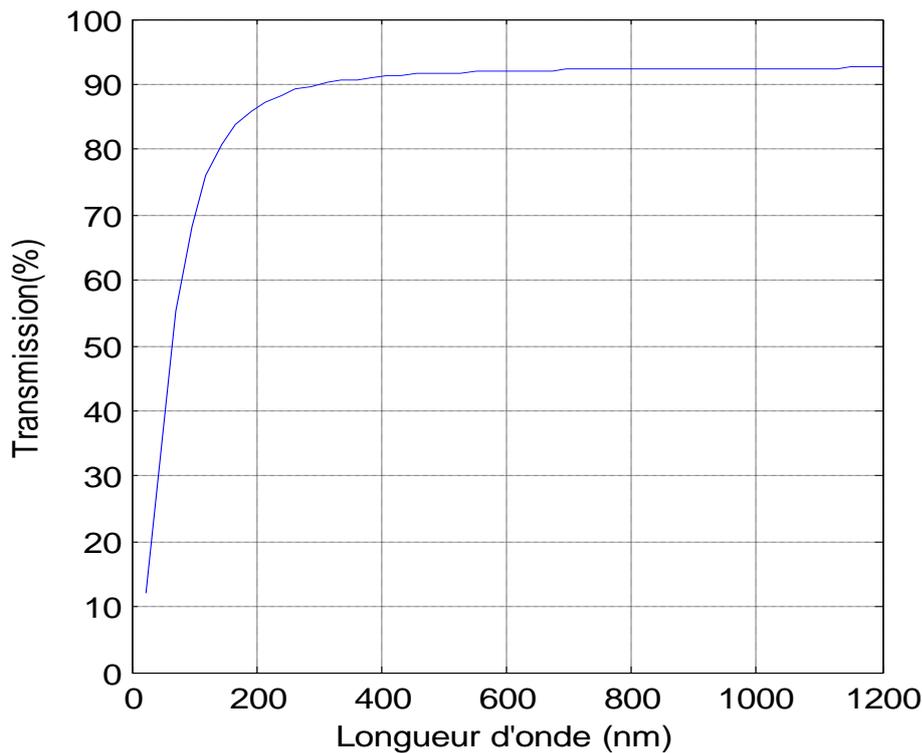


Figure (III.28) : Spectres de transmission du verre.

Les résultats obtenus sont similaires à ceux de El Amran *et al.* [12]. L'utilisation de verre dans l'encapsulation des cellules solaires donne des pertes d'environ 8% par la réflexion et 5% par la transmission. Pour cela, il faut un bon matériau pour l'encapsulation des cellules solaires.

6.2-La résine

C'est une résine transparente, thermosensible, formée de chaînes de copolymères d'éthylène et de vinyle acétate, l'E.V.A. Traitée thermiquement entre 150 et 160 °C, elle présente de grandes propriétés adhésive, diélectrique, thermique et d'étanchéité.

Les quatre caractéristiques qui ont fait de l'EVA un matériau de choix pour l'encapsulation sont:

- sa résistivité électrique très élevée le classant comme un très bon isolant électrique;
- ses températures de fusion et de polymérisation relativement faibles;
- son très faible taux d'absorption d'eau;
- sa bonne transmission optique.

Composition de l'E.V.A.

Caractéristiques	Valeur
Densité	0.957 g/cc
Epaisseur	≈ 0.45 mm
Elongation de rupture	900 – 1100 %
Module d'élasticité	4.8 MPa
Résistivité électrique	$10^{14} \Omega/\text{cm}$
Indice de fusion	4.3 g/min
Point de fusion	110 °C
Absorption d'eau	0.05 % - 0.13 %

Tableau III.4. Composition de L'E.V.A [24].

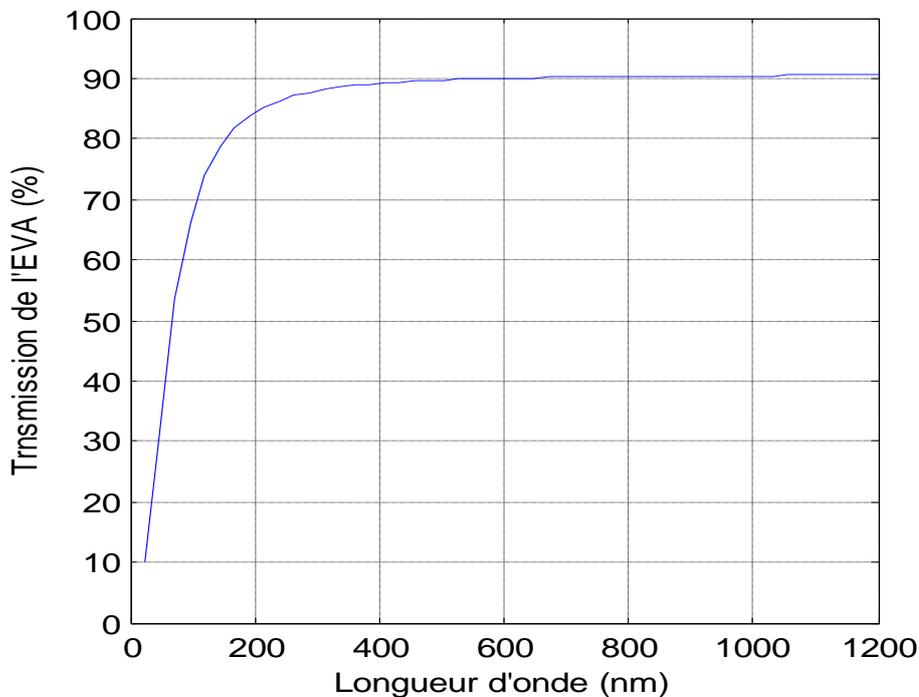


Figure (III.29) : Spectres de transmission de l'EVA

La résine de l'EVA devient alors transparente, avec un indice de réfraction proche de celui du verre, ce qui évite les pertes optiques ; d'où une transmission optique supérieure à 92 % identique à celle du verre dans la gamme 400 nm à 1100 nm.

III.7-OMBRAGE

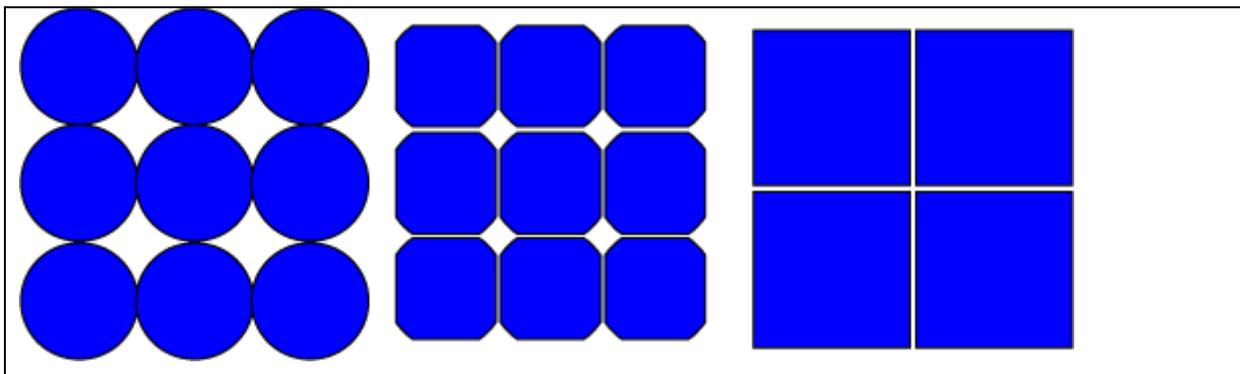
7.1-Taux d'ombre due aux pertes causées par la surface inactive dans le module

Du point de vue optique, le taux de couverture d'un module photovoltaïque doit être faible, car la surface des cellules, cachée par la métallisation, est inactive ; tout comme la surface du module qui n'est pas recouverte par les cellules est inactive. Du point de vue électrique, le taux d'ombre est défini comme le rapport de la surface inactive à la surface totale :

Cheknane dans sa thèse s'est intéressé à calculer le taux d'ombre de la cellule. Dans notre cas, nous avons calculé le taux d'ombre dans un module [2].

La densité des cellules dans un module photovoltaïque se réfère à la zone du module qui est recouverte de cellules solaires par rapport à ce qui est en blanc.

La densité d'emballage affecte la puissance de sortie du module ainsi que sa température de fonctionnement. La densité d'emballage dépend de la forme des cellules solaires utilisées. Par exemple, les cellules solaires monocristallines sont rondes ou semi-carrées.



Figure(III.30) : Forme des cellules [12]

La modélisation de la perte causée par le taux de remplissage de cellules solaires de la forme semi-carrée dans un module est comme suit :

X

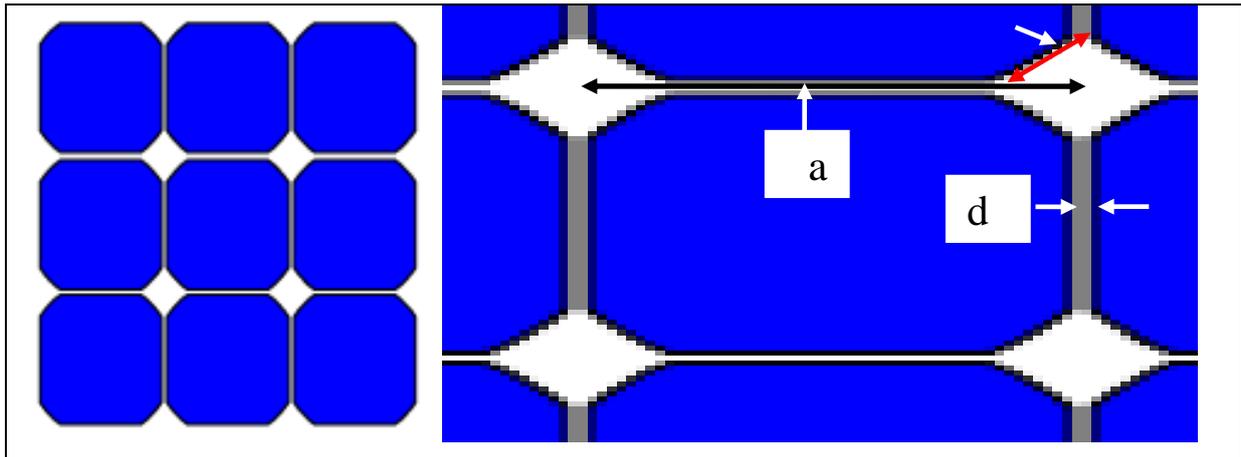


Figure (III.31) : Le taux de remplissage dans un module photovoltaïque

Le taux de remplissage de cellules

$$\text{Où } \tau = 1 - \frac{x^2 + 2da}{a^2} \quad (\text{III.47})$$

d : l'espace entre les cellules ;

x : côté de petits carrés entre les sommets des cellules.

Donc les pertes dans un module causées par la surface inactive est donnée par la relation suivante :

$$\tau = \frac{x^2 + 2da}{a^2} + \tau_{m_{cellule}} \quad (\text{III.48})$$

$\tau_{m_{cellule}}$: sont les pertes par métallisation dans la cellule

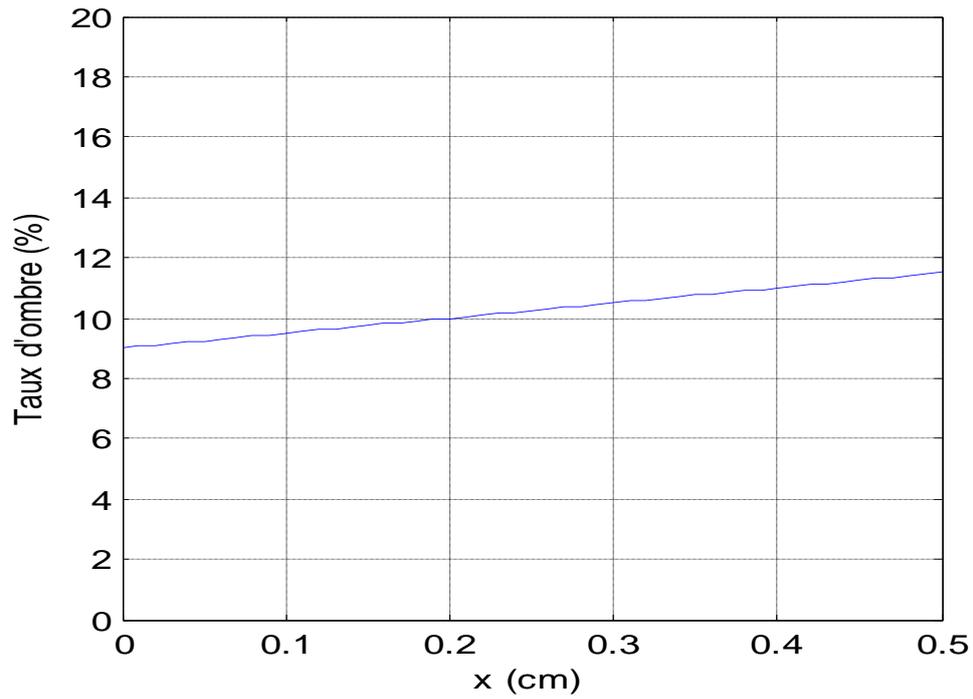


Figure (III.32) : Variation de taux d’ombre d’un module photovoltaïque en fonction de cote de carre entre le sommet de cellules.

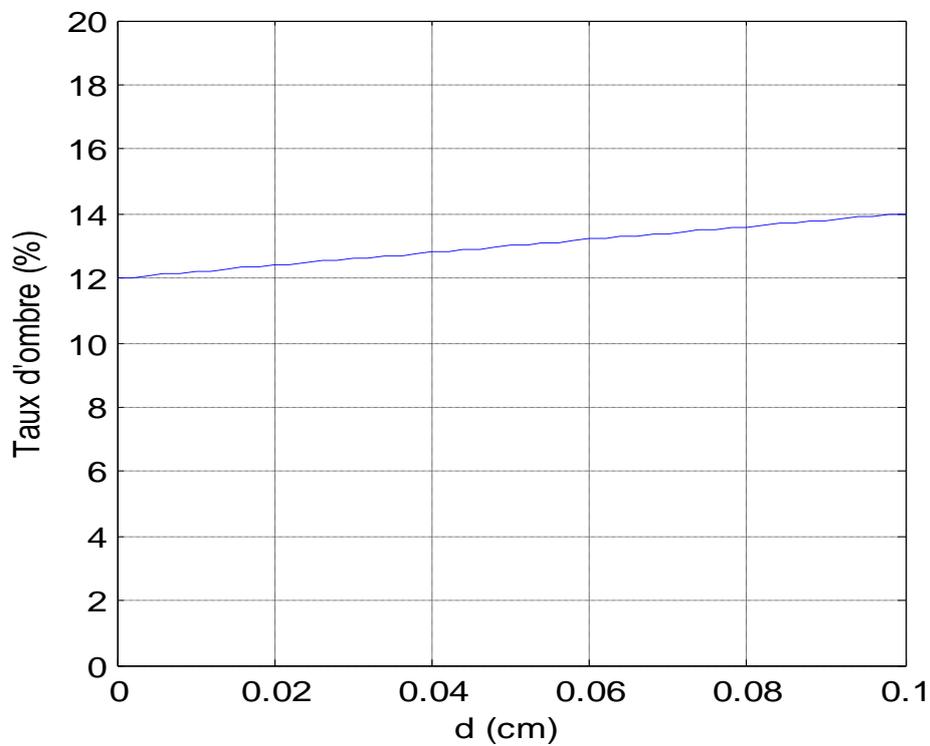


Figure (III.33) : Variation de taux d’ombre d’un module photovoltaïque en fonction de l’espace entre les cellules.

En plus de la surface métallisée dans les cellules, on trouve aussi la surface entre les sommets des cellules lors de la mise en série et/ou parallèle pour fabriquer le module PV. Pour cela, les pertes par l'ombre causées par la métallisation dans le module restent toujours plus grandes que celles d'une cellule.

7.2-PERTES PAR OMBRAGE CAUSEES PAR ENVIRONNEMENT D'UN MODULE

L'environnement d'un module photovoltaïque peut inclure des arbres, montagnes, murs, bâtiments, etc. Il peut provoquer des ombrages sur le module ce qui affecte directement l'énergie collectée.

Les modules photovoltaïques sont très sensibles à l'ombrage. Contrairement aux panneaux solaires thermiques qui peuvent tolérer un peu d'ombrage, les modules photovoltaïques ne peuvent être occultés, principalement à cause des connections électriques (en série) entre les cellules et entre les modules [7].

On distingue 2 types d'ombrage : l'ombrage total et l'ombrage partiel.

L'ombrage complet empêche tout rayonnement (direct et indirect) d'atteindre une partie de cellule photovoltaïque (par exemple, une déjection d'oiseau, une branche d'arbre sur le panneau, une couverture). L'ombrage partiel empêche seulement le rayonnement direct d'atteindre une partie de la cellule photovoltaïque (par exemple, une cheminée, un arbre, un nuage).

Souvent, les cellules d'un module photovoltaïque sont connectées en série. Ainsi, la cellule la plus faible va déterminer et limiter la puissance des autres cellules. L'ombrage de la moitié d'une cellule ou de la moitié d'une rangée de cellule diminuera la puissance proportionnellement au pourcentage de la surface ombrée d'une cellule, dans ce cas de 50%. L'ombrage total d'une rangée de cellules peut réduire à zéro la puissance du module.

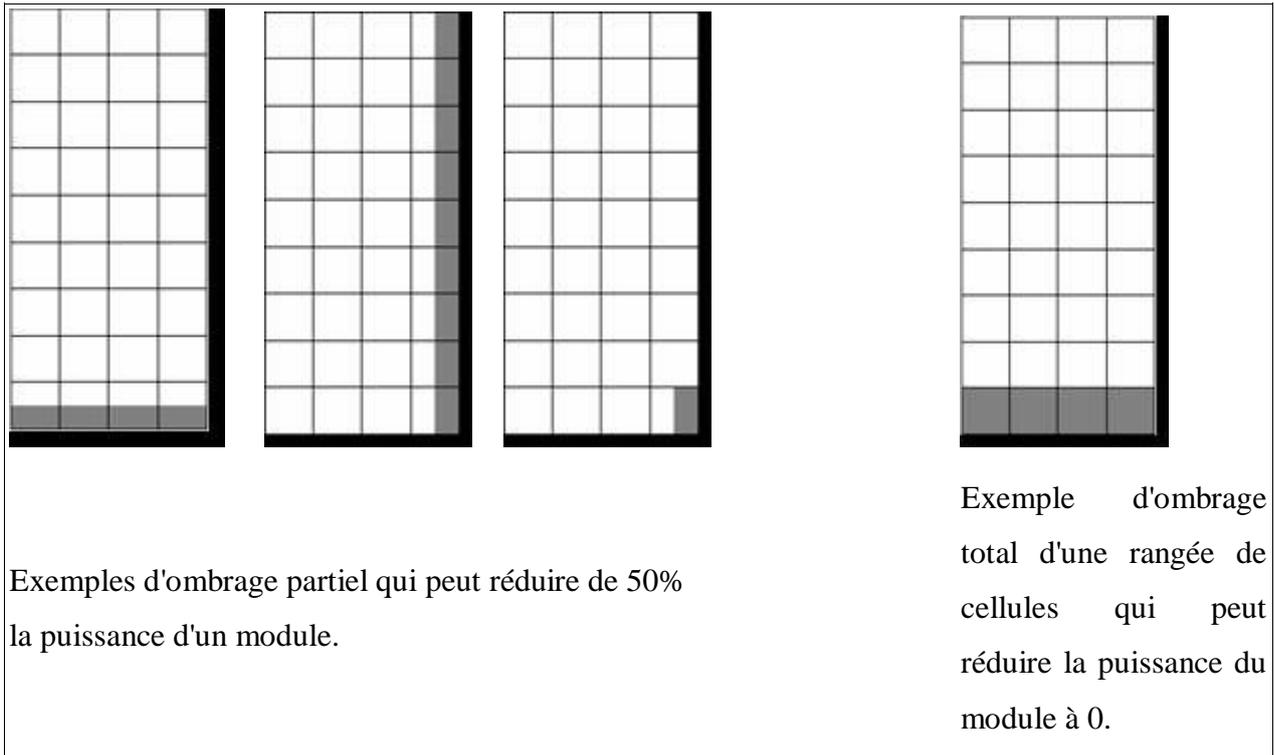


Figure (III.34) : Exemples d'ombrage dans les modules photovoltaïques

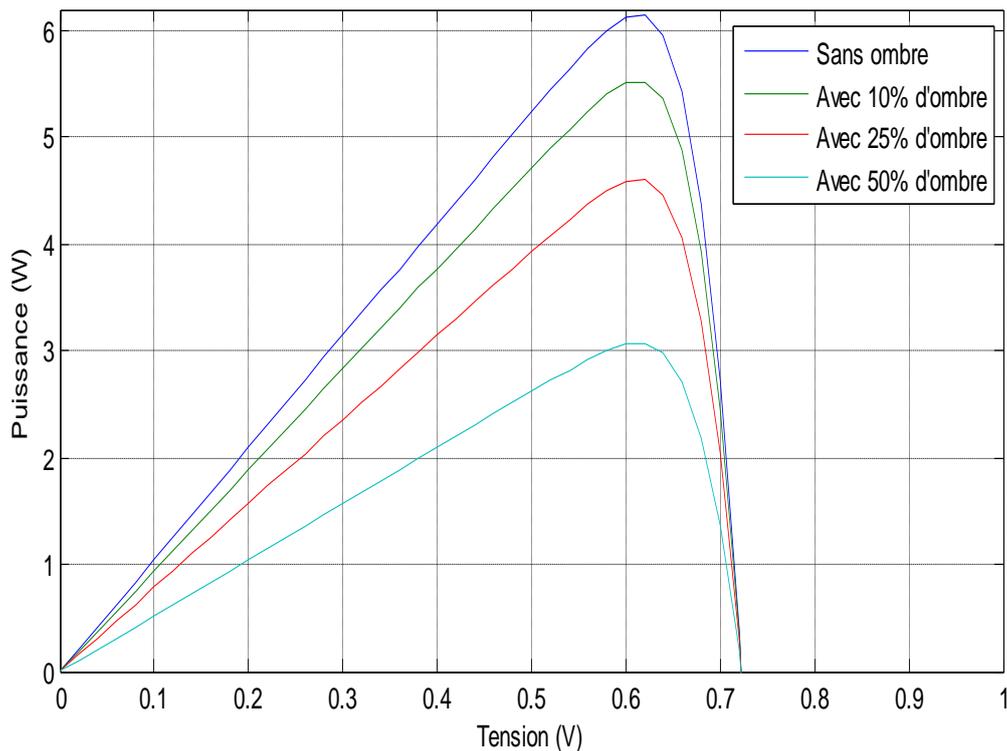


Figure (III.35) : Variation de puissance avec le taux d'ombre

Pour ces raisons, il conviendra de choisir un endroit approprié pour l'installation d'un système photovoltaïque où il y a, le moins d'ombrage possible. Si des obstacles présents autour d'une installation photovoltaïque ne peuvent être évités, la conception du système devra permettre d'atténuer les conséquences de ces obstacles sur le rendement.

7. 3-les problèmes d'ombrage sur une installation photovoltaïque [8]

1. Endommagement des modules par effet "point chaud"
2. Perte importante de production électrique

3.1-Endommagement des modules par effet "point chaud"

Quand une partie d'un groupe photovoltaïque est ombrée, cette partie sous-irradiée du module peut se trouver polarisée en inverse. Cela signifie concrètement que la partie sous-irradiée ne se comporte plus comme un générateur électrique mais comme un récepteur (résistance). Alors qu'un générateur délivre de l'énergie, un récepteur la dissipe. La partie sous-irradiée va

donc se comporter en récepteur en dissipant une certaine puissance sous forme de chaleur, ce qui va provoquer un échauffement de la zone sous-irradiée.

Cet échauffement local peut donner lieu à des points chauds qui peuvent endommager la zone affectée et dégrader définitivement les performances du module photovoltaïque. Pour éviter ces effets indésirables, des diodes by-pass sont associées à un sous-réseau de cellules, comme illustré sur le schéma ci-dessous:

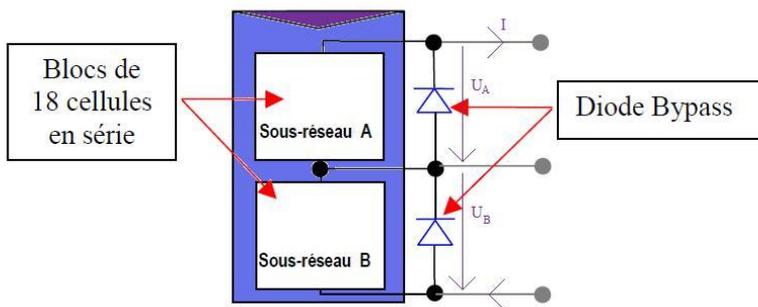


Figure (III.36) : diodes by-pass associées a un sous-reseau de cellules

Un module photovoltaïque est composé de plusieurs cellules photovoltaïques. Afin d'éviter les phénomènes de point chauds, les cellules photovoltaïques sont associées par groupe de 18 à une diode by-pass.

En mode normal, la tension aux bornes de la diode by-pass est positive (ce qui signifie que le groupe de 18 cellules fonctionnent en mode générateur); la diode se comporte alors comme un interrupteur ouvert. Lorsque le groupe de 18 cellules se comportent en récepteur, la tension aux bornes de la diode est négative (inversion de polarité); la diode se comporte alors comme un interrupteur fermé et elle court-circuite le groupe de 18 cellules.

3.2-Perte importante de production électrique

Les diodes by-pass court-circuitent un groupe de plusieurs cellules (18 en général) d'un module photovoltaïque lorsque celui-ci est à l'ombre. De ce fait, la partie de l'installation photovoltaïque mise hors service ne délivre plus d'énergie. La production de l'installation est donc atténuée.

Un module photovoltaïque est généralement composé de 36 cellules photovoltaïques, distribuées en 2 sous-réseaux. Chacun de ces deux sous-réseaux est composé de 18 cellules photovoltaïques et d'une diode by-pass.

Lorsqu'une cellule est à l'ombre, la diode by-pass court-circuite automatiquement le sous-réseau (afin d'éviter les points chauds). La conséquence directe est qu'une partie du module est hors-service. Il suffit donc qu'une seule cellule soit à l'ombre pour stopper la production d'un sous-réseau entier.

III.8-CONCLUSION :

Dans ce chapitre nous avons donné les modèles fondamentaux des différentes pertes dans une cellule photovoltaïque à base de silicium monocristallin tout en les simulant. Nous avons mis l'accent sur les pertes qui se produisent à la suite de l'interconnexion et l'encapsulation des cellules dans le module, et les taux d'ombre causées par la métallisation ou le taux de remplissage de cellules dans le module et à l'environnement d'un module. Nous avons trouvé que certains facteurs ont des limites fondamentales sur lesquelles on ne peut pas intervenir. D'autres facteurs sont d'ordres technologiques et peuvent être optimisés. Nous avons donné un modèle mathématique du rendement d'une cellule en fonction de ces différents paramètres. Nous avons trouvé qu'environ 10% de puissance sont perdues par l'encapsulation des cellules solaires par réflexion et transmission de lumière. En outre, nous remarquons que la puissance d'un module est proportionnelle au pourcentage de la surface ombrée d'une cellule. Nous avons simulé les effets des pertes ohmiques pour différentes connexions, les résultats montrent que la connexion série-série permet d'obtenir le meilleur rendement.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Conclusion générale et perspectives

La production mondiale d'énergie photovoltaïque augmente de façon importante depuis plusieurs années mais son développement reste limité par son rendement faible.

Le travail présenté dans ce mémoire concerne les différentes pertes qui influent ce rendement, plus particulièrement les pertes dans un module photovoltaïque à base de silicium monocristallin.

Si la photopile permet de produire de l'électricité avec un peu de perte, les dispositifs photovoltaïques seraient très efficaces. Différentes pertes viennent influencer le rendement d'une cellule. Elles sont dans la plus part des cas dues à des pertes fondamentales (pertes par les photons de grande longueur d'onde du spectre solaire, pertes par énergie excédentaires des photons, facteur de tension) et à des pertes technologiques (Réflexion, absorption incomplète, ...).

La simulation numérique a été largement utilisée dans le cadre de ce travail afin d'étudier les paramètres les plus importants sur le fonctionnement des cellules solaires.

Afin d'optimiser le rendement des modules photovoltaïques, nous avons utilisé dans un premier temps un logiciel Matlab /Simulink pour simuler numériquement la perte en fonction des divers paramètres de la cellule qui peuvent influencer sur le rendement.

Nous avons simulé un modèle de cellule solaire, à base de silicium monocristallin, sous Simulink et donné les paramètres de cette dernière. Ensuite, l'influence de la température et de l'éclairement sur le comportement de cette cellule solaire a été étudiée pour bien visualiser les effets des différentes pertes sur le rendement énergétique de conversion du système photovoltaïque. Cela a fait l'objet des chapitres trois et quatre du présent mémoire.

Dans le chapitre trois, des simulations sous Matlab /Simulink ont précisé les influences des différentes pertes qui peuvent être trouvées au niveau d'une cellule. Nous avons obtenu les résultats suivants pour les pertes :

- absorption incomplète [15-35%] en fonction de la longueur d'onde ;
- excès d'énergie par rapport au gap [0-20%] ;
- réflexion par la surface 30% ;
- perte de surface active par les grilles [7-9%] ;
- perte de collecte [0.2-2%] ;
- perte de facteur de tension [11-25%] ;
- perte par résistance série [6-9%] ;
- perte par résistance shunt [1.6-2%].

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Nous avons mis en exergue les pertes qui se produisent à la suite de l'interconnexion et de l'encapsulation de ces cellules dans le module. Les taux d'ombre dus aux pertes causées par la métallisation et l'environnement du module ainsi que par le taux de remplissage des cellules ont été étudiés. Nous avons trouvé que à-peu-près 10% de puissance sont perdues par l'encapsulation des cellules solaires par réflexion et transmission de lumière, et que la puissance d'un module est proportionnelle au pourcentage de la surface ombrée d'une cellule.

PERSPECTIVES

Les travaux présentés dans ce mémoire ont permis de voir des perspectives à moyen et long terme. Ainsi la poursuite des travaux de recherche pourrait se faire selon trois axes :

- 1) réduction des pertes optiques,
- 2) réduction des pertes par effet joule,
- 3) réduction des pertes par ombrage,

Il y a plusieurs chemins pour réduire les pertes optiques, par exemple:

- diminuer la réflectivité de la surface de la cellule par la texturation,
- utilisation des couches Anti-réflexion sur la surface du sommet de la cellule,
- la cellule solaire peut être plus épaisse pour augmenter l'absorption.
- augmentation de la longueur de la trajectoire optique dans la cellule solaire par une combinaison de texturation de la surface et piégeage de la lumière,
- minimisation du contact du sommet de la surface de la cellule,
- utilisation des matériaux très transparents dans l'encapsulation.

La minimisation des pertes par effet joule se réalise par la minimisation des pertes par conduction soit par :

- diminution de la résistance élémentaire de doigt par la minimisation de leur épaisseur ou leur largeur. Il en est de même pour la résistance élémentaire de la ligne collectrice.
- diminution de la résistance de contact entre metal/semiconducteur par la minimisation de surface de collecte métallique, qui assure le contact métal/semi-conducteur.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Pour réduire les pertes par ombrage causées par l'environnement d'une installation, il convient de choisir un endroit approprié pour l'installation d'un système photovoltaïque où il y a, le moins d'ombrage possible. En augmentant le nombre de diodes by-pass, on protège et on améliore nettement le rendement des modules en conditions réelles d'ombrage partiel (nuages, arbres, bâtiments, neige, etc.). Idéalement, il faudrait une diode by-pass par cellule. Les cellules doivent être emballées de sorte à avoir leur plus grande densité dans le module.

- [1] B. Ben Abdallah Nadia, « Propriétés physiques des semi-conducteurs (Si monocristallin et Ge) et Simulation des cellules solaires à base de Si et SiGe », thèse de magister, Université de Tlemcen Juillet 2006.
- [2] A. Cheknane , B. Benyoucef , J.P. Charles et R. Zerdoum , «Optimisation et Conception d'une Grille Collectrice Appliquée aux Photopiles Fonctionnant sous Haute Concentration Solaire», Revue énergies renouvelables Vol. 7 (2004) 95-108.
- [3] M. Rachid, «application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah», thèse de magister, Université de Tlemcen décembre 2005.
- [4] A.Labouret, P.Cumunel et J-P.Braun et B.Faraggi, «cellules solaires les bases de l'énergie photovoltaïque», Dunod ,3^e édition, Paris, 2001.
- [5] T. Baghdadli, A. Zerga et B. Benyoucef, «Optimisation du Rendement de Conversion Photovoltaïque des Cellules Solaires à base de GaAs et de Si», Revue énergies renouvelables : Valorisation (1999) 27-31.
- [6] K. Ammous, «contribution a la construction systématique de modèles moyen de convertisseurs de puissance», thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon, Décembre 2002.
- [7] <http://www.ef4.be/fr/photovoltaïque>.
- [8] <http://www.photovoltaïque.guidenr.fr>.
- [9] G.Tchuilieu «énergie renouvelable et cogénération pour le développement durable en Afrique », séminaire atelier Cameroun 2002.
- [10] N.Oleksiy, «Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïque à contacts arrière interdigités», thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon, mai 2005.
- [11] B. Mouna «Etude des matériaux semi-conducteurs III-V Application à la conversion photovoltaïque», Thèse de Magister, Université de Batna, octobre 2007.
- [12] A. El Amrani, A. Mahrane, F.Y. Moussa et Y. Boukennous «Procédé d'encapsulation des modules photovoltaïques type mono-verre», Revue énergies renouvelables Valorisation (2006) 37-42.
- [13] S. Quoizola , «Epitaxie en phase vapeur de silicium sur silicium mesoporeux pour report sur substrats économiques et application photovoltaïque base coût », thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon,2003.
- [14] M. Angel Cid Pastor, «conception et réalisation de modules photovoltaïque électronique», thèse de doctorat, l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, septembre 2006.

- [15] G. Walker, «Evaluating MPPT converter topologies using a Matlab PV model », University of Queensland, Australia.
- [16] A. Hemmani, A. Helmaoui. « Étude numérique de performance des cellules solaires à hétérojonction nGa_{1-x}Al_xAs-(p-n GaAs) », 8ème Séminaire International sur la Physique Energétique, Centre Universitaire de Béchar–Algérie, 11 et 12 Novembre 2006.
- [17] R. Samia, «caractérisation courant tension des jonctions PN, Schottky et des cellules photovoltaïque», thèse de magister, université de Tlemcen, mai 2004.
- [18] S. Inchirah, «contribution à l'étude de la caractéristique courant tension de cellules solaires fonctionnant sous éclairement et l'obscurité», thèse de magister, université de Tlemcen, 2003.
- [19] A. Labouret, M. Viloz, « énergie solaire photovoltaïque », Dunod, 3eme édition, Paris 2006.
- [20] A. Ricaud, « photopile solaire 'de la physique de la conversion photovoltaïque, matériaux et procédés», première édition 1997 presses polytechniques et universités romandes
- [21] B. Halima, B. Samia, «estimation des énergies incidents et fournies par un module photovoltaïque», mémoire de DES, université de Tlemcen, juin 2001.
- [22] H. Mathieu, T. Bretagnon, P. Lefebvre, «physique des semi-conducteurs et des composants électriques», Dunod, Paris, 2001.
- [23] A. Zerga, F. Benyarou et B. Benyoucef, «Optimisation du Rendement d'une Cellule Solaire N+P au Silicium Monocristallin», Revue énergies renouvelables : (1998) 95 – 100.
- [24] A. El Amrani, A. Mahrane, F.Y. Moussa et Y. Boukennous «Procédé d'encapsulation des modules photovoltaïques type mono-verre», Revue énergies renouvelables : Valorisation (2006) 37-42.
- [25] http://www.solutek.be/la_cellule_photovoltaique_013.htm
- [26] A. Manuel, «Atelier d'outils informatiques pour la physique (Eléments de MATLAB) », université de Genève, 15 Octobre 2004.
- [27] Simulation de systèmes dynamiques Matlab et Simulink, septembre, 2000.
- [28] www.tpepanneauxsolaires.fr
- [29] www.ines-solaire.com
- [30] M. Madani, « réalisation des couches antireflets dans les cellules solaires à couche minces », thèse de magister, université de Tlemcen, 2006.
- [31] <http://www.udel.edu/igert/pvcdrom/index.html>
- [32] <http://www.lte-fr.com>
- [33] <http://www.ef4.be/fr/photovoltaique/aspects-techniques>

- [34] http://fr.ekopedia.org/Cellules_photovolta
- [35] <http://lenergie-solaire.fr/energie-solaire-photovoltaique.php>
- [36] Les fiches techniques PRISME (Programme International de Soutien à la Maîtrise de l'Énergie). janvier 2008
- [37] <http://das.ensica.fr/IMG/pdf/PIPVoitureSolaire.pdf>.
- [38] <http://www.lei.ucl.ac.be/multimedia/eLEE/FR/realisations/EnergieRenouvelables/FiliereSolaire/PanneauxPhotovoltaiques/Celule/Temperature.htm>.
- [39] N. Benaouda , R. Aiouaz et M. Abersi Réponses spectrales et des caractéristiques I - V des cellules solaires au silicium, Revue des Energies Renouvelables ICRES-07 Tlemcen (2007) 145 – 150.
- [40] <http://www.galerie-photo.com/lumiere-diffuse-reflexion-parasite.html>.

Symbole	Définition	Unité
I	Courant électrique	A
I _D	courant de diode	A
I _{CC}	Courant de court circuit	A
I _{ph}	Courant	A
q	Charge de l'électron	C
V	Tension	V
V _{co}	tension de circuit ouvert	V
V _m	tension maximale	V
K	Constante de Boltzmann	J/K
T	Température	°K
R _s	Résistance série	Ω
R _p	Résistance parallèle	Ω
g	Taux de génération	Photons/cm/s
L _n	Longueur de diffusion des électrons	cm
L _p	Longueur de diffusion des trous	cm
A	Facteur d'idéalité	
FF	Facteur de forme	%
P	Puissance délivrée par une cellule solaire	mW.cm-2
P _m	Puissance maximale délivrée par une cellule solaire	mW.cm-2
P _a	Puissance absorbée	mW.cm-2
P _{th}	Puissance thermique	mW.cm-2
P _{el}	Puissance électrique	mW.cm-2
E	Eclairement	W.cm-2
E _g	Energie du gap	ev
S _m	Surface métallisée	cm
S _t	Surface totale	cm
T _{UC}	Température de utilisation	K
T _c	Température de cellule	K
T _a	Température ambiante	K
R	Coefficient de réflexion	%
λ	Longueur d'onde du photon incident	μm
η	Rendement de conversion	%
η _{col}	Rendement de collection	%
η _v	Facteur de tension	%
N ₀	Nombre de photons incidents	Photons/cm/s
N _a	Nombre de photons absorbés	Photons/cm/s
N _p	Nombre de photons perdus	Photons/cm/s
α	Coefficient d'absorption	cm-1
λ _c	Longueur d'onde de coupure	μm
I _m	Valeur maximale du courant	A
μ _n	Mobilité des électrons	(cm ² .V-1.s-1)
μ _p	Mobilité des trous	(cm ² .V-1.s-1)

X	Epaisseur de la cellule solaire	(μm)
U	Taux de recombinaison	($\text{cm}^{-3}.\text{s}^{-1}$)
ND	Concentration des atomes donneurs	(cm^{-3})
NA	Concentration des atomes accepteurs	(cm^{-3})
τ_L	Taux de perte par photons de grande longueur d'onde	%
τ_{th}	Taux de perte thermique	%
τ_{vco}	Taux de perte par facteur de tension	%
τ_R	Taux de perte réflexion	%
τ_x	Taux de perte par épaisseur de la cellule	%
τ_{col}	Taux de perte par collection partielle	%
τ_m	Taux de perte due à la métallisation de la grille	%
τ_{Rc}	Taux de perte résistance série	%
τ_{Rp}	Taux de perte résistance parallèle	%

Résumé

Les modules photovoltaïques perdent environ 70% de l'énergie qu'ils reçoivent sur leur surface. plusieurs paramètres peuvent entraîner des pertes qui sont principalement causées par les propriétés physiques des matériaux de base du modules, comme l'énergie du gap, indice de réfraction, ou par les matériaux utilisés dans l'encapsulation et le groupement des cellules dans le module afin, de permettre leur utilisation à des tensions et courants pratiques tout en assurant leur isolation électrique et leur protection contre les facteurs extérieurs, ou par ombrage du à la surface inactive dans le module ou à l'environnement du module comme les bâtiments ou les arbres .

Le but de notre étude est d'analyser et de modéliser les différents types de pertes dans un module photovoltaïque a base de silicium monocristallin afin de les simuler.

Mots clés : Module photovoltaïque – Silicium- Pertes - Modélisation – Simulation.

Abstract

The photovoltaic modules lose about 70% of the energy they receive on their surface. several parameters can cause losses which are mainly due to the physical properties of the basic materials of modules, such as energy gap, refracti index, by the materials we use for the encapsulation and aggregation of cells in the module to enable the use of practical voltages and currents while ensuring their electrical insulation and protection against external factors, or by shading due to the inactive surface in the module or the environment of the module such as buildings and trees.

The aim of our study is to analyze and model the various types of losses in photovoltaic modules based on monocrystalline silicon to simulate them.

Key words: Photovoltaic Module - Silicon-Losses- Modeling- Simulation.

الملخص

تخسر ألواح الطاقة الشمسية حوالي 70% من الطاقة التي تستقبل علي سطوحها و تتعدد الأسباب التي تؤدي لهذه الخسارة، فهي ناجمة في الأساس عن الخصائص الفيزيائية للمواد المستخدمة في صناعة هذه الألواح كطاقة الربط أو معامل الانكسار أو عن طريق المواد المستعملة في تجميع الخلايا و تغليفها من اجل حمايتها من تأثيرات المحيط الخارجي أو بسبب التظليل الذي قد تتسبب فيه بعض الأشياء الموجودة في محيط هذه الألواح كالبنائيات أو الأشجار أو الفراغات بين الخلايا الناتجة عن الأشكال الهندسية لهذه الخلايا.

لذلك كان موضوع هذه الدراسة هو تحليل و نمذجة مختلف العوامل التي قد تسبب الخسارة في ألواح الطاقة الشمسية، المصنوعة من السليكون البلوري ومحاكاتها وذلك من اجل معرفة تأثير كل منها علي مردود هذه الألواح.

كلمات المفاتيح : ألواح الطاقة الشمسية - السليكون - الخسارة -النمذجة - المحاكاة.