



Mémoire Pour l'Obtention du Diplôme de
Magistère En : Micro-électronique-photovoltaïque

Présenté par : Bendjellouli Zakaria

THEME :

**CONTRIBUTION A LA MODELISATION
D'UNE CELLULE SOLAIRE**

Soutenu le 28 / 06 / 2009

Les membres du jury :

	Nom	Prénom	Grade	Université d'origine
Président	Belghachi	Abdel rahmane	Professeur	Univ. Béchar
Examineur	Helmaoui	Abderrachid	Professeur	Univ. Béchar
Examineur	Cheknane	Ali	M.C	Univ. Laghouat
Encadreur	Benouaz	Taieb	Professeur	Univ. Tlemcen

Année Universitaire : 2008 - 2009

Remerciements

Je tiens à remercier Mr Benouaz Tayeb, Professeur à l'Université de Tlemcen qui a accepté de m'encadrer, et je lui exprime particulièrement toute ma reconnaissance pour m'avoir fait bénéficier de ses compétences scientifiques, ses qualités humaines et sa constante disponibilité.

Je remercie sincèrement Monsieur Belghachi Abderrahmane Professeur à l'Université de Béchar, Monsieur Helmaoui Abderrachid Professeur à l'Université de Béchar, Monsieur Cheknane Ali Professeur à l'Université de Laghouat d'avoir accepté de faire partie du Jury.

Mes remerciements à :

Mr Sidi Mohammed El Amine Bekkouche;

Mr A. Fizazi ;

Mr Mohammed Belhadj;

Mr Moulai Lakhdar Abdelmounaïm;

Mr Smaïl Bouserhane;

A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Z. Bendjellouli

Dédicaces

A l'âme de ma mère qui été pour mon corps mieux qu'un cœur ;

A mon cher père qui à sacrifié son temps pour nous ;

A l'âme de mon frère Cheikh ;

A l'âme de mon beau père Manouni Ghazi ;

A ma petite Khadidja ;

A tous ceux qui me sont chers ;

*A toute ma grande famille Bendjellouli, Maazouzi, Manouni et
Zineddine ;*

A mes collègues de travail ;

A mes collègues des études ;

Et à tous mes amis.

Z. Bendjellouli

Résumé:

Le modèle électrique d'un module PV est présenté sur la base des diodes Shockley. Le modèle simple est un photo-courant (source de courant), une seule diode de jonction et d'une résistance série, et notamment la dépendance de la température. Le deuxième modèle est un modèle à deux diodes.

La méthode d'extraction de paramètres et l'évaluation du modèle dans Matlab est démontrée pour un panneau solaire typique, dans notre cas c'est le Module SM110.

Ces modèles sont utilisés pour étudier la variation de la puissance maximale et la caractéristique courant-tension avec la température et l'éclairement. Une comparaison entre les deux modèles est faite.

Mots clefs : *système photovoltaïque, Modèle à une diode, Modèle à deux diodes, Panneaux photovoltaïques, Générateur photovoltaïque, cellule solaire, module SM110.*

Abstract :

An accurate PV module electrical model is presented based on the Shockley diode equation. The simple model has a photo-current current source, a single diode junction and a series resistance, and includes temperature dependences. The second model is a model with two diodes.

The method of parameter extraction and model evaluation in Matlab is demonstrated for a typical solar panel, in our case the Module SM110.

This model is used to investigate the variation of maximum power point with temperature and insolation levels. A comparison of buck versus boost maximum power point tracker (MPPT) topologies is made. The two models is the model with two diodes to a slight advantage because it uses the recombination of minority carriers in the volume of the material.

Keywords : *photovoltaic system, model with one diode, model with two diodes, photovoltaic panels, photovoltaic, solar cell, module SM110.*

ملخص:

النموذج الكهربائي للوحدة الفولطاضوئية تمثل على أساس الصمامات الثنائية Shockley. أبسط نموذج هو تيار ضوئي (مصدر التيار)، والصمام الثنائي للوصلة ومقاومة على التسلسل، وبالخصوص الاعتماد على درجة الحرارة. النموذج الثاني باثنين من الصمامات الثنائية.

طريقة استخراج معايير التقييم للنموذج باستعمال Matlab على وحدة نموذجية، وفي حالتنا الوحدة هي SM110 وتستخدم هذه النماذج لدراسة تغيير في الحد الأقصى لل طاقة ومنحنى فرق الجهد بدلالة التيار الكهربائي مع درجة الحرارة والإضاءة. المقارنة بين النموذجين باستعمال معطيات تطبيقية ومعطيات المصنع.

الكلمات الرئيسية : نظام الفولطاضوئية ، نموذج أحادي الصمام الثنائي، النموذج مع اثنين من الصمامات الثنائية ،

المولدات الفولطاضوئية ، الخلايا الشمسية ، وحدة. SM110

SOMMAIRE

Sommaire	i
Introduction Générale	1
Chapitre I	
Rappels, Notions Générales et Système Photovoltaïque	5
I.1 Introduction.....	6
I.2 Historique	6
I.2.1 Dates importantes dans l’histoire du photovoltaïque.....	6
I.3 Energie solaire	7
I.4 Position du Soleil	8
I.4.1 Coordonnées équatoriales.....	8
I.4.2 Coordonnées horizontales.....	9
I.5 Nombre d’Air Masse	10
I.6 Normalisation	12
I.7 Système photovoltaïque	12
I.7.1 La partie utilisation	12
I.7.2 Contrôle d’énergie	12
I.7.3 Production d’énergie	15
I.8 Paramètres des cellules photovoltaïques	15
I.8.1 Caractéristique courant tension et schéma équivalent	16
I.8.2 Courant de court-circuit, I_{CC}	17
I.8.3 Tension à circuit ouvert, V_{OC}	17
I.8.4 Facteur de forme, ff	17
I.8.5 Le rendement de conversion η	15
I.9 Courant d’éclairement	18
I.9.1 Région quasi neutre de type N.....	19
I.9.2 Région quasi neutre de type P.....	19
I.9.3 Région de charge d’espace.....	19

I.10 Calcul de photocourant	20
I.10.1 Courant de photogénération.....	20
I.10.2 Courant de diffusion des phototrous dans la région n.....	20
I.10.3 Courant de diffusion des photoélectrons dans la région p...	21
I.11 Courant total d'éclairement	21
I.12 Courant d'obscurité	21
I.12.1 Région quasi neutre n.....	22
I.12.2 Région quasi neutre p.....	22
I.13 Principe de fonctionnement d'un système photovoltaïque	22
I.14 Dispositifs à semi-conducteurs	24
I.14.1 Rappel	24
I.14.2 La jonction N-P	25
I.15 Facteurs limitation de rendement d'un générateur photovoltaïque...	27
I.15.1 Influence de la résistance série R_s	27
I.15.2 Influence de la résistance parallèle R_{sh}	28
I.16 Association des cellules photovoltaïques	28
I.16.1 Association en série	28
I.16.2 Association en parallèle	28
I.16.3 Association hybride en (série et en parallèle)	29

Chapitre II

Circuits équivalents et modèles mathématiques	31
II.1 Introduction	32
II.2 Modèle électrique d'un Générateur Photovoltaïque	33
II.2.1 Modèle à une diode	34
II.2.2 Modèle à deux diodes	35
II.3 Modèles mathématiques	36
II.3.1 Modèle Sandia	36
II.3.2 Modèle Cenerg	38
II.3.3 Modèle Madison	39

II.4 Sélection d'un modèle	40
II.5 Choix du module photovoltaïque	40
II.6 Modèle à une diode	41
II.7 Modèle à deux diodes	43
Chapitre III	
Effet des Paramètres Intensifs et Mis en Oeuvre Numérique	46
III.1 Résultats pratiques	47
III.2 Résultats de la simulation numérique.....	48
III.3 Validation des résultats.....	51
III.4 Exemple d'application. Utilisation d'un contrôleur d'Electrolyzer pour la production de l'hydrogène.....	53
III.4.1 Effet de l'éclairement sur la puissance produite et le courant généré par les panneaux photovoltaïques.....	55
III.4.2 Effet de la température ambiante sur la puissance produite et le courant généré par les panneaux photovoltaïques.....	57
III.5 Comparaison entre les deux modèles mathématiques.....	59
III.6 Interprétation et conclusion.....	60
Conclusion Générale	62
Annexe	
Référence bibliographique	

Introduction générale

0.1 Généralités

Depuis très longtemps, l'homme a cherché à utiliser l'énergie émise par le soleil. La plupart des utilisations sont directes comme en agriculture, à travers la photosynthèse, ou dans les diverses applications de séchage et chauffage, autant artisanale qu'industrielle. Cette énergie est disponible en abondance sur toute la surface terrestre et, malgré une atténuation importante lors de la traversée de l'atmosphère, la quantité restante demeure encore importante quand elle arrive au sol. On peut ainsi compter sur 1000 W/m^2 crête dans les zones tempérées et jusqu'à 1400 W/m^2 , lorsque l'atmosphère est faiblement polluée en poussière ou en eau [I-2]. Le flux solaire reçu au niveau du sol dépend de :

- L'orientation, la nature et l'inclinaison de la surface terrestre,
- La latitude du lieu de collecte, de son degré de pollution ainsi que de son altitude,
- La période de l'année,
- L'instant considéré dans la journée,
- La nature des couches nuageuses.

Ainsi, il existe des zones dans le monde plus favorisées que d'autres du point de vue ensoleillement. Elles sont répertoriées sous forme d'atlas et mettent en évidence des «gisements solaires». Les principaux phénomènes physiques évoqués sont des paramètres à prendre en compte pour l'installation et la maintenance de générateurs photovoltaïques. En effet, le comportement de ces générateurs d'énergie s'avère plus ou moins aléatoire, en fonction du site de mise en fonctionnement. Ainsi, si l'on considère des zones à climat sec et possédant un taux d'ensoleillement important dans l'année, le flux solaire peut être facilement modélisable et prévisible en fonction des heures de la journée et des jours de l'année. Le fonctionnement des générateurs PV est alors souvent proche de celui estimé. Si, au contraire, on considère des zones plus défavorables, souvent ventées et présentant un temps nuageux alternant avec des périodes d'ensoleillement sur plusieurs journées par an, l'irradiation change rapidement et dans de larges proportions. Il est alors difficile de faire des prédictions fines sur le taux d'irradiation sur un lieu et une heure précise. Dans ce cas très défavorable, l'exploitation du gisement solaire devient plus difficile par des générateurs PV, qui doivent tenir compte de cette réalité.

De même, prenons le cas d'un site présentant des zones d'ombres liées à des infrastructures ou des reliefs naturels. Le comportement du générateur PV ne va plus être

homogène et va souvent présenter des comportements dégradés qu'il faudra soit éviter, soit prévenir. La production d'énergie est dans ce cas souvent bien dégradée. Enfin, il ne faudra pas négliger des changements brutaux de point de fonctionnement directement liés au comportement de la charge sur laquelle le générateur PV doit débiter. Ce dernier point peut en effet entraîner un fonctionnement du générateur PV bien en deçà de son point nominal si la charge est mal adaptée.

Ces premiers constats montrent que l'exploitation d'une énergie comme le photovoltaïque peut s'avérer complexe et inefficace sans une bonne connaissance des conditions d'exploitations. [1]

0.2 Diverses utilisations des cellules solaires

La technologie photovoltaïque est en plein essor. Aux quatre coins du monde, de nombreuses possibilités d'exploitation sont étudiées puis expérimentées dans l'espoir d'une commercialisation future.

Toutefois, les prévisions de baisse des prix des modules photovoltaïques ont été trop optimistes et l'industrie photovoltaïque se trouve dans une situation difficile. En effet, la complexité des procédés de fabrication des modules photovoltaïques et les rendements de production trop faibles entraîne des coûts élevés qui freinent le volume des ventes. On peut espérer que, dans les années à venir, la technologie photovoltaïque arrive à "maturité" (procédés simplifiés, meilleurs rendements de production) et qu'alors l'augmentation du volume de production réduise le coût des modules.

En dépit de ces difficultés, l'évolution de la technologie et du marché photovoltaïques est globalement positive. Les méthodes de fabrication se sont améliorées réduisant les coûts de production et les volumes de production ont été augmentés dans l'espoir de réduire les coûts. Actuellement, 90% de la production totale de modules se fait au Japon, aux Etats-Unis d'Amérique et en Europe. [2]

0.3 Système photovoltaïque

La cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 1 à 3 W avec une tension de moins d'un volt. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module (ou panneau). Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension.

La plupart des modules commercialisés sont composés de 36 cellules en silicium cristallin, connectées en série pour des applications en 12 V. Le courant de sortie, et donc la puissance, sera proportionnel à la surface du module.

L'interconnexion de modules entre eux en série ou en parallèle pour obtenir une puissance encore plus grande, définit la notion de champ photovoltaïque. Le générateur photovoltaïque se compose d'un champ de modules et d'un ensemble de composants qui adapte l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs. Cet ensemble, appelé aussi "Balance of System" ou BOS, comprend tous les équipements entre le champ de modules et la charge finale, à savoir la structure rigide (fixe ou mobile) pour poser les modules, le câblage, la batterie en cas de stockage et son régulateur de charge, et l'onduleur lorsque les appareils fonctionnent en courant alternatif.

Le système photovoltaïque est alors l'ensemble du générateur photovoltaïque et des équipements de consommation. [2]

0.4 Avantages et inconvénients

Avantages

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages.

- D'abord, une haute fiabilité (elle ne comporte pas de pièces mobiles), qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Ensuite, le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milli-Watt au Méga-Watt.
- Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.
- Enfin, la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

Inconvénients

Le système photovoltaïque présente toutefois des inconvénients.

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.

- Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%).
- Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs Diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée.

Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru.

La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis. [2]

0.5 Différents domaines d'application [2]

- Domaine spatial.
- Habitation isolée.
- Industrie isolée.
- Centrale de puissance.
- Résidence urbaine.
- Biens de consommation.

0.6 Plan de thèse

Le premier chapitre, donne un rappel et une description générale des systèmes photovoltaïques.

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons les circuits équivalents électriques du générateur photovoltaïque, nous avons présentés le modèle à une diode et le modèle à deux diodes. Des modèles mathématiques, associés aux circuits équivalents, sont cités afin de sélectionner un modèle pour notre étude.

Le troisième chapitre consiste à une comparaison entre les résultats pratiques et les résultats théoriques des deux modèles (à une diode et à deux diodes), pour déduire le modèle le plus proche au pratique.

Finalement, nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale qui résume notre étude dans sa partie théorique et simulation des résultats.

Chapitre I
Rappels, Notions Générales
et
Système Photovoltaïque

Chapitre I

Rappels, Notions Générales et Système Photovoltaïque

I.1 Introduction

On distingue plusieurs types de sources d'énergies renouvelables: l'énergie hydroélectrique, l'énergie géothermique, l'énergie éolienne, l'énergie de la biomasse et l'énergie photovoltaïque. Excepté l'énergie géothermique qui provient de la chaleur des profondeurs de la terre, ces sources d'énergie proviennent directement ou indirectement du soleil. Elles sont donc disponibles indéfiniment tant que celui-ci brillera.

L'énergie photovoltaïque est la plus jeune des énergies renouvelables, elle a l'avantage d'être non polluante, souple et fiable. [3]

I.2 Historique

Les systèmes photovoltaïques sont utilisés depuis 40 ans. Les applications ont commencé avec le programme spatial pour la transmission radio des satellites. Elles se sont poursuivies avec les balises en mer et l'équipement de sites isolés dans tous les pays du monde, en utilisant les batteries pour stocker l'énergie électrique pendant les heures sans soleil. [4]

I.2.1 Dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque

1839: le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.

1875: Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.

1954: trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.

1958: une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

1973: la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.

1983: la première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 km en Australie.

La première cellule photovoltaïque (ou photopile) a été développée aux Etats-Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell, qui ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés". C'est une technique appelée le "dopage" qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs.

Mais en dépit de l'intérêt des scientifiques au cours des années, ce n'est que lors de la course vers l'espace que les cellules ont quitté les laboratoires. En effet, les photopiles représentent la solution idéale pour satisfaire les besoins en électricité à bord des satellites, ainsi que dans tout site isolé. [4]

I.3 Energie solaire

Le rayonnement solaire constitue la ressource énergétique la mieux partagée sur la terre et la plus abondante. La quantité d'énergie libérée par le soleil (captée par la planète terre) pendant une heure pourrait suffire à couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant un an.

Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1367 watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre (pour une distance moyenne terre-soleil de 150 Millions de km), c'est ce que l'on appelle la constante solaire égale à 1367 W/m^2 . La partie d'énergie reçue sur la surface de la terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser. Celle-ci est caractérisée par le nombre de masse d'air AM. Le rayonnement qui atteint le niveau de la mer à midi dans un ciel clair est de 1000 W/m^2 et est décrit en tant que rayonnement de la masse d'air "1" (ou AM1). Lorsque le soleil se déplace plus bas dans le ciel, la lumière traverse une plus grande épaisseur d'air, perdant plus d'énergie. Puisque le soleil n'est au zénith que durant peu de temps, la masse d'air est donc plus grande en permanence et l'énergie disponible est donc inférieure à 1000 W/m^2 . [4]

En résumé, la constante solaire est le flux énergétique reçu par une surface unité. Dans notre cas, la valeur qui a été retenue en 1980 est: $I_0 = 1367 \text{ W/m}^2$

I_0 est variable autour de l'année puisque la distance terre soleil est elle-même variable. (Trajectoire elliptique). La correction terre soleil est donnée par:

$$C_{t-s} = 1 + 0.034 \cos\left(\frac{360}{365}(j-2)\right) \quad (\text{I.1})$$

Où :

j : Angle entre le soleil et le plan horizontal du lieu.

La constante solaire corrigée est:

$$I = I_0 C_{t-s} \quad (\text{I.2})$$

I.4 Position du soleil

La position du soleil est repérée à chaque instant de la journée et de l'année par deux systèmes de coordonnées différents.

I.4.1 Coordonnées équatoriales

Le mouvement du soleil est repéré par rapport au plan équatorial de la terre à l'aide de deux angles. (d , H). (Fig. I.1).

a- Déclinaison du soleil

L'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le plan équatorial.

$$d = \arcsin \left[0.389 \sin \left[\left(\frac{360}{365} \right) (N - 82) + 2 \sin \left(\left(\frac{360}{365} \right) (N - 2) \right) \right] \right] \quad (\text{I.3})$$

N est le numéro du jour de l'année à partir du premier janvier.

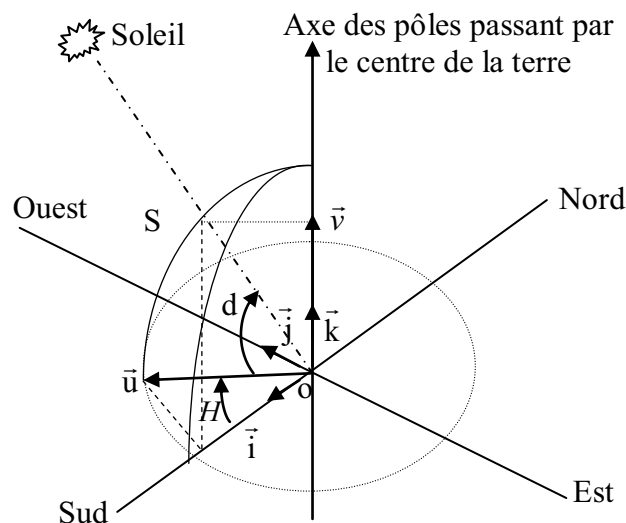


Fig. (I.1): Repère équatorial

b- Angle horaire du soleil

C'est l'angle compris entre le méridien origine passant par le sud et la projection du soleil sur le plan équatorial, il mesure la course du soleil dans le ciel.

$$H = 15 (TSV - 12) \quad (I.4)$$

$$TSV = TL - DE + \left(\frac{E_t + 4 \lambda}{60} \right) \quad (I.5)$$

$$E_t = 9.87 \sin(2 N') - 7.53 \cos(N') - 1.5 \sin(N') \quad (I.6)$$

$$N' = \frac{360}{365} (N - 81) \quad (I.7)$$

TSV : temps solaire vrai, le temps solaire vrai est égale au temps légal corrigé par un décalage dû à l'écart entre la longitude du lieu et la longitude référence.

L'angle H vaut 0° à midi, 90° à 18 heures et -90° à 6 heures en heure solaire vrai.

DE: décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich. (Égale 1 pour l'Algérie).

Le terme relatif à l'équation du temps est généralement négligeable.

TL: temps légal. (Donné par une montre).

E_t : correction de l'équation du temps.

λ : longitude de lieu.

I.4.2 Coordonnées horizontales

Le repère horizontal est formé par le plan de l'horizon astronomique et le vertical du lieu. Dans ce repère, les coordonnées sont la hauteur h et l'azimut a. (Fig. I.2).

a- Hauteur du soleil

C'est l'angle formé par la direction du soleil et sa projection sur le plan horizontal. Il est particulièrement égal à:

0° au lever et au coucher astronomiques du soleil,

90° à midi temps solaire vrai

φ : latitude de lieu.

$$\sin(h) = \cos(d) \cos(\varphi) \cos(H) + \sin(\varphi) \sin(d) \quad (I.8)$$

b- Azimut du soleil

C'est l'angle compris entre la projection de la direction du soleil sur le plan horizontal et la direction sud.

$$\sin(a) = \frac{\cos(d) \sin(H)}{\cos(h)} \quad (\text{I.9})$$

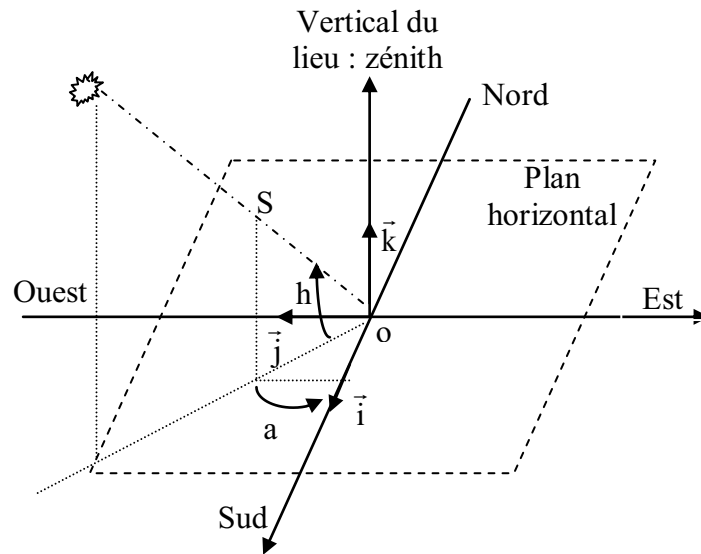


Fig. (I.2): Repère horizontal

I.5 Nombre d'air masse

Pour tenir compte de la position relative du soleil qui modifie l'épaisseur d'atmosphère traversée, on introduit le nombre d'air masse défini par :

$$m = \frac{p}{1013} \cdot \frac{1}{\sin A} \cdot \exp\left(-\frac{z}{7,8}\right) \quad (\text{I.10})$$

Avec :

p (N.m^{-2}) : pression,

A (degré) : élévation du soleil sur l'horizon (90° au zénith),

Z (Km) : altitude.

Dans les conditions normales et au niveau de la mer, l'expression simplifiée suivante est utilisée :

$$m = (\sin A)^{-1} \quad (\text{I.11})$$

Ainsi lorsque le soleil est au zénith, on dit que l'on a les conditions AM1 car les rayons lumineux traversent une épaisseur d'atmosphère unité (7.8 Km). Avec un soleil à 30° sur l'horizon, on obtient les conditions AM2. Hors atmosphère, à haute altitude, on définit les conditions AM0 (figure I.3). [5]

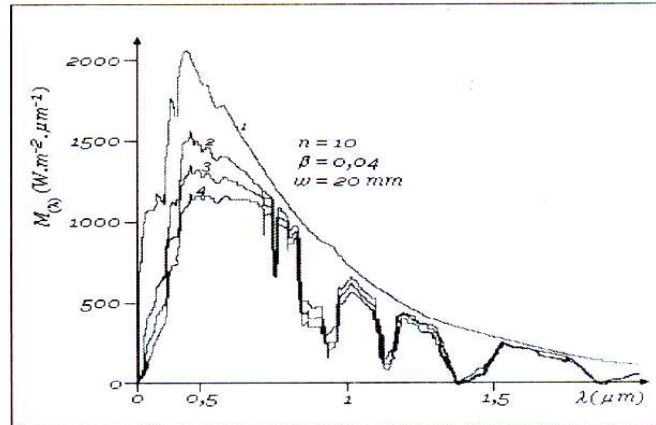


Fig. (I.3) : Spectre solaire en fonction de différentes valeurs. Air Mass

Les courbes ci-dessus représentent le spectre solaire pour différentes valeurs de Air Mass, noté AM. Courbe 1: AM0, courbe 2: AM1, courbe 3: AM1.5 et courbe 4: AM2. L'indice après AM représente le nombre d'atmosphère traversé, AM0 est donc le spectre solaire hors atmosphère, AM2 est le spectre solaire ayant traversé 2 épaisseurs d'atmosphère (hauteur de 30° du soleil au dessus de l'horizon).

Les longueurs d'ondes du rayonnement solaire terrestre sont comprises entre 0,2 μm (ultra-violet) et 4 μm (infrarouge) avec un maximum d'énergie pour 0,5 μm . 97,5% de l'énergie solaire est comprise entre 0,2 μm et 2,5 μm . De 0,4 μm à 0,78 μm , le spectre correspond au domaine du visible. Les capteurs d'énergie solaire doivent donc être compatibles avec ces longueurs d'ondes pour pouvoir piéger les photons et les restituer sous forme de chaleur ou d'électrons. Le tableau I.1 donne les valeurs énergétiques caractéristiques des photons pour diverses longueurs d'ondes, ainsi que les zones correspondantes au spectre lumineux. [6].

λ (μm)	E_{ph} (eV)	Zone
0.2	6.2	Ultra-violet
0.4	3.1	Visible bleu
0.5	2.48	Visible jaune-vert
0.78	1.59	Visible rouge
1	1.24	Infrarouge
2	0.62	Infrarouge
4	0.31	Infrarouge

Tableau I.1 : Valeurs énergétiques des photons issus du spectre solaire. [6]

Pour que le rayonnement solaire produise un courant électrique dans un matériau donné, faisant alors office de capteur, il faut que les photons soient tout d'abord absorbés par un

ou plusieurs matériaux sensibles à la longueur d'onde des photons. Puis, l'énergie des photons excite des électrons, qui sont ensuite collectés afin de constituer un courant électrique global. [6]

I.6 Normalisation

Les conditions standard de qualification des modules photovoltaïques sont:

- Un spectre AM1.5 ;
- Un éclairement de 1000W/m² ;
- Une température de 25°C.

Les constructeurs de panneaux solaires spécifient les performances de leur matériel dans les conditions normalisées citées ci-dessus (S.T.C. : Standard Test Conditions).

I.7 Système photovoltaïque

Tout système photovoltaïque peut se composer, comme il est montré sur la figure I-4, en trois parties :

- Une partie de production d'énergie.
- Une partie de contrôle de cette énergie.
- Une partie d'utilisation de l'énergie produite.

On peut ajouter encore des moyens d'entretien du système photovoltaïque comme outil de nettoyage des modules

I.7.1 La partie utilisation

La partie utilisation se compose de plusieurs récepteurs (utilisateurs), (exemple: éclairage, pompage, ...)

I.7.2 Contrôle d'énergie [7]

La partie contrôle d'énergie est composée d'un système de stockage avec ou sans régulation, plus les câbles de connexion.

a- Rôle du stockage d'énergie

Les batteries assurent les deux principales fonctions, à savoir :

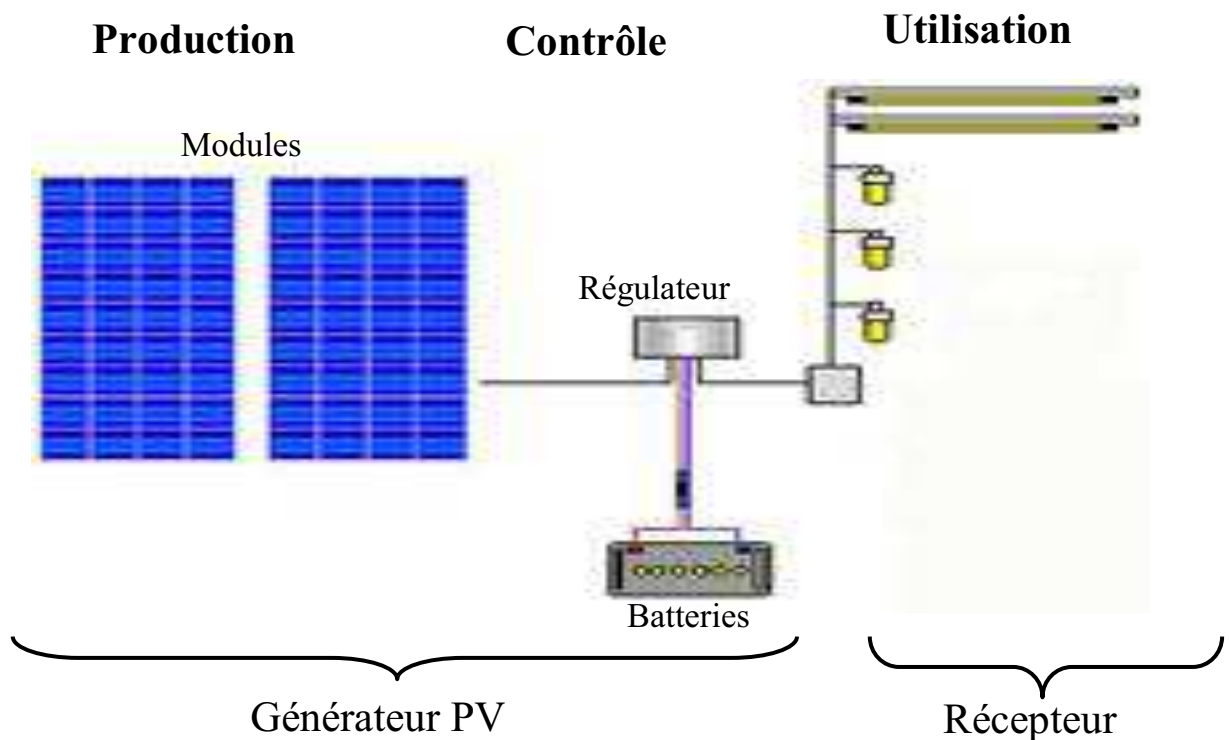


Fig. (I.4): Eléments d'un système photovoltaïque

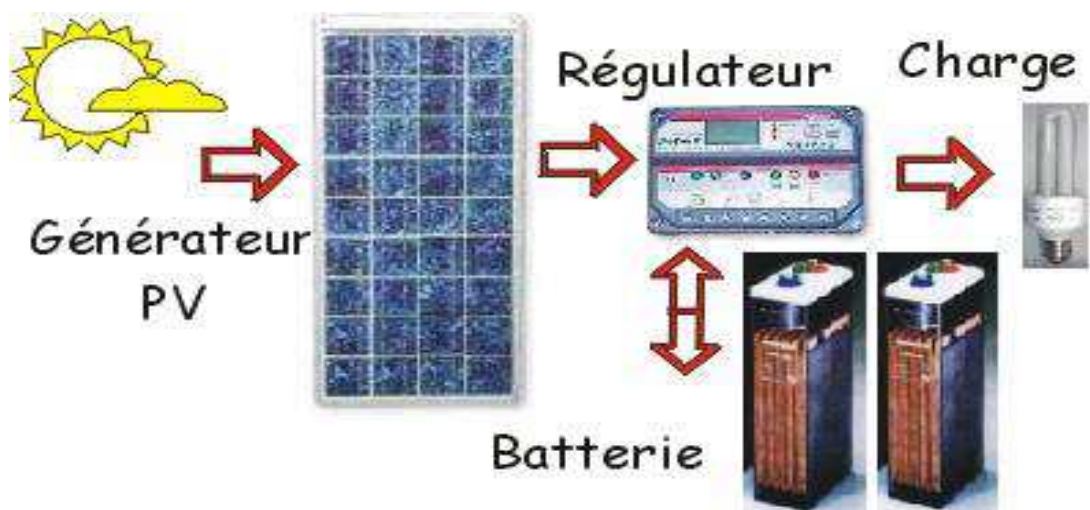


Fig. (I.5): Conversion d'énergie solaire.

- ✓ **Le stockage d'énergie:** il permet de satisfaire les besoins malgré le caractère aléatoire de l'énergie solaire reçue.
- ✓ **Adaptation d'impédance:** elle permet de mieux utiliser le champ photovoltaïque ; en fixant la tension du système, celui-ci reste dans la zone de fonctionnement optimale.

b- Principe de fonctionnement des batteries

Le principe de fonctionnement d'un générateur électrochimique est essentiellement basé sur la conversion de l'énergie chimique en énergie électrique. Toute réaction chimique d'oxydoréduction, pourvu qu'elle soit spontanée, c'est-à-dire accompagnée d'une diminution d'énergie libre, est en effet susceptible de donner naissance à un courant électrique lorsqu'elle a lieu dans des conditions appropriées. Pour cela, il faut que l'échange des électrons de valence s'effectue par le canal d'un circuit extérieur au système. Ainsi la combustion libre de l'hydrogène produisant de l'eau et de l'énergie calorifique ne peut donner naissance à un courant électrique car l'échange électronique s'accomplit directement, en quelque sorte par un court-circuitage moléculaire.

c- Contraintes de stockage de l'énergie PV dans un accumulateur au Plomb

Tout d'abord, il est important d'installer les batteries dans un local frais et ventilé pour évacuer par siphonage l'hydrogène plus léger que l'air (un mélange de 4 % d'H₂ dans l'air est détonnant). A la mise en service de l'installation, l'expérience montre qu'une surcharge des éléments à 2,45 volts permet d'améliorer nettement la durée de vie. Ces contraintes sont les suivantes :

- Contraintes liées aux cycles de charge/décharge dues au cycle journalier (dont le profil et l'amplitude dépendent de la puissance et de l'énergie fournie par le générateur), par celles demandées par l'utilisateur et par la météorologie (ensoleillement, vent, ...).
- Contraintes liées aux décharges profondes (jusqu'à 60 % de sa capacité) et prolongées, dues à des périodes de faible ensoleillement.
- Contraintes liées aux surcharges d'été prises en charge par la régulation.
- Contraintes liées à l'immobilisation qui ne permettent pas l'homogénéisation de l'électrolyte (stratification due aux recharges successives sans production intense de gaz) et se traduisent par une concentration plus élevée en acide au fond des bacs.
- Contraintes liées à la maintenance, qui peut affecter de manière significative la fiabilité du système. Il est important que les usagers vérifient le bon état de leurs batteries, car le plus souvent la maintenance est leur charge. Les manipulations à effectuer concernent la remise à niveau de l'électrolyte avec de l'eau déminéralisée, et le nettoyage des bouchons, car des dépôts conducteurs peuvent entraîner des résistances de fuite entre les bornes. Une recharge d'égalisation des éléments en vue d'équilibrer leur état de charge peut être nécessaire périodiquement. [8]

d- Caractéristiques générales des batteries

Les accumulateurs destinés aux installations photovoltaïques doivent avoir les qualités suivantes :

- être robustes ;
- avoir un bon rendement de charge et de décharge ;
- avoir une faible résistance interne ;
- avoir un taux d'autodécharge faible ;
- de maintenance réduite ;
- posséder une grande réserve d'électrolyte ;
- avoir une durée de vie importante ;
- être aptes aux cyclages (en entend par *cycle*, la décharge de la batterie, quelque soit la profondeur de décharge, suivie d'une recharge).

I.7.3 Production d'énergie

La partie production d'énergie est composée essentiellement d'un ou plusieurs modules, qui réalisent la conversion d'énergie solaire en électricité.

Un panneau photovoltaïque se compose de petites cellules qui produisent une très faible puissance électrique (1 à 3 W) avec une tension continue de moins d'1 V. Ces cellules sont disposées en série pour former un module ou panneau permettant de produire une puissance plus élevée. Les panneaux sont finalement interconnectés entre eux (en série et/ou en parallèle) pour obtenir un champ photovoltaïque.

Dans notre étude on se base sur l'élément de base du système photovoltaïque qui est la cellule solaire.

I.8 Paramètres des cellules photovoltaïques

Une cellule solaire est constituée par une jonction PN, lorsque la surface libre est éclairée les photons d'énergies supérieures à la largeur de la bande interdite E_g peuvent exciter des paires électron-trou dans les régions quasi neutres P et N figure I-6. [9]

Les électrons et les trous créés respectivement dans les régions P et N diffusent et atteignent la zone de charge d'espace, accélérés par le champ électrique interne, ils traversent la zone de transition.

La région N reçoit des électrons et se charge négativement ; la région P accepte des trous et se charge positivement. Si on relie les cotés de la jonction à une charge R_c , un courant I la parcourt et une différence de potentiel apparaît:

$$I = I_{ph} - I_d(V) \quad (I.12)$$

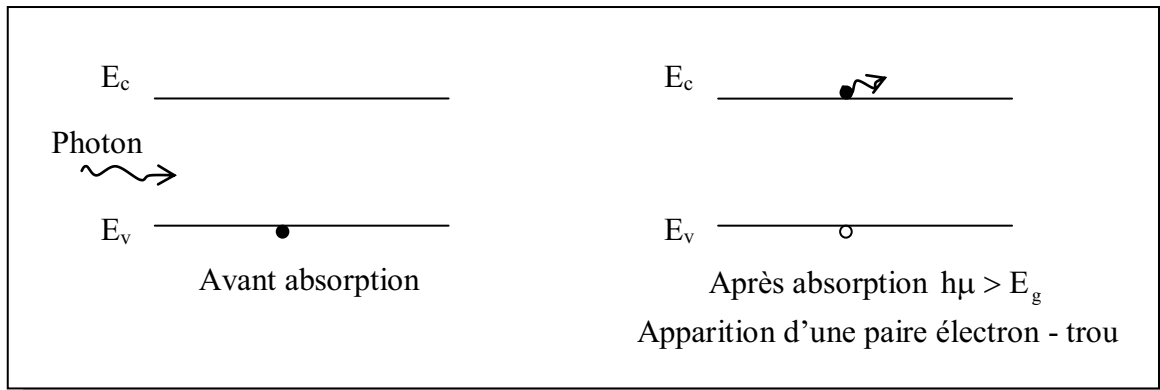


Fig. (I.6): création de paire électron trou par photo excitation

Avec :

I_{ph} : le photocourant

$I_d(V)$: courant d'obscurité de la diode

Cette relation entre les trois grandeurs, I , I_{ph} et $I_d(V)$ représente la caractéristique courant tension idéale permettant de déterminer quatre grandeurs caractéristiques principales du fonctionnement des cellules solaires :

- Le courant de court-circuit I_{cc} ;
- La tension en circuit ouvert V_{oc} ;
- Le facteur de forme FF ;
- Le rendement de conversion d'énergie η . [9]

I.8.1 Caractéristique courant tension et schéma équivalent

Il est difficile de donner un caractère source de courant ou de tension à un panneau photovoltaïque sur toute l'étendue de la caractéristique courant tension. Le panneau photovoltaïque est donc à considérer comme une source de puissance. On s'aperçoit alors de l'existence d'un point P_m où la puissance se trouve être maximale. Il est sans aucun doute intéressant de se placer sur ce point pour tirer le maximum d'énergie et ainsi exploiter au mieux la puissance crête installée. Certains régulateurs solaires réalisent donc une adaptation d'impédance pour qu'à chaque instant on se trouve proche de ce point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking (MPPT)). [12]

La caractéristique réelle et le schéma équivalent de la cellule sont représentés sur la figure I-7. Les valeurs respectives des divers éléments du schéma équivalent déterminent les performances de la cellule réelle.

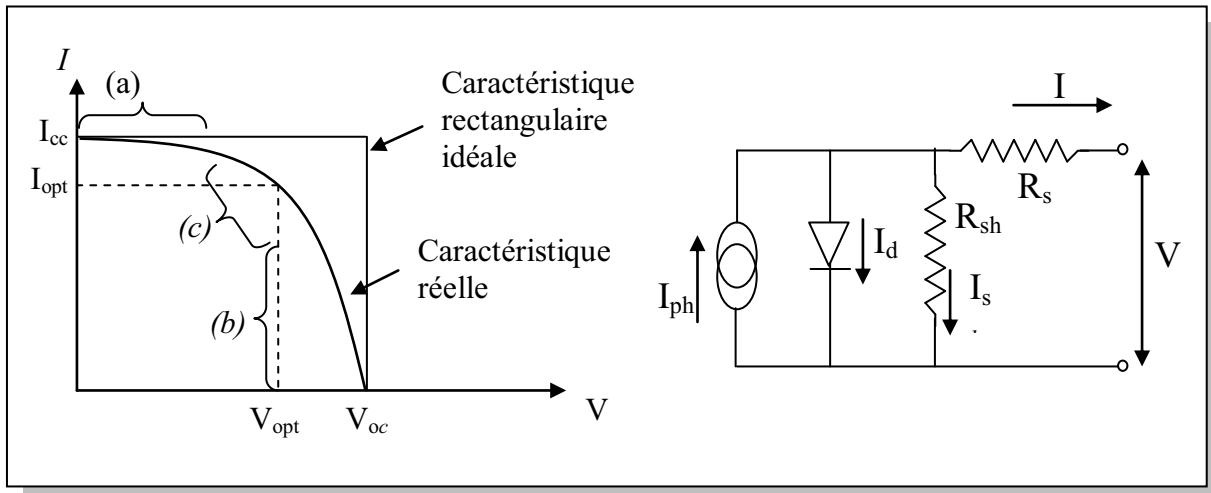


Fig. (I.7) : Caractéristique et schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.

La caractéristique se divise en trois parties :

- La zone (a) où la cellule se comporte comme un générateur de courant I_{cc} proportionnel à l'éclairement,
- La zone (b) où la cellule se comporte comme un générateur de tension V_{co} ,
- La zone (c) où l'impédance interne du générateur varie rapidement. [8]

I.8.2 Courant de court-circuit, I_{CC}

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule (en prenant $V=0$ dans le schéma équivalent). Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température.

I.8.3 Tension à circuit ouvert, V_{OC}

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse.

$$V_{co} = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{I_{cc}}{I_s} + 1\right) \quad (I.13)$$

I.8.4 Facteur de forme, ff:

La puissance fournie au circuit extérieur par une cellule photovoltaïque sous éclairement dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). Cette

puissance est maximale (notée P_{\max}) pour un point de fonctionnement $P_M (I_M, V_M)$ de la courbe courant-tension (courants compris entre 0 et I_{CC} et tension comprise entre 0 et V_{OC}) (Figure I-10). Ce point P_M est obtenu en modifiant la valeur de la résistance externe, quand l'aire du rectangle défini par les axes Ox , Oy et les droites $x = I_M$ et $y = V_M$ passe par un maximum.

Le nom "facteur de forme" (fill factor) dérive de la représentation graphique. Il est défini par la relation suivante:

$$ff = \frac{P_m}{V_{oc} \times I_{cc}} = \frac{V_m \times I_m}{V_{oc} \times I_{cc}} \quad (I.14)$$

La puissance maximale délivrée à la charge est présentée par le rectangle hachuré

$$P_m = V_m \times I_m \quad (I.15)$$

I.8.5 Rendement de conversion η

Le rendement, η (efficiency) des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_{in} .

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{ff \times V_{oc} \times I_{cc}}{P_{in}} \quad (I.16)$$

P_{in} : Puissance incidente = P solaire = 100 W/cm²

La densité de puissance incidente égale à $\frac{P_{in}}{A}$

A : section de la cellule

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert.

I.9 Courant d'éclairement [11]

Soient les dimensions de la cellule citées dans la figure (I.8)

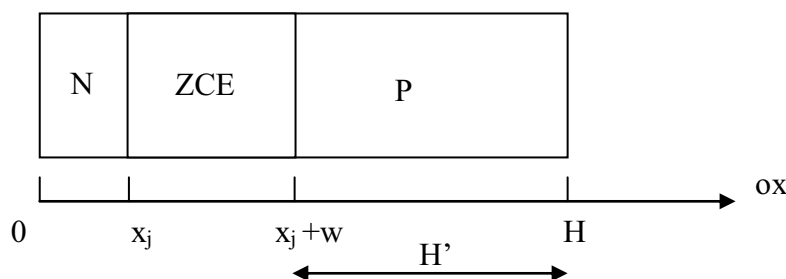


Fig. (I.8) :
Dimensions de la
cellule solaire

I.9.1 Région quasi neutre de type N

La densité de courant des trous est

$$J_p = q p \mu_p E - q D_p \frac{d\Delta p}{dx} \quad (I.17)$$

$E=0$

$$J_p = -q D_p \frac{d\Delta p}{dx} \quad (I.18)$$

Avec :

$$\Delta p = p_n - p_{n0} \quad (I.19)$$

L'équation de continuité est :

$$\frac{1}{q} \frac{dJ_p}{dx} - \frac{\Delta p}{\tau_p} + G = 0 \quad (I.20)$$

I.9.2 Région quasi neutre de type P

L'équation de densité de courant des électrons est donnée par :

$$J_n = q n \mu_n E + q D_n \frac{d\Delta n}{dx} \quad (I.21)$$

La densité de courant des électrons devient uniquement du courant de diffusion puisque le champ électrique est nul dans cette zone

$$J_n = q D_n \frac{d\Delta n}{dx} \quad (I.22)$$

Avec $\Delta n = n_p - n_{p0}$

L'équation de continuité est:

$$\frac{1}{q} \frac{dJ_n}{dx} - \frac{\Delta n}{\tau_n} + G = 0 \quad (I.23)$$

I.9.3 Région de charge d'espace

Le flux de photons à la profondeur x dans le matériau est :

$$\phi(\lambda, x) = \gamma(\lambda) \phi_0(\lambda) (1 - R(\lambda)) \exp(-\alpha(\lambda)x) \quad (I.24)$$

$\phi_0(\lambda, x)$: Flux incident de longueur d'onde $\lambda = 1,24 / E(eV)$

R : coefficient de réflexion

$$R = \left(n_r - \frac{1}{n_r} + 1 \right)^2 \quad (I.25)$$

n : indice de réfraction

Le taux de génération de paires électron – trou est égal au taux de dispersion de photons.

$$G(\lambda, x) = -\gamma(\lambda) \frac{d\phi}{dx} \quad (I.26)$$

$$G(x) = (1 - R)\phi_0\alpha \exp(-\alpha x) \quad (I.27)$$

$\alpha(\lambda)$: Coefficient d'absorption

x : profondeur d'absorption

$\gamma(\lambda)$: est le rendement quantique, il représente le rapport entre le nombre de paire électron- trou créés et le nombre de photons absorbés.

I.10 Calcul de photocourant

I.10.1 Courant de photogénération

A l'état stationnaire et en négligeant les processus de recombinaison, l'équation de continuité donne :

$$\frac{1}{q} \frac{dJ_d}{dx} + G = 0 \Rightarrow J_d = q \int_{x_j}^{x_j+W} G(x) dx \quad (I.28)$$

$$J_d = q\phi_0(1 - R) \exp(-\alpha x_j) [1 - \exp(-\alpha W)] \quad (I.29)$$

I.10.2 Courant de diffusion des phototrous dans la région n

Pour $x=0$, la recombinaison superficielle provenant des défauts se matérialise par une vitesse de recombinaison en surface.

$$D_p \frac{d(\Delta p)}{dx} = S_p \Delta p \quad (I.30)$$

Pour $x=x_j$

Le champ électrique est nul :

$$\frac{d^2 \Delta p}{dx^2} - \frac{\Delta n}{L_p^2} = -\frac{\phi \alpha \tau}{L_p^2} \exp(-\alpha x)$$

(I.31)

Admettant la solution générale:

$$\Delta p(x) = A \exp\left(-\frac{x}{L_p}\right) + B \exp\left(\frac{x}{L_p}\right) + \frac{\phi \alpha \tau}{1 - \alpha^2 L_p^2} \quad (I.32)$$

$$J_p = -qD_p \left(\frac{d(\Delta p)}{dx} \right)_{x_j} = \left[qF_0(1-R)\alpha L_p / (\alpha^2 L_p^2 - 1) \right] \times \left[\frac{\left(\frac{S_p L_p}{D_p} + \alpha L_p \right) - \exp(-\alpha x) \left(\frac{S_p L_p}{D_p} \cosh\left(\frac{x_j}{L_p}\right) + \sinh\left(\frac{x_j}{L_p}\right) \right)}{(S_p L_p / D_p) \sin(x_j / L_p) + \cosh(x_j / L_p)} - \alpha L_p \exp(-\alpha x) \right] \quad (I.33)$$

I.10.3 Courant de diffusion des photoélectrons dans la région p

Le calcul du courant de diffusion sera mené dans cette région de la même façon que dans le cas précédent.

- Pour : $x = x_j + W$

$\Delta n = 0$. Les électrons, qui atteignent ce point, sont propulsés par le champ électrique.

- Pour : $x=H$:

$$-D_n \frac{d(\Delta n)}{dx} = S_n \Delta n \quad (I.34)$$

S_n , S_p sont les vitesses de recombinaison superficielle des électrons et des trous respectivement.

$$J_n = qD_n \left(\frac{d\Delta n}{dx} \right)_{x_j+W} = \frac{qF_0(1-R)\alpha L_n}{\alpha^2 L_n^2 - 1} \exp[-\alpha(x_j + W)] \times \left\{ \alpha L_n - \frac{(S_n L_n / D_n) [\cosh(H' / L_n) - \exp(-\alpha H')] + \sinh(H' / L_n) + \alpha L_n \exp(-\alpha H')}{(S_n L_n / D_n) \sinh(H' / L_n) + \cosh(H' / L_n)} \right\} \quad (I.35)$$

I.11 Courant total d'éclairement

La densité totale du courant d'éclairement par longueur d'onde de radiation incidente est la somme des trois régions

$$J_E(\lambda) = J_p(\lambda) + J_n(\lambda) + J_d(\lambda) \quad (I.36)$$

I.12 Courant d'obscurité

Les mécanismes de transport des porteurs excédentaires s'assimilent à ceux qui ont été identifiés pour le courant de lumière. Les trois zones de la pile solaire participent à la génération du courant d'obscurité. Du fait de la polarisation en direct de la jonction, les porteurs majoritaires franchissent la barrière de potentiel diffusent et se recombinent dans les zones quasi neutres de type opposé ou ils deviennent alors porteurs minoritaires.

Courant d'obscurité dans les régions quasi neutres :

I.12.1 Région quasi neutre n

$$\text{- Pour } x = 0 \rightarrow D_p \frac{\partial \Delta p}{\partial x} = S_p \Delta p$$

$$x = x_j \rightarrow \Delta p = p_{no} \left(\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right) \quad (\text{I.37})$$

$$\text{Avec : } P_{no} = \frac{n_j^2}{N_d}$$

P_{no} : La concentration des trous dans la région n à l'équilibre thermodynamique

N_d : La concentration des électrons dans la région n à l'équilibre thermodynamique

I.12.2 Région quasi neutre p

$$x = x_j + W \rightarrow \Delta n = n_{po} \left(\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right) \quad (\text{I.38})$$

Avec :

$$n_{po} = \frac{n_j^2}{N_a}$$

$$x = H \rightarrow D_n \frac{\partial \Delta n}{\partial x} = -S_n \Delta n \quad (\text{I.39})$$

La densité de courant d'obscurité des trous J_{dp}

$$J_{dp} = \frac{qD_p n_i^2}{N_d L_p} \left(\frac{\frac{D_p}{S_p L_p} \operatorname{th}\left(\frac{x_j}{L_p}\right) + 1}{\frac{D_p}{S_p L_p} + \operatorname{th}\left(\frac{x_j}{L_p}\right)} \right) \left(\exp\left(\frac{qV}{KT}\right) - 1 \right) \quad (\text{I.40})$$

La densité de courant d'obscurité des électrons J_{dn}

$$J_{dn} = \frac{qD_n n_i^2}{N_a L_n} \left(\frac{\frac{D_n}{S_n L_n} \operatorname{th}\left(\frac{x_j + W}{L_n}\right) + 1}{\frac{D_n}{S_n L_n} + \operatorname{th}\left(\frac{x_j + W}{L_n}\right)} \right) \left(\exp\left(\frac{eV}{KT}\right) - 1 \right) \quad (\text{I.41})$$

I-13 Principe de fonctionnement d'un système photovoltaïque

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives

sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p. La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p. Une jonction PN a été formée. [4]

Les cellules solaires (photopiles) sont des composants électroniques à semi-conducteur qui, lorsqu'ils sont éclairés par le rayonnement solaire, développent une force électromotrice capable de débiter un courant dans un circuit extérieur.

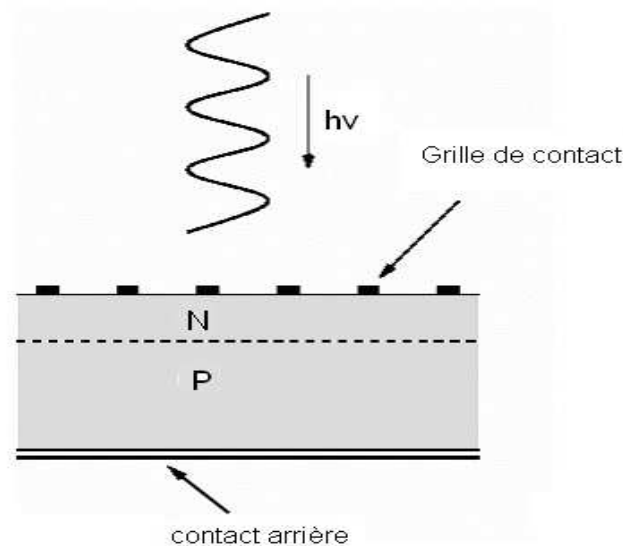


Fig. (I.9) : structure de la cellule photovoltaïque

La structure la plus simple d'une cellule photovoltaïque comporte une jonction entre deux zones dopées différemment d'un même matériau (homojonction p-n), ou entre deux matériaux différents (hétérostructures), la moins épaisse étant soumise au flux lumineux. Chacune des régions est reliée à une électrode métallique au moyen d'un contact ohmique de faible résistance. Le principe de fonctionnement peut être décomposé en deux parties : l'absorption de photons et la collecte des porteurs de charges créés.

La première étape de la conversion de la lumière en courant électrique est la génération au sein du semi-conducteur des porteurs de charges que sont les électrons libres et les trous.

I.14 Dispositifs à semi-conducteurs

I.14.1 Rappel

Les semi-conducteurs sont des matériaux dont la conductivité est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants. Cette conductivité des semi-conducteurs, à la différence de celle des conducteurs et des isolants, dépend fortement de leur pureté, des irrégularités de leur structure, de la température et d'autres quantités physiques et chimiques. Cette propriété représente leur avantage principal puisqu'elle permet la construction de la plupart des composants électroniques ayant des caractéristiques très diversifiées.

A la température de 0 K (-273°C) chaque atome de la grille cristalline est attaché à quatre atomes voisins par la mise en commun de leurs électrons périphériques (liaisons covalentes), assurant la cohésion du cristal. Dans la figure (I-10), les électrons qui participent à ces liaisons sont fortement liés aux atomes de silicium, aucune charge mobile susceptible d'assurer la circulation d'un courant électrique n'existe. La conductivité du silicium est alors très faible.

Cependant l'élévation de la température permet la libération dans la structure, de certains électrons périphériques, par apport d'énergie. De plus, la libération d'un électron provoque l'apparition d'un trou dans la structure cristalline, soit la création d'une paire électron-trou. Par exemple, à la température de 300 K (27°C), il y a $1,45 \times 10^{10}$ paires électron-trou dans un centimètre cube de silicium. Ce phénomène est à l'origine de l'augmentation de la conductivité du semi-conducteur. [14]

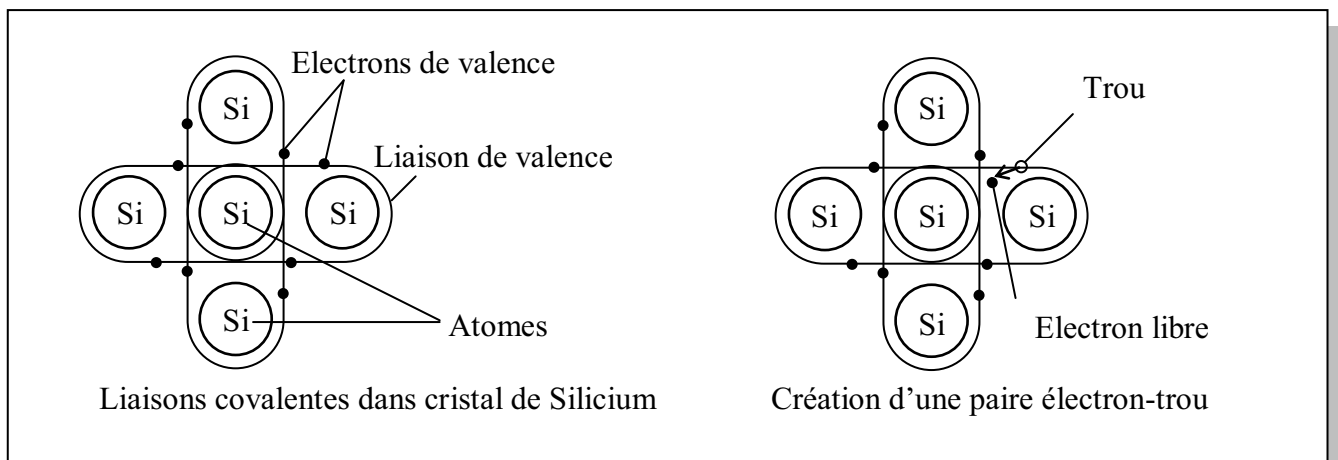


Fig. (I.10) : Semi-conducteur intrinsèque

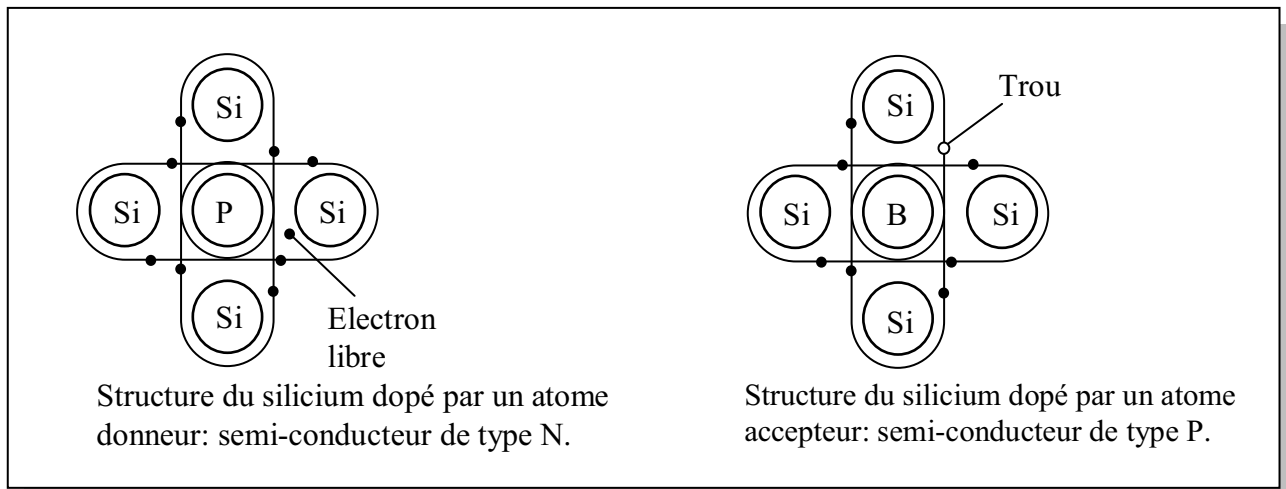


Fig. (I.11) : Semi-conducteur extrinsèque

I.14.2 La jonction N-P

La jonction N-P est un dispositif semi-conducteur constitué d'un cristal dont une partie a été dopée N et l'autre dopée P, les deux parties étant séparées par un plan dit de jonction. Examinons le fonctionnement d'un tel dispositif. Imaginons que l'on sépare la jonction en deux parties et qu'on relie la région N au pôle négatif d'un générateur et la région P au pôle positif (polarisation directe). Les électrons libres de la région N, ainsi que les trous libres de la région P, vont vers la jonction, vu le sens de polarisation. Si les deux parties sont en contact, un courant passe. Les électrons sont injectés dans la région P et les trous dans la région N. On dit qu'il y a injection de porteurs minoritaires. Si l'on polarise la jonction en sens inverse, les électrons allant vers le pôle (+) et les trous vers le pôle (-), ils s'éloignent de la jonction, laissant au voisinage de celle-ci des charges dues aux impuretés ionisées. Mais ces impuretés sont des atomes rigidement liés au réseau cristallin, qui ne peuvent se déplacer. Si l'on met les deux parties en contact, on a au voisinage une région isolante, et la résistance du dispositif en polarisation inverse sera donc très élevée. La jonction N-P joue donc le rôle d'un redresseur laissant passer le courant électrique en polarisation directe et présentant une très forte résistance en polarisation inverse. Si la polarisation est directe, il y a injection de porteurs minoritaires, par exemple des électrons dans la région P ; ces électrons ont tendance à se recombiner avec les trous présents en grand nombre dans cette région P ; ils le font au bout d'un temps τ appelé durée de vie des porteurs minoritaires.

Cette durée de vie est l'un des paramètres fondamentaux qui détermine la qualité de la jonction. Plus τ est grand, plus l'effet redresseur est marqué. Le silicium est à ce sujet le meilleur semi-conducteur connu (τ peut atteindre la valeur de 1 milliseconde, alors qu'il est de l'ordre de la microseconde pour la plupart des autres semi-conducteurs). Un autre paramètre important est la longueur de diffusion : l'électron injecté dans la région P diffuse sur une certaine distance L avant de disparaître au bout du temps τ ; c'est cette longueur moyenne parcourue par les électrons dans la région P qui est appelée longueur de diffusion. Elle est de l'ordre de plusieurs micromètres pour le silicium.

Si l'on soumet une jonction PN de faible épaisseur à un flux lumineux, des paires électron-trou sont créées par les photons dont l'énergie est supérieure à la largeur de la bande interdite du matériau. Il en résulte une augmentation du courant inverse de saturation proportionnelle au flux lumineux. Physiquement, cet effet se traduit de deux manières selon le quadrant de fonctionnement du dispositif : dans le 3ème quadrant, le système fonctionne en récepteur dont la résistance varie fortement avec l'éclairement, c'est la photorésistance ; dans le 4ème quadrant, le système fonctionne en générateur dont le courant de court-circuit est proportionnel à l'éclairement et dont la tension à vide est celle de la diode en polarisation directe (0.5 à 0.8 Volts pour Si) ; c'est la cellule photovoltaïque à jonction PN.

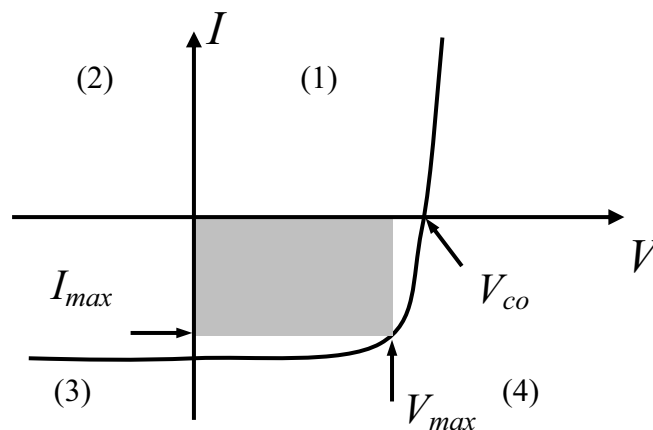


Fig. (I.12) : Caractéristique courant-tension

Nous allons maintenant nous intéresser uniquement au quadrant (4) pour la réalisation de générateurs photovoltaïques à partir de cellules photovoltaïques. Pour cela, nous allons représenter les caractéristiques dans un nouveau repère $I = f(V)$ donné par la figure I-13 où le courant de saturation inverse est compté positivement. I_{CC} représente le courant de court-circuit et V_{CO} la tension en circuit ouvert de la cellule photovoltaïque.

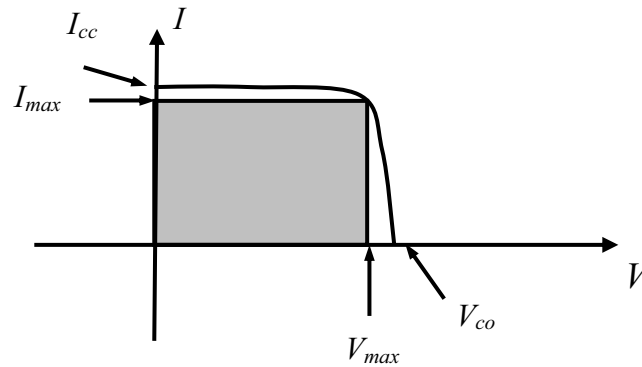


Fig. (I.13) : Caractéristique I-V dans le nouveau repère

Le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque idéale comprend un générateur de courant qui modélise l'éclairement et une diode en parallèle qui modélise la jonction PN, figure I-14.

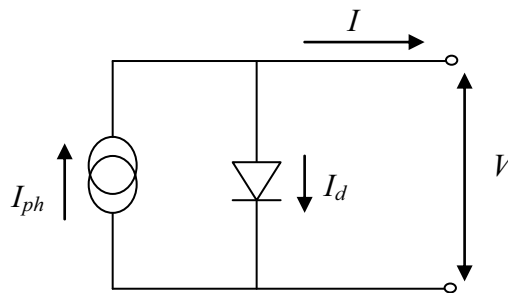


Fig. (I.14) : schéma équivalent d'une cellule PV

I.15 Facteurs limitation de rendement d'un générateur photovoltaïque

La quantité d'énergie produite par un système photovoltaïque dépend fortement, des caractéristiques électromécaniques de chacun des éléments du système, de la surface du champs capteur, de la quantité d'énergie solaire incidente sur la surface de la partie captation de ce système, de la température ambiante qui influe aussi sur la réponse de ce type de système. [13]

I.15.1 Influence de la résistance série R_s

La résistance série caractérise les pertes par effets Joule de la résistance propre du semi conducteur et les pertes à travers les grilles de collectes et les mauvais contacts ohmiques de la cellule. Les contacts semi conducteur-électrodes à résistance élevée abaissent appréciablement la tension et le courant de sortie ce qui va limiter le rendement de conversion. [14]

I.15.2 Influence de la résistance parallèle R_{sh}

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

L'existence de fissures et de défaut de structures complexes devient le siège de phénomène physique assimilable aussi à une résistance parallèle R_{sh} . L'ordre de grandeur de la résistance parallèle pour une cellule au Si : $R_{sh} = 10^2$ à $10^4 \Omega$. R_{sh} augmente avec le groupement série de cellules solaires et diminue avec une connexion parallèle. [14]

I.16 Association des cellules photovoltaïques

I.16.1 Association en série

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par adition des tensions à courant donné. [10]

La figure I-15 montre la caractéristique résultante obtenue en associant en série n_s cellules identiques.

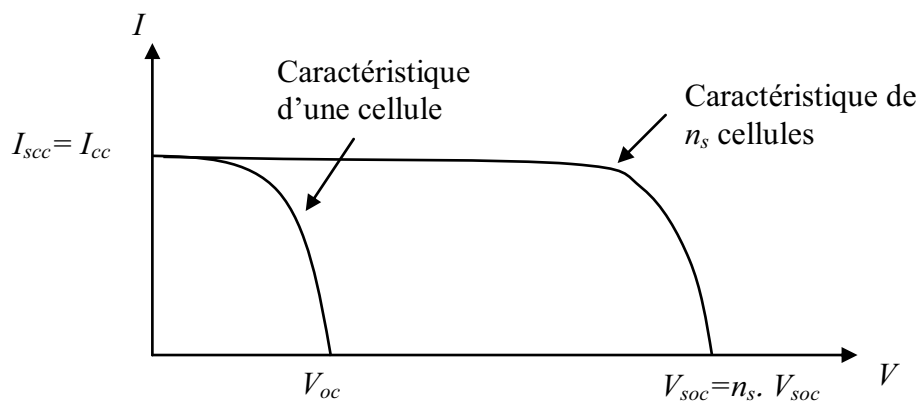


Fig. (I.15) : Caractéristique résultante d'un groupement en série de n_s cellules identiques

I.16.2 Association en parallèle

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante de groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée. [10]

La figure I-16 montre la caractéristique résultante obtenue en associant en parallèles n_p cellules identiques.

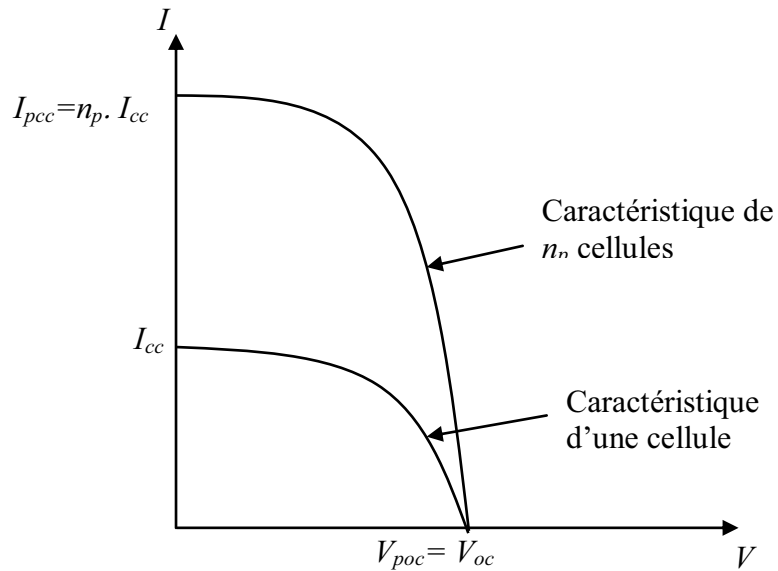


Fig. (I.16) : Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de n_p cellules identiques

I.16.3 Association hybride (en série et en parallèle)

Selon l'association en série et/ou parallèle de ces cellules, les valeurs du courant de court-circuit total et de la tension à vide totale sont données par les relations :

$$I_{cc}^t = n_p \cdot I_{cc} \quad (\text{I.41})$$

$$V_{oc}^t = n_s \cdot V_{oc} \quad (\text{I.42})$$

Avec :

n_p : nombre des cellule en parallèle,

n_s : nombre des cellule en série.

La figure I-11 montre la caractéristique résultante obtenue en associant, en série n_s et en parallèle n_p , cellules identiques.

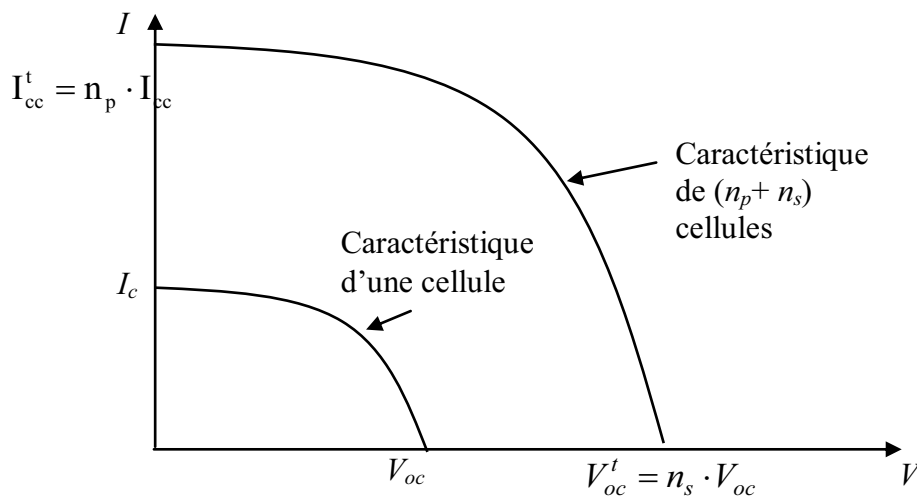


Fig. (I.17) : Caractéristique résultante d'un groupement hybride de $(n_p + n_s)$ cellules identiques

Selon l'association en série et/ou parallèle de ces cellules, les valeurs du courant de court-circuit I_{cc} et de la tension à vide V_{oc} sont plus ou moins importantes (figure I-17). La caractéristique d'un générateur PV constitué de plusieurs cellules a une allure générale assimilable à celle d'une cellule élémentaire, sous réserve qu'il n'y ait pas de déséquilibre entre les caractéristiques de chaque cellule (irradiation et température uniformes). [6]

Chapitre II
Circuits Equivalents
Et
Modèles Mathématiques

Chapitre II

Circuits Equivalents et Modèles Mathématiques

II.1 Introduction

Le capteur photovoltaïque est décrit par ses caractéristiques courant tension ($I=f(V)$) figure (II-1); Cette modélisation est utilisée généralement pour approximer la sortie du capteur (tension, courant) en fonction de deux entrées qui sont la température et l'éclairement reçu par le capteur figure (II-2). Le courant généré par le module photovoltaïque à une tension donnée dépend uniquement de l'éclairement et de la température de la cellule.

A température et éclairage constants, le rendement d'une cellule solaire dépend de la charge dans le circuit électrique. En circuit ouvert ($R_c = \infty$, $I = 0$, $V = V_{oc}$) ou en court-circuit ($R_c = 0$, $I = I_{cc}$, $V = 0$), aucune énergie n'est transmise à l'extérieur. Entre ces deux extrêmes, il existe une valeur optimale R_{opt} de la résistance de charge R_c pour laquelle la puissance $P = V_{max} \times I_{max}$ fournie par la cellule solaire à la résistance de charge est maximale, et vaut P_{max} .

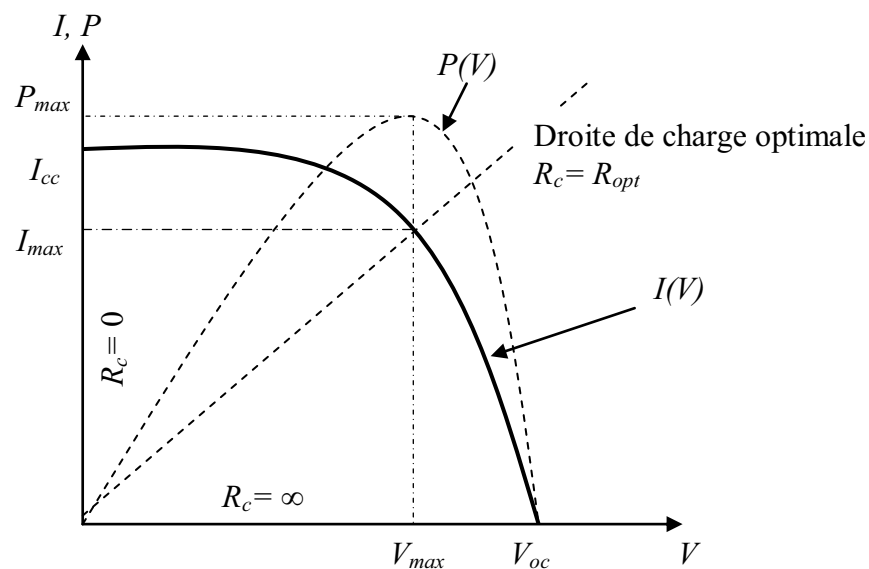


Fig. (II.1) : Caractéristiques type d'un générateur photovoltaïque.

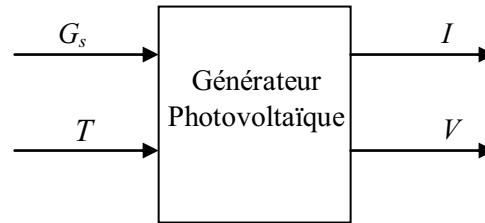


Fig. (II.2) : Schéma bloc de générateur photovoltaïque

Le rendement énergétique de la cellule solaire est défini par $\eta = P/P_\gamma$, où P_γ est la puissance lumineuse incidente sur la surface de la cellule. Pour la valeur optimale R_{opt} de la résistance de charge R_c , le rendement de la cellule solaire est maximum, et vaut $\eta_{max} = P_{max}/P_\gamma$. La valeur R_{opt} n'est pas une constante caractéristique pour une cellule donnée, mais dépend du spectre du rayonnement incident et de la température de la jonction. En fait, le rendement diminue lorsque la température augmente, ce qui conduit parfois à construire des capteurs hybrides résultant de la combinaison d'un capteur thermique et d'une cellule solaire, qui permettent de produire simultanément de l'eau chaude et d'augmenter le rendement photovoltaïque en refroidissant la cellule.

La puissance fournie par la cellule solaire ($P = V \cdot I$) et son rendement ($\eta = P/P_\gamma$) dépendent du matériau utilisé et de la technologie de fabrication (silicium amorphe, silicium polycristallin, silicium monocristallin), de la géométrie de la jonction (épaisseur des couches, multicouches, etc.) et des paramètres extérieurs (température, spectre et puissance du rayonnement incident, circuit électrique extérieur connecté à la cellule, etc.). [15]

II.2 Modèle électrique d'un générateur photovoltaïque

Pour trouver le modèle du générateur photovoltaïque, il faut tout d'abord retrouver le circuit électrique équivalent à cette source. De nombreux modèles mathématiques, ont été développés pour représenter leur comportement très fortement non linéaire qui résulte de celui des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de leurs réalisations.

On présentera deux modèles du GPV:

- Modèle à une diode.
- Modèle à deux diodes.

II.2.1 Modèle à une diode

Le fonctionnement d'un module photovoltaïque est décrit par le modèle « standard » à une diode, établi par Shokley pour une seule cellule PV, est généralisé à un module PV en le considérant comme un ensemble de cellules identiques branchées en série ou en parallèle. [4]

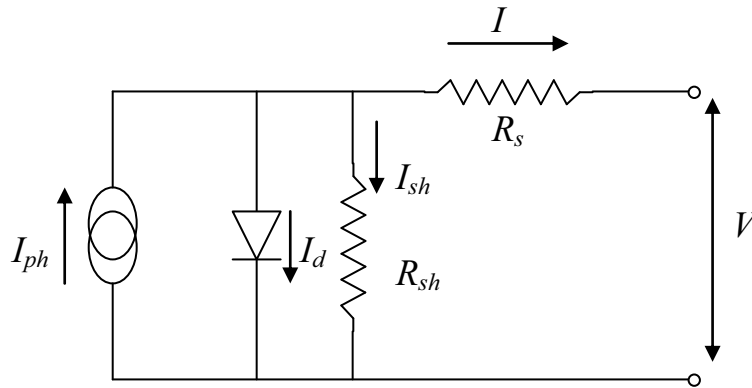


Fig. (II.3) : schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à une diode

Le courant fourni par la cellule est donné par la relation (II-1)

$$I = -I_{ph} + \frac{V - R_s I}{R_{sh}} + I_s \left[\exp \left\{ \frac{q(V - R_s I)}{AkT} \right\} - 1 \right] \quad (II.1)$$

Où :

I : Courant fourni par la cellule [A]

V : Tension à la borne de la cellule [V]

I_{ph} : Photocourant [A], proportionnel à l'irradiance Φ , avec correction selon T

I_s : Courant de saturation de la diode [A], dépendant de la température [A]

R_s : Résistance série [Ω].

R_{sh} : Résistance shunt (ou parallèle) [Ω].

q : Charge de l'électron = $1,602 \cdot 10^{-19}$ Coulomb

k : Constante de Boltzmann = $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K

A : Facteur de qualité de la diode, normalement compris entre 1 et 2.

T : Température effective de la cellule [Kelvin].

Il faut noter que ces deux résistances sont liées à la technologie d'élaboration des électrodes. Il faut minimiser R_s de telle sorte que R_{sh} soit très important.

Le photocourant I_{ph} varie avec l'irradiance, il est déterminé par rapport à des valeurs données aux conditions de référence:

$$I_{ph} = \frac{\Phi}{\Phi_{ref}} \cdot [I_{phref} + \mu_{Ics} \cdot (T - T_{ref})] \quad (II.2)$$

Où :

Φ et Φ_{ref} : Irradiance effective et de référence [W/m^2].

T et T_{ref} : Température effective et de référence [K].

μ_{Ics} : coefficient de température du photocourant (ou courant de court-circuit), il est souvent donné par le fabricant, il est en général positif mais très faible.

Le courant de saturation de la diode est supposé variable avec la température selon l'expression :

$$I_s = I_{sref} \cdot \left(\frac{T}{T_{ref}}\right)^3 \cdot \exp\left[\left(\frac{q \cdot E_g}{A \cdot k}\right) \cdot \left(\frac{1}{T_{ref}}\right) - \left(\frac{1}{T}\right)\right] \quad (II.3)$$

Où :

E_g : Energie de Gap de la cellule. (Silicium cristallin $E_g = 1,12$ eV, Silicium amorphe $E_g = 1,7$ eV, CIS = 1,03 eV, CdTe = 1,5 eV).

Les conditions de référence Φ et Φ_{ref} sont les conditions extérieures pour lesquelles sont spécifiées les données de base utilisées pour l'établissement du modèle (V_{co} , I_{co} , V_{max} , I_{max}), se sont soit les spécifications du fabricant, toujours données aux STC (Standard Test Conditions, 1000 W/m^2 , 25°C, spectre AM1,5), soit des valeurs issues d'une mesure du module.

II.2.2 Modèle à deux diodes [16]

Nous avons, cette fois-ci, deux diodes pour représenter les phénomènes de polarisation de la jonction PN. Ces diodes symbolisent la recombinaison des porteurs minoritaires, d'une part en surface du matériau et d'autre part dans le volume du matériau. Le schéma du générateur photovoltaïque devient dans le cas de la figure II-4

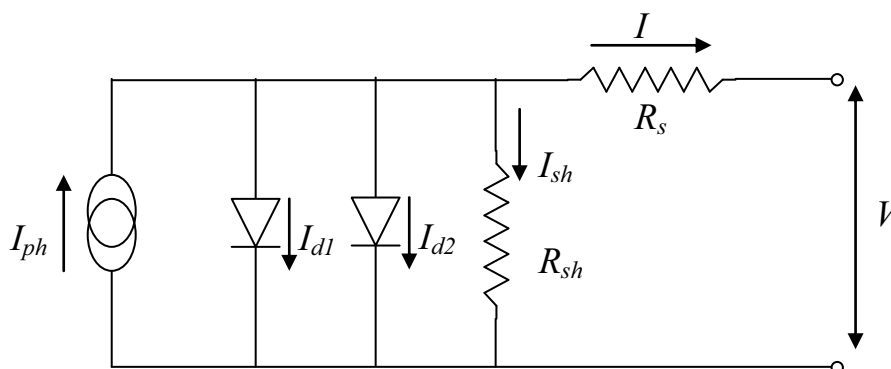


Fig. (II.4) : schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à deux diodes

Le courant fourni par la cellule est donné par la relation (II-4)

$$I = -I_{ph} + \frac{V - R_s I}{R_{sh}} + I_{s1} \left[\exp \left\{ \frac{q(V - R_s I)}{AkT} \right\} - 1 \right] + I_{s2} \left[\exp \left\{ \frac{q(V - R_s I)}{2AkT} \right\} - 1 \right] \quad (II.4)$$

II.3 Modèles mathématiques

En ce qui concerne la modélisation des capteurs PV, l'étude bibliographique a fait ressortir qu'il existe deux approches. La première nécessite d'effectuer des mesures sur le capteur PV une fois installé. C'est le cas des modèles 'Sandia' et Cenerg'. La deuxième approche consiste à se baser uniquement sur les données fournies par les constructeurs, ce qui est le cas du modèle 'Madison'.

II.3.1 Modèle Sandia [17]

Le Sandia National Laboratory (Albuquerque, USA) a élaboré un modèle de capteur PV, permettant à la fois de tester des capteurs ainsi que d'estimer leur productivité [King, 1997] [Whitaker, 1997]. Les principaux avantages du modèle sont les suivants :

- La variation du spectre solaire en fonction de la position du soleil dans le ciel, et son influence sur le rendement photovoltaïque, est prise en compte
- Le modèle prend aussi en compte l'angle d'incidence du rayonnement direct sur le capteur PV. La face avant du module PV étant en général composée d'une vitre, celle-ci ne laisse pas passer le rayonnement de la même manière suivant l'angle d'incidence du rayonnement. Ce phénomène apparaît dès que l'angle d'incidence (par rapport à la normale au module PV) dépasse 60° ;
- La méthode permet de prendre en compte le fait que les STC (Standard Test Conditions), c'est à dire les conditions de références suivants lesquelles les grandeurs représentant le module sont mesurées par les constructeurs, sont bien différentes des conditions normales de fonctionnement. Dans ces conditions de référence, la température de fonctionnement des cellules PV est égale à 25°C, ce qui correspond à une température ambiante aux alentours de 0°C, ce qui est rarement le cas dans la pratique ;

Le modèle peut s'appliquer à la caractérisation d'un capteur PV constitué de plusieurs modules. Les équations déterminantes sont les suivantes :

$$\begin{aligned}
I_{SC} &= \frac{G}{G_r} f_1(AM) f_2(\beta) (I_{SCr} + \mu_{Isc} (T_J - T_{Jr})) \\
I_{MP} &= C_0 + G_e (I_{MPr} + \mu_{I_{MP}} (T_J - T_{Jr})) \\
V_{OC} &= V_{OCr} + C_1 \ln(G_e) + \mu_{V_{OC}} (T_J - T_{Jr}) \\
V_{MP} &= V_{MPr} + C_2 \ln(G_e) + C_3 [\ln(G_e)]^2 + \mu_{V_{MP}} (T_J - T_{Jr}) \\
G_e &= \frac{I_{SC}}{I_{SCr}}
\end{aligned} \tag{II.5}$$

Avec :

G : rayonnement incident (W/m^2),

T_J : température de jonction (K),

AM : nombre d'air-masse,

β : angle d'incidence entre le rayonnement direct du soleil et la normale au plan du capteur,

G_r : rayonnement de référence ($1000 W/m^2$),

T_{Jr} : température de jonction référence ($25^\circ C$),

f_1 : fonction du nombre d'air-masse,

f_2 : fonction de l'angle d'incidence β du rayonnement sur le capteur PV,

I_{SCr} : intensité de court-circuit de référence,

V_{OCr} : tension de circuit ouvert de référence,

V_{MPr} : tension de puissance maximale de référence,

I_{MPr} : intensité de puissance maximale de référence,

μ_{Isc} : coefficient de dépendance en température du courant de court circuit.

μ_{Voc} : coefficient de dépendance en température du de la tension de circuit ouvert.

μ_{Vmp} : coefficient de dépendance en température de la tension de puissance maximale.

μ_{Imp} : coefficient de dépendance en température du courant de puissance maximale.

C_0, C_1, C_2, C_3 : coefficients déterminés expérimentalement.

L'hypothèse qui est utilisée est que les grandeurs V_{OC} , V_{MP} et I_{MP} sont en fonction uniquement de I_{SC} et de la température de fonctionnement des cellules T_J . Autrement dit, la courbe caractéristique $I(V)$ (qui donne le courant I en fonction de la tension V aux bornes du capteur) est connue pour un couple (T_J, I_{SC}) donné et ne dépend ni de la distribution spectrale du rayonnement incident (fonction de AM) ni de sa distribution angulaire (fonction de l'angle β).

Les paramètres de la liste ci-dessus tels que G_r , T_{Jr} , I_{SCr} , V_{OCr} , V_{MPr} , I_{MPr} , μ_{Isc} , μ_{Voc} , μ_{Vmp} , μ_{Imp} sont à déterminer expérimentalement pour un module PV, et sont ensuite calculés simplement par proportionnalité suivant les lois de l'électricité pour l'ensemble (ou champ) de modules. Les fonctions f_1 et f_2 sont des polynômes du 5^{ème} degré, les coefficients de ces polynômes étant déterminés expérimentalement. Quant aux coefficients C_0 , C_1 , C_2 , C_3 , ceux-ci sont déterminés expérimentalement sur l'ensemble du champ de module. Ces coefficients intègrent alors les pertes dues :

- Aux dissymétries : les courbes caractéristiques de chaque module peuvent ne pas correspondre, ce qui entraîne des déséquilibres électriques ;
- Aux connections entre modules ;
- A la présence de diodes anti-retour.

Le principal avantage de ce modèle est qu'il permet de prendre en compte les différentes pertes électriques mentionnées ci-dessus. Cependant celui-ci nécessite d'effectuer des mesures sur le capteur une fois installé.

II.3.2 Modèle Cenerg [17]

Le modèle développé par le Centre d'énergétique se base sur le modèle à une diode. Un bilan électrique sur ce schéma permet d'établir une expression donnant le courant I en fonction de la tension V disponible aux bornes du capteur :

$$I = P_1 \cdot G \cdot \left[1 + P_2 \cdot (G - G_{ref}) + P_3 \cdot (T_j - T_{ref}) \right] - \left[P_4 \cdot T_j^3 \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{k \cdot T_j}\right) \right] \cdot \left[\exp\left(\frac{q(V + R_s \cdot I)}{A \cdot n \cdot k \cdot T_j}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s \cdot I}{R_{sh}} \quad (II.6)$$

Avec :

I : intensité aux bornes du capteur,

V : tension aux bornes du capteur,

G : rayonnement incident (W/m^2),

T_j : température de jonction du capteur PV,

$P_1, P_2, P_3, P_4, R_s, R_{sh}$: paramètres à déterminer expérimentalement (R_s et R_{sh} étant les résistances séries et shunt des cellules),

n : paramètre d'ajustement, est égal au nombre de cellules en série (36 par exemple) pour un module PV parfait, et est supérieur dans la pratique,

G_{ref} : rayonnement de référence ($1000 W/m^2$),

T_j : température de jonction de référence ($25 \text{ }^\circ\text{C}$),

E_g : gap du matériau, vaut 1.12eV pour le silicium cristallin.

L'expression (II.6) donne le courant I comme étant égal à la somme de trois termes.

Les coefficients P_1 , P_2 , P_3 , P_4 , R_s , et R_{sh} sont déterminés expérimentalement. Le calcul de la puissance électrique P disponible aux bornes du capteur se fait en multipliant la tension V et l'intensité I calculés avec l'équation (II.6).

Ce modèle a été validé expérimentalement par le Centre d'Energétique à Sophia Antipolis [Dumbs, 99]. Dans tous les cas, la différence entre calculs et résultats expérimentaux pour la productivité électrique est inférieure à 5%.

Lors de la caractérisation du champ de modules, et donc de la mesure des différents coefficients, il est noté que ces coefficients intègrent les pertes électriques dues aux 'Mismatch losses' (dissymétrie entre modules) ainsi que les pertes dans les connexions. La puissance électrique perdue est estimée à environ 3%.

Nous retrouvons pour ce modèle la même problématique que pour le modèle 'Sandia': les paramètres expérimentaux permettent une caractérisation plus fiable du système PV, mais cela nécessite une phase de mesures relativement lourde.

II.3.3 Modèle Madison [17]

Ce modèle a été développé par l'université de Madison pour la programmation d'un module de simulation de capteur PV appelé 'PHANTASM' chaîné au programme de simulation thermique de bâtiment 'TRNSYS'. [Fry, 1998]. Tout comme le modèle 'Cenerg', il se base sur le modèle électrique des cellules appelé 'Modèle à une diode'. Par contre, le modèle développé propose une méthode qui permet de calculer les performances du module PV à partir des données fournies par les constructeurs.

L'équation qui donne l'intensité I en fonction de la tension V aux bornes du capteur est la suivante :

$$I = I_{ph} - I_s \left\{ \exp \left[\frac{q}{n \cdot k \cdot T_j} (V + R_s \cdot I) \right] - 1 \right\} - \frac{V + R_s \cdot I}{R_{sh}} \quad (II.7)$$

Avec :

I : intensité aux bornes du capteur (A),

V : tension aux bornes du capteur (V),

I_{ph} : photocourant (A),

I_s : courant de saturation inverse de diode (A),

n : paramètre d'ajustement,

T_j : température de jonction,

R_s : résistance série,

R_{sh} : résistance shunt.

Le membre de droite de l'équation (II.7) représentant le modèle 'Madison' fait apparaître trois termes équivalents aux trois termes de l'équation (II.6) représentant le modèle 'Cenerg'. Il existe quelques différences à noter entre les deux modèles :

- Le premier terme de l'équation du modèle 'Cenerg' (équivalent au photocourant I_{ph} du modèle 'Madison') est fonction de la température jonction T_j , et dépend d'un terme en G^2 , ce qui n'est pas le cas pour l'expression du photocourant I_L du modèle 'Madison'. Pour ce calcul, le modèle 'Madison' utilise une hypothèse simplificatrice qui dit que le photocourant est proportionnel au rayonnement incident G , et qu'il ne dépend pas de la température T_j .
- Dans l'équation du modèle 'Madison' le calcul du troisième terme, qui est le courant traversant la résistance shunt R_{sh} , fait intervenir la tension aux bornes de la résistance série R_s . Cette résistance série n'intervient pas dans l'équation du modèle 'Cenerg', car dans ce modèle pour calculer l'intensité traversant la résistance shunt R_{sh} , la tension aux bornes de la résistance série est négligée.

II.4 Sélection d'un modèle

Les deux modèles 'Sandia' et 'Cenerg' offrent certainement une meilleure précision que le modèle 'Madison'. Cependant, ces deux modèles nécessitent soit d'effectuer des mesures sur site en ce qui concerne le modèle 'Sandia', soit des mesures en plus de celles généralement effectuées par les constructeurs en ce qui concerne le modèle 'Cenerg'. Le modèle 'Madison' propose une méthode de calcul des paramètres du modèle en fonction des données constructeur. A cet effet, nous avons choisis et utilisés le modèle 'Cenerg' dans cette étude.

II.5 Choix du module photovoltaïque

Dans notre travail, on a choisi le module photovoltaïque Du type SM110-24 (voir annexe). Le générateur étudié est constitué d'un groupe de deux modules photovoltaïques. Ainsi nous donnons les caractéristiques électriques du module photovoltaïque dans le tableau II.1.

Puissance nominale	P_n	110W
Puissance maximale	P_{mpp}	110W
Tension de crête maximale	V_{mpp}	35V
Tension à circuit ouvert	V_{oc}	43.5V
Courant de court-circuit	I_{sc}	3.45A
Tolérance sur puissance de crête		±5%
Température nominale de fonctionnement	Noct	45°C
Nombre de cellules en séries	n_s	72

Tableau II.1 : Caractéristiques électriques du module SM110-24.

II.6 Modèle à une diode :

Les propriétés de la jonction PN et la réaction du semi-conducteur au rayonnement mènent au schéma du circuit équivalent idéal simplifié d'une cellule photovoltaïque représenté sur la figure II.5. C'est le modèle le plus cité dans la littérature, le module photovoltaïque est caractérisé par son schéma électrique équivalent qui se compose d'une source de courant qui modélise la conversion du flux lumineux en énergie électrique, une résistance shunt R_{sh} est une conséquence de l'état le long de la périphérie de la surface de la cellule, une résistance série R_s représentant les diverses résistances de contact et de connexions, une diode en parallèle qui modélise jonction PN.

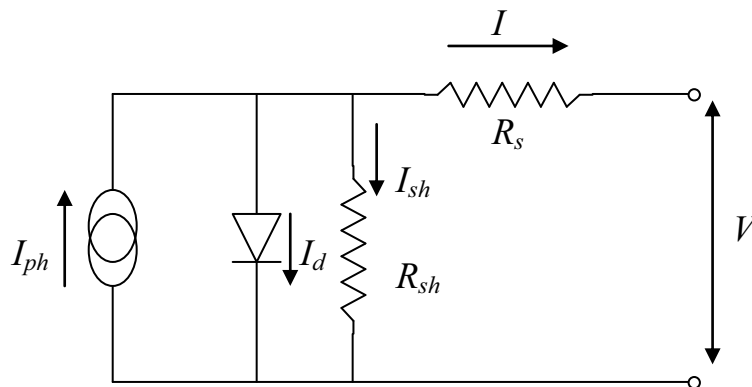


Fig. (II.5) : Modèle équivalent à une diode

Le courant généré par le module est donné par la loi de Kirchhoff :

$$I = I_{Ph} - I_d - I_{sh} \quad (II.8)$$

Avec :

I : Le courant délivré par le module.

I_{ph} : Photo courant.

I_d : Courant de diode.

I_{sh} : Le courant shunt.

Le courant I_{ph} est directement dépendant des rayonnements solaires E_G et de la température de la cellule T_j , est donné par la relation suivante :

$$I_{ph} = P_1 \cdot E_G \cdot \left[1 + P_2 \cdot (E_G - E_{ref}) + P_3 \cdot (T_j - T_{ref}) \right] \quad (II.9)$$

La température de la cellule peut être calculée comme suit :

$$T_j = T_a + E_G \cdot \left(\frac{N_{oct} - 20}{800} \right) \quad (II.10)$$

Où :

T_a : Température ambiante.

N_{oct} : Condition de température nominale de fonctionnement de la cellule qui est donnée par le constructeur (45°C).

Le courant de la diode est donné par :

$$I_d = I_s \cdot \left[\exp\left(\frac{q(V + R_s \cdot I)}{A \cdot n \cdot k \cdot T_j}\right) - 1 \right] \quad (II.11)$$

Avec :

$$I_s = P_4 \cdot T_j^3 \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{k \cdot T_j}\right) \quad (II.12)$$

Le courant de la résistance shunt est calculé par :

$$I_{sh} = \frac{V + R_s \cdot I}{R_{sh}} \quad (II.13)$$

Le courant total est donné par :

$$I = P_1 \cdot E_G \cdot \left[1 + P_2 \cdot (E_G - E_{ref}) + P_3 \cdot (T_j - T_{ref}) \right] - \left[P_4 \cdot T_j^3 \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{k \cdot T_j}\right) \right] \cdot \left[\exp\left(\frac{q(V + R_s \cdot I)}{A \cdot n \cdot k \cdot T_j}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s \cdot I}{R_{sh}} \quad (II.14)$$

Avec :

E_G : irradiation solaire.

P_1, P_2, P_3, P_4 : Paramètres.

E_{ref} : irradiation de référence 1000 W/m².

T_j : température de la cellule.

T_{ref} : température de référence 25°C.

E_g : Energie de gap pour le silicium cristalline 1.12 eV.

A : Facteur d'idéalité de la jonction.

n : nombre de cellules en séries dans un module 72.

R_s : Résistance série.

R_{sh} : Résistance shunt.

q : La charge d'électron $1,6 \cdot 10^{-19}C$.

k : Constant de Boltzmann $1,38 \cdot 10^{-23} J/K$.

Les paramètres P_i , R_s , R_{sh} sont donnés sur le tableau II.2 :

P_1	0.0036
P_2	0.0001
P_3	-0.0005
P_4	70.874
$R_s(\Omega)$	0.614
$R_{sh}(\Omega)$	151.16

Tableau II.2 : Paramètres du modèle à une diode.

Les résultats de simulation par Matlab sont donnés sur les figures du troisième chapitre.

II-7) Modèle à deux diodes

Le fonctionnement d'une cellule solaire peut être modélisé en considérant le schéma électrique équivalent ci-dessous figure (II.6). On considère le cas d'une cellule solaire idéale comprenant une source de courant et deux diodes en parallèles. La source de courant I_{ph} modélise le courant photogénéré. Les branches de chacune des diodes représentent respectivement le courant de diffusion dans la base et l'émetteur (I_{d1}), et le courant de génération-recombinaison (I_{d2}) dans la zone de charge d'espace de la jonction (ZCE).

Pour envisager le cas d'une cellule solaire réelle, le circuit équivalent doit intégrer :

- Une résistance série R_s , qui modélise les pertes résistives au sein de la photopile et donc les métallisations.
- Une résistance parallèle R_p , modélisant les courants de fuite qui court-circuitent la jonction (fuites par les bords de la cellule et au niveau de la jonction).

Le courant généré par le module est donné par :

$$I = I_{ph} - (I_{d1} + I_{d2}) - I_{sh} \quad (II.15)$$

Avec :

$$I_{d1} = I_{01} \cdot \left[\exp\left(\frac{q(V + R_s \cdot I)}{A \cdot n \cdot k \cdot T_j}\right) - 1 \right] \quad (II.16)$$

$$I_{d2} = I_{02} \cdot \left[\exp\left(\frac{q(V + R_s \cdot I)}{2 \cdot n \cdot A \cdot k \cdot T_j}\right) - 1 \right] \quad (II.17)$$

$$I_{01} = P_{04} \cdot T_j^3 \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{k \cdot T_j}\right) \quad (II.18)$$

$$I_{02} = P_{14} \cdot T_j^3 \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{2 \cdot k \cdot T_j}\right) \quad (II.19)$$

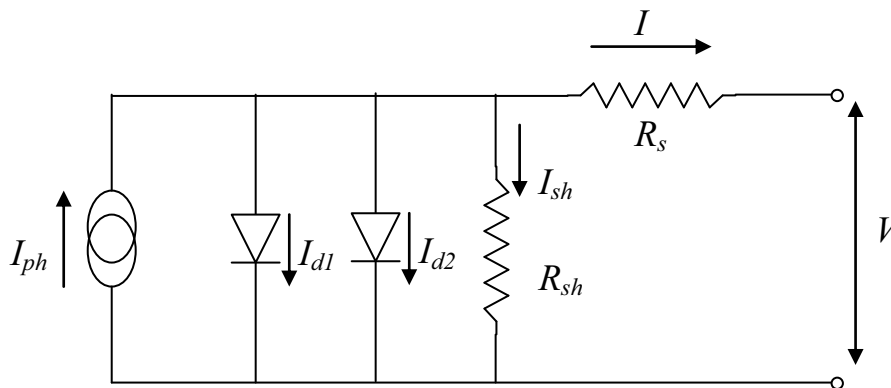


Figure II.6 : Modèle équivalent à deux diodes

I_p et I_{sh} garderont les mêmes expressions que celles du modèle à une diode.

Le courant total s'écrit :

$$I = P_1 \cdot E_G \cdot \left[1 + P_2 \cdot (E_G - E_{ref}) + P_3 \cdot (T_j - T_{ref}) \right] - \frac{V + R_s \cdot I}{R_{sh}} - \left[P_{04} \cdot T_j^3 \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{k \cdot T_j}\right) \right] \cdot \left[\exp\left(\frac{q(V + R_s \cdot I)}{A \cdot n \cdot k \cdot T_j}\right) - 1 \right] - \left[P_{14} \cdot T_j^3 \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{2 \cdot k \cdot T_j}\right) \right] \cdot \left[\exp\left(\frac{q(V + R_s \cdot I)}{2 \cdot A \cdot n \cdot k \cdot T_j}\right) - 1 \right] \quad (II.20)$$

Les paramètres P_i , R_s , R_{sh} sont donnés sur le tableau II.3:

P_1	3.4×10^{-3}
P_2	0
P_3	0.2×10^{-5}
P_{04}	450
P_{14}	72
$R_s(\Omega/\text{cm}^2)$	0.58
$R_{sh}(\Omega)$	160

Tableau II.3 : Paramètres du modèle à une diode.

Chapitre III
Effet des Paramètres
Intensifs et
Mis en Oeuvre Numérique

Chapitre III

Effet des Paramètres Intensifs et Mis en Oeuvre Numérique

Dans ce chapitre, on utilise les programmes du Maple 6 et Matlab 7.0 pour simuler les deux modèles. Les résultats obtenus seront confrontés avec des données expérimentales afin de déduire le modèle le plus fiable.

III.1 Résultats pratiques

On choisira une diode de tension de seuil 0,5V et une source idéale de courant de valeur 220 mA. La cellule solaire est éclairée par une lampe, l'éclairement est mesuré à l'aide d'un luxmètre que l'on positionne comme la cellule. Celui-ci indique 20 000 Lux soit 200 W/m². La température mesurée à la surface du boîtier plastique contenant la cellule est de 30°C. Les valeurs mesurées sont données dans le tableau III-1.

Tension (V)	0	0,32	0,44	0,47	0,48	0,49	0,495	0,5	0,5
Courant (A)	0,22	0,21	0,16	0,13	0,105	0,068	0,05	0,01	0

Tableau III-1 : Valeurs mesurées de la tension et du courant généré par la cellule solaire.

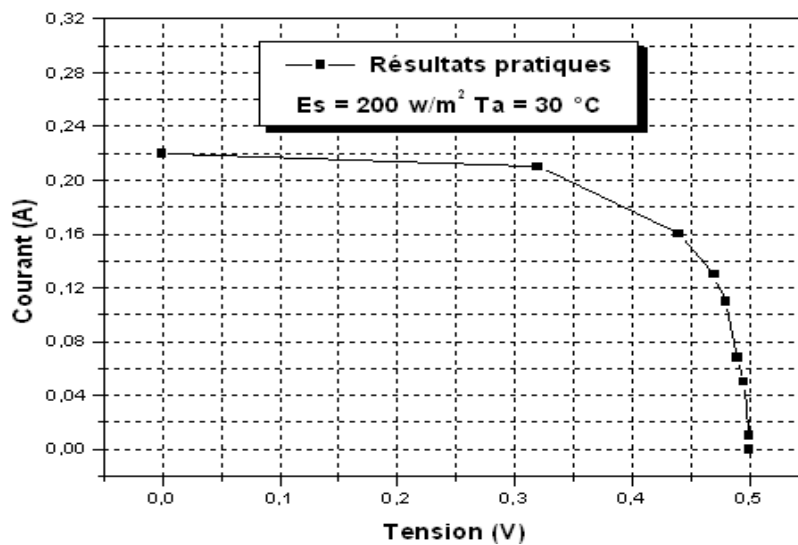


Figure III.1 : Caractéristique I-V. Données expérimentales.

III.2 Résultats de la simulation numérique

Afin de caractériser la cellule solaire, nous avons utilisé les modèles présentés pour fournir les valeurs de la tension V , du courant produit I et de la puissance générée P .

L'augmentation d'ensoleillement (flux lumineux) se traduit par un déplacement de la caractéristique $I=f(V)$ suivant l'axe des courants. L'accroissement du courant de court-circuit est beaucoup plus important que celui de la tension à circuit ouvert étant donné que le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement, alors que celle de la tension à circuit ouvert est logarithmique.

L'influence du flux lumineux sur la caractéristique de la cellule solaire est représentée sur les figures III-2, III-3, III-4 et III-5 pour une température constante.

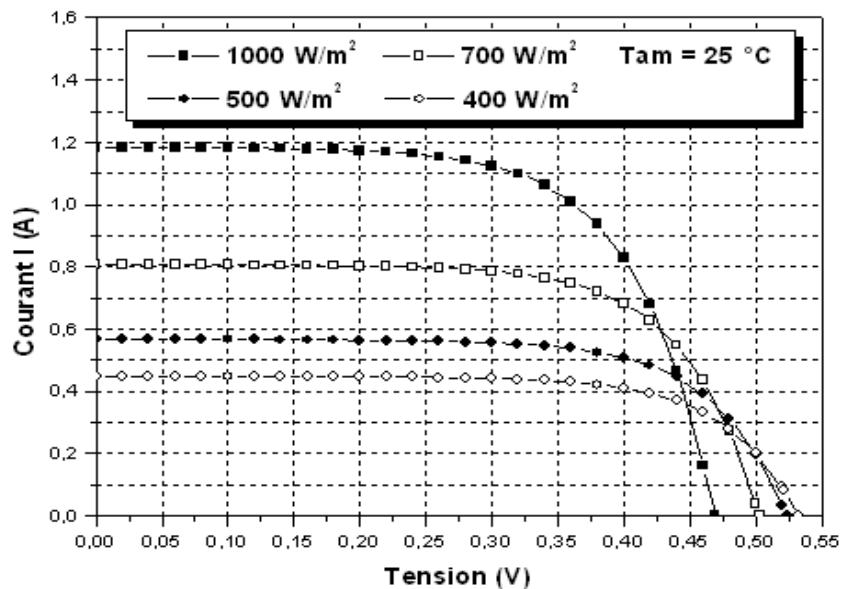


Figure III.2 : Caractéristique I-V pour différents éclairagements. Modèle à une diode.

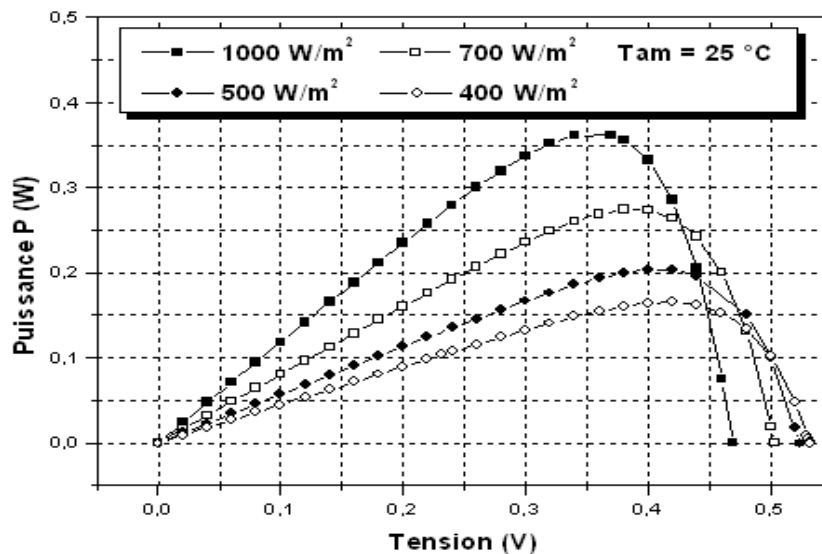


Figure III.3 : Caractéristique P-V pour différents éclairagements. Modèle à une diode.

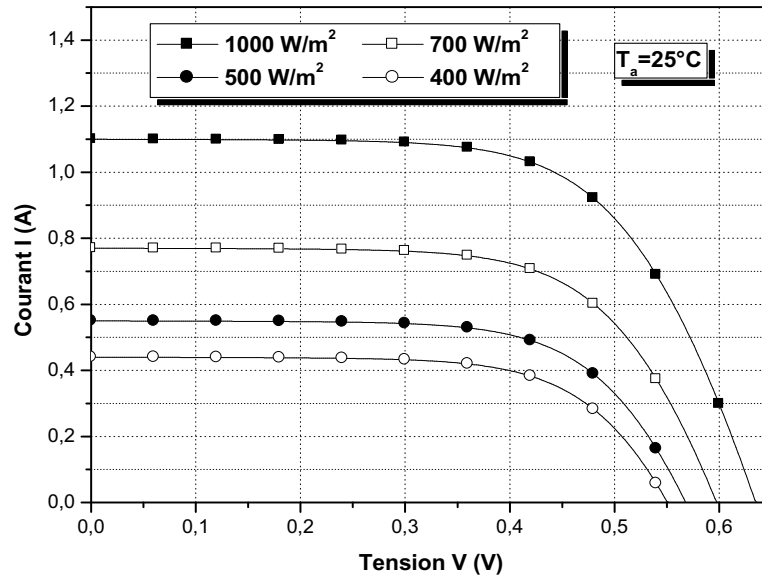


Figure III.4 : Caractéristique I-V pour différents éclairagements. (Modèle à deux diodes).

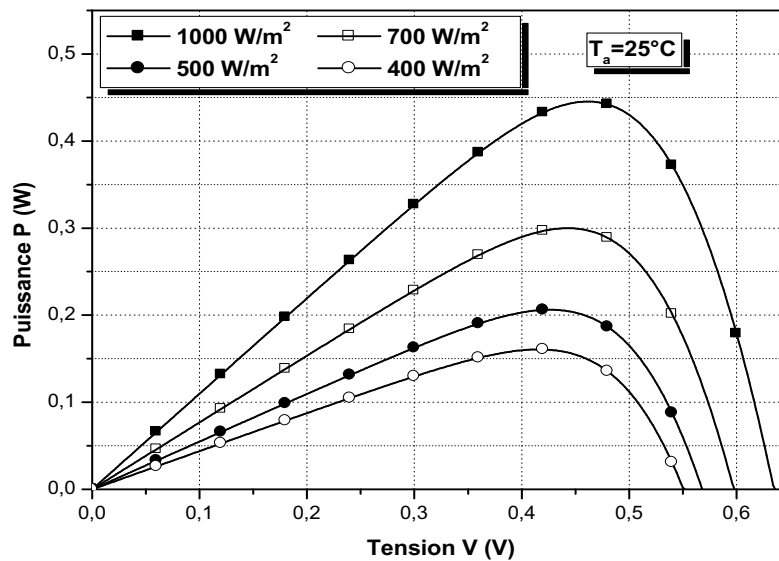


Figure III.5 : Caractéristique P-V pour différents éclairagements (Modèle à deux diodes).

Si la température de la cellule augmente, le photo-courant I_{ph} augmente également, ceci est due principalement à la diminution de la largeur de la bande interdite du matériau. Cette augmentation est de l'ordre de 0,1% par degré °C. Le courant direct de la jonction augmente aussi, mais beaucoup plus vite et entraînant une diminution de la tension de circuit ouvert de l'ordre de 2 mV par cellule. La diminution de la puissance fournie est estimée à environ 0,5% par degré pour un module.

L'influence de la température sur la caractéristique de la cellule solaire est représentée sur les figures III.6, III.7, III.8 et III.9 pour un éclairement fixe.

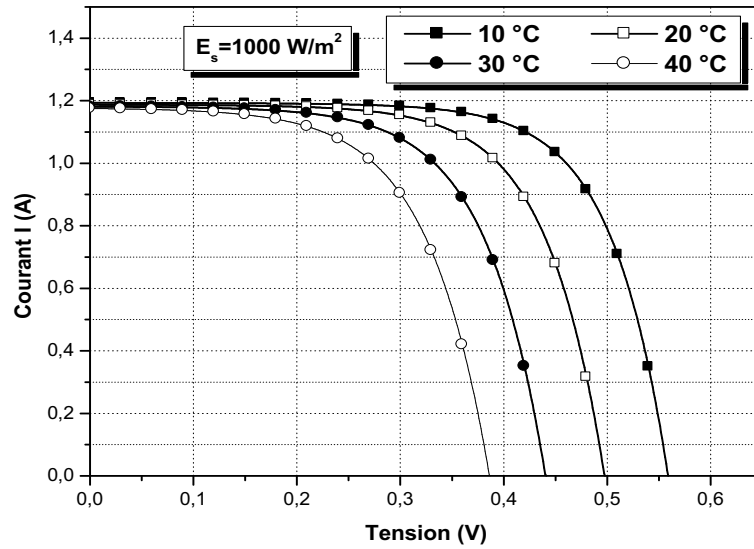


Figure III.6 : Caractéristique I-V pour différentes températures (Modèle à une diode).

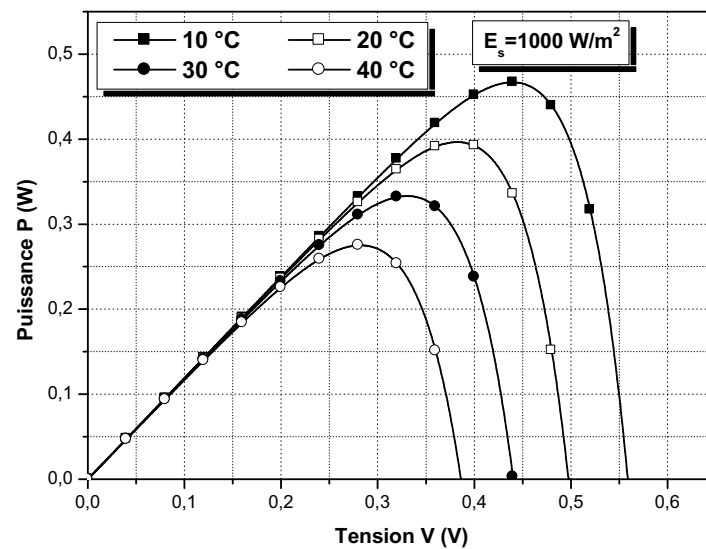


Figure III.7 : Caractéristique P-V pour différentes températures. (Modèle à une diode).

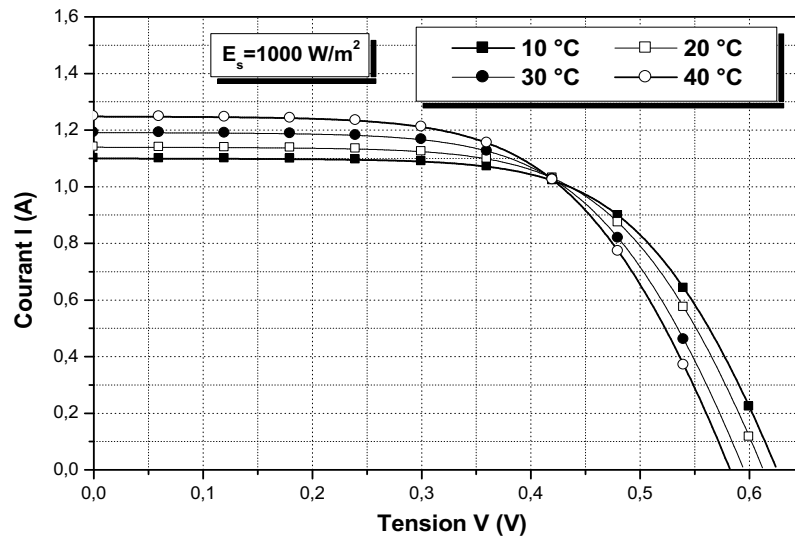


Figure III.8 : Caractéristique I-V pour différentes températures.
(Modèle à deux diodes).

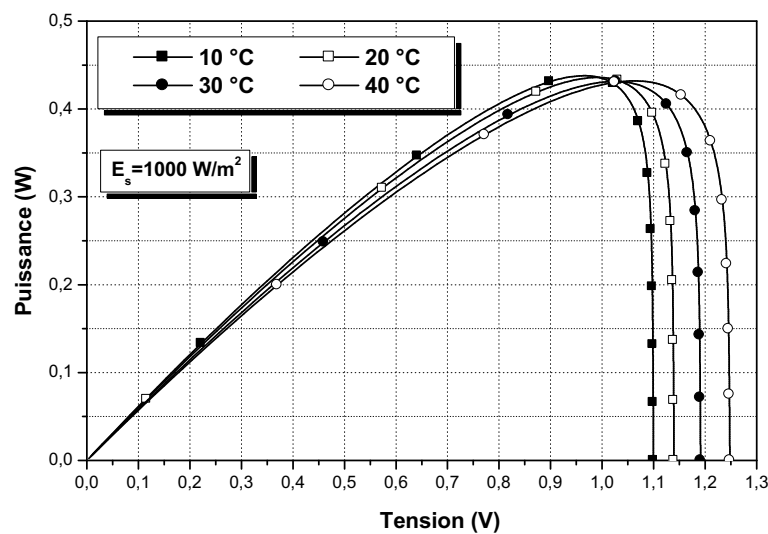


Figure III.9 : Caractéristique P-V pour différentes températures.
(Modèle à deux diodes).

III.3 Validation des résultats

Le tableau ci-dessous donne des valeurs théoriques calculées par les deux modèles utilisés. La confrontation des résultats sera indiquée sur les figures III.10 et III.11.

Module SM110	Une diode		Deux diodes		Données du constructeur
	cellule	module	cellule	module	
Puissance maximale P_{\max} (W)	0,364	78,624	0,445	96,12	110
Puissance absorbée P_{ab} (W)	2,5	540	2,5	540	540
Rendement P_{\max}/P_{ab}	14,56	14,56	17,8	17,8	12,2
I_{cc} (A)	1,184	3,552	1,1	3,3	3.45
V_{oc} (V)	0,469	33,768	0,636	45,792	43.5

Tableau III.2 : Quelques données expérimentales

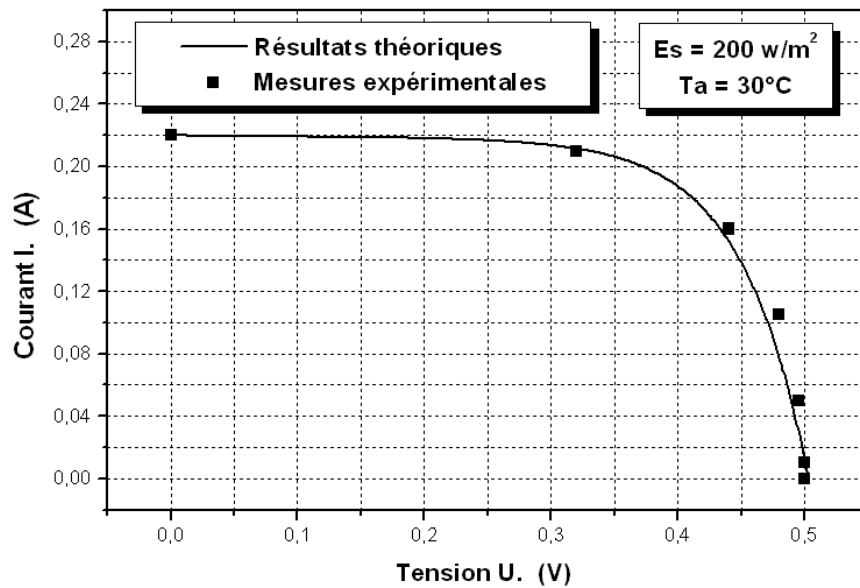


Figure III.10 : Caractéristique I-V pratique et théorique
Modèle à une diode

Nous constatons d'après la figure III.10 que les valeurs mesurées se coïncident avec celles calculées par les codes de calcul réalisés.

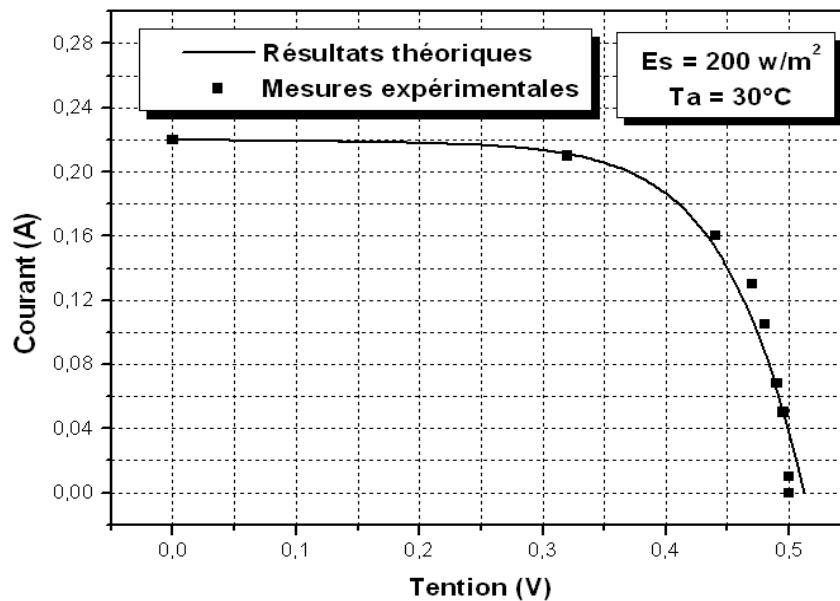


Figure III.11 : Caractéristique I-V pratique et théorique
Modèle à deux diodes

De même, on peut déduire d'après la figure III.11 que la concordance s'avère acceptable. Le modèle mathématique simulé présente un bon accord avec les caractéristiques expérimentales.

III.4 Exemple d'application. Utilisation d'un contrôleur d'Electrolyzer pour la production de l'hydrogène

Dans cette partie, nous avons choisi un banc d'essai faisant partie de la bibliothèque de l'outil de simulation TRNSYS 16 pour calculer les puissances et les courants générés par les panneaux solaires. Nous allons ensuite étudier l'influence de quelques paramètres intensifs et plus particulièrement la température ambiante et l'éclairement solaire.

Cet exemple indique l'utilisation du Type100a (contrôleur d'Electrolyzer) alimenté par un générateur photovoltaïque. Le contrôleur est utilisé en mode de puissance variable.

Si la puissance fournie par la source renouvelable (par exemple le panneau photovoltaïque) est plus grande que la puissance minimale de l'electrolyzer, cette dernière est utilisée comme seuil de départ. Or si la puissance fournie par le générateur photovoltaïque est inférieure à la puissance demandée par la charge, une énergie additionnelle délivrée par le réseau compensera le manque.

Si l'état de charge du stockage de l'hydrogène est au dessus d'un certain seuil, l'electrolyzer est mis en état de ralenti.

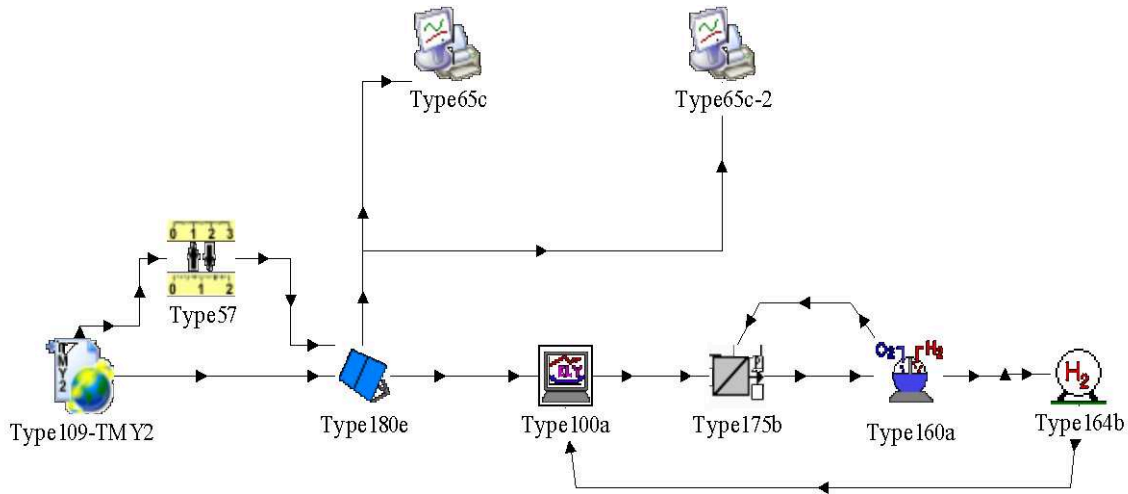


Figure III.12 : contrôleur d'electrolyzer alimenté par un générateur photovoltaïque

Type 57: convertisseur d'unité.

Type180e: modèle mathématique d'un générateur photovoltaïque. Il est basé sur un circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque en silicium. C'est un modèle à une diode donné par Duffie et Beckman en 1991. Les paramètres d'entrée sont:
 NCSEER = 150. Nombre de cellules PV en série par module PV.
 NMSEER = 4. Nombre de modules PV en série dans la rangée.
 NMPAR = 40. Nombre de modules PV en parallèle dans la rangée.
 S = 1.5 m². Surface d'un module photovoltaïque.

Type175b: modèle mathématique jouant le rôle d'un outil de traitement de puissance, basé sur les courbes empiriques de l'efficacité pour les convertisseurs électriques (DC/DC) ou les inverseurs (DC/AC ou AC/DC).

TYPE160a: modèle mathématique d'un electrolyzer alcalin à haute pression de l'eau. Le modèle est basé sur une combinaison de la thermodynamique fondamentale, de la théorie de transfert thermique, et des rapports électrochimiques empiriques. Un modèle thermique dynamique est également inclus. La

température d'electrolyzer peut être indiquée comme entrée, ou être calculée à partir d'un modèle thermique simple ou détaillé (Ulleberg, 1998; 2001).

TYPE164: modèle de stockage d'hydrogène H_2 comprimé qui calcule la pression dans le stockage, basé sur l'équation Van Der Waals (Çengel et Boles, 1989; Ulleberg, 1998).

III.4.1 Effet de l'éclairement sur la puissance produite et le courant généré par les panneaux photovoltaïques

Cette étude consiste à voir l'impact et l'influence de l'éclairement solaire sur le courant généré et la puissance produite par le système photovoltaïque. La simulation numérique a été effectuée sous l'environnement TRNSYS 16. Les résultats et les valeurs trouvées sont présentés sur les figures ci-dessous. (III.13...l'III.18).

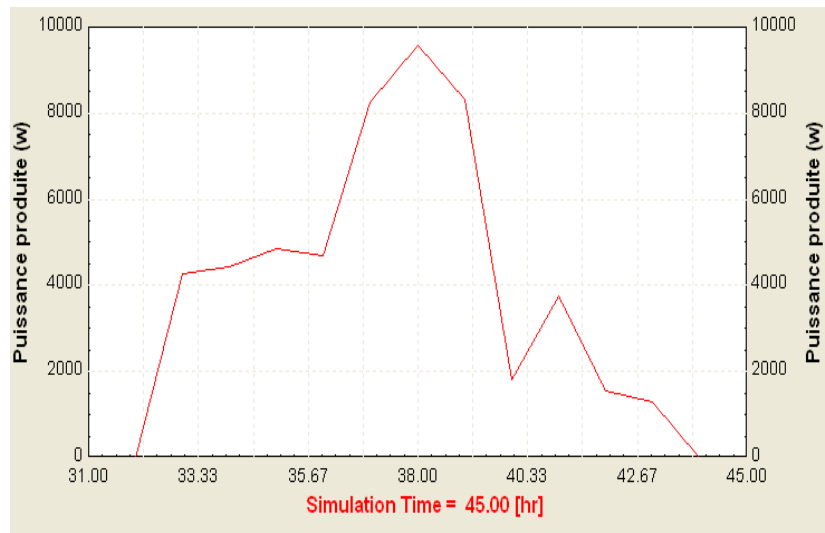


Figure III.13: Effet de l'éclairement sur la puissance produite
 $G = 1000 \text{ w/m}^2$, $T_{am} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

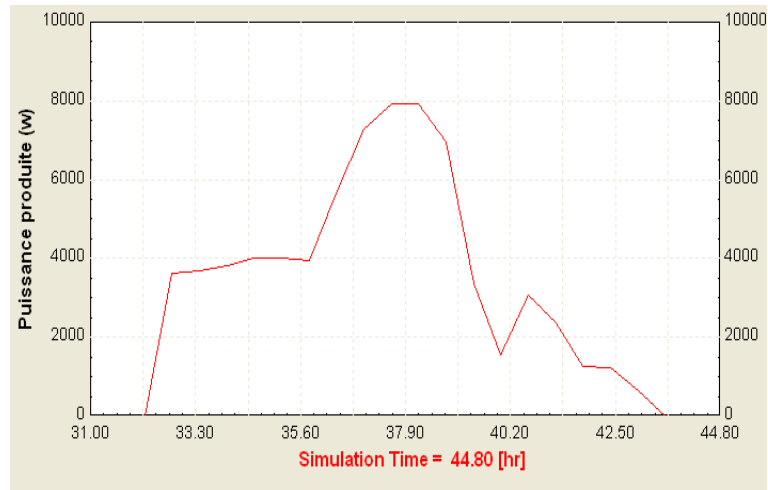


Figure III.14 : Effet de l'éclairement sur la puissance produite
 $G = 750 \text{ w/m}^2$, $T_{am} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

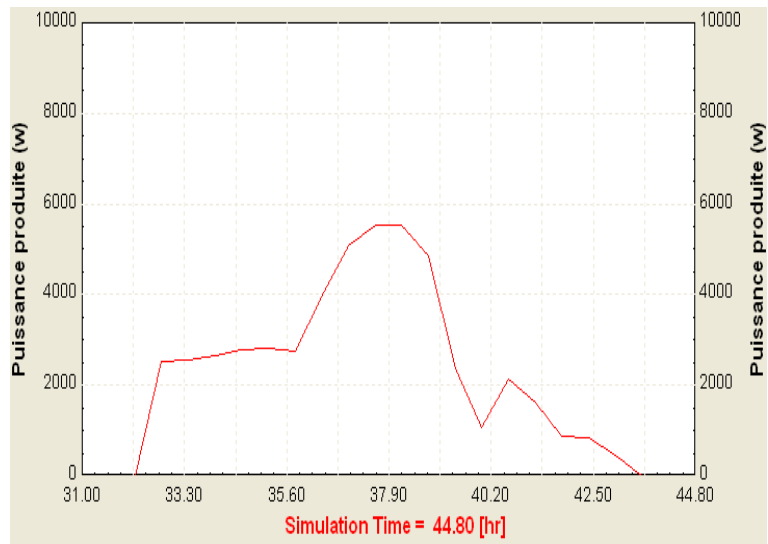


Figure III.15 : Effet de l'éclairement sur la puissance produite
 c) $G = 400 \text{ w/m}^2$, $T_{am} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

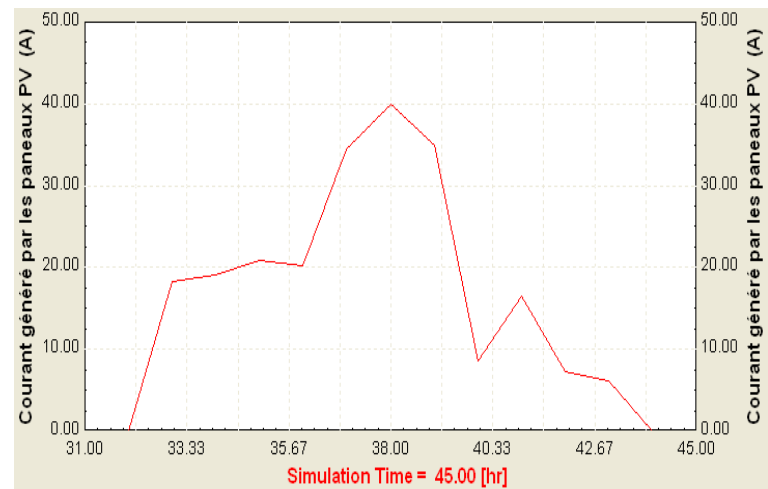


Figure III.16 : Effet de l'éclairement sur le courant produit
 $G = 1000 \text{ w/m}^2$, $T_{am} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

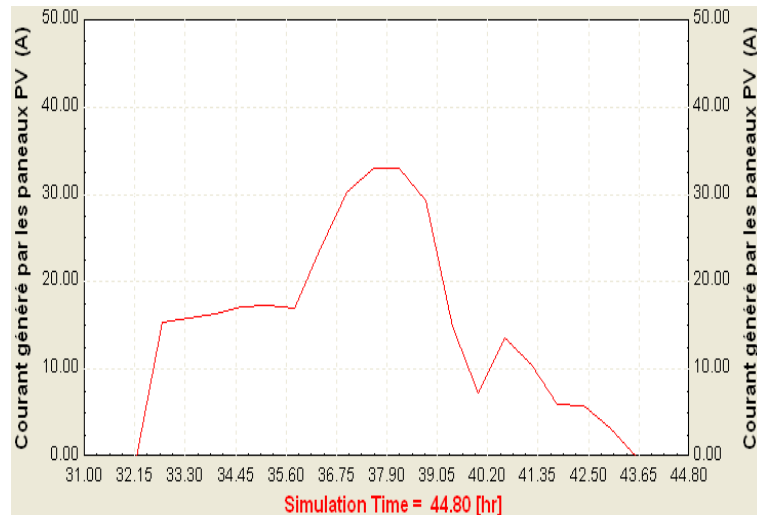


Figure III.17 : Effet de l'éclairement sur le courant produit
 $G = 750 \text{ w/m}^2$, $T_{am} = 20 \text{ °C}$

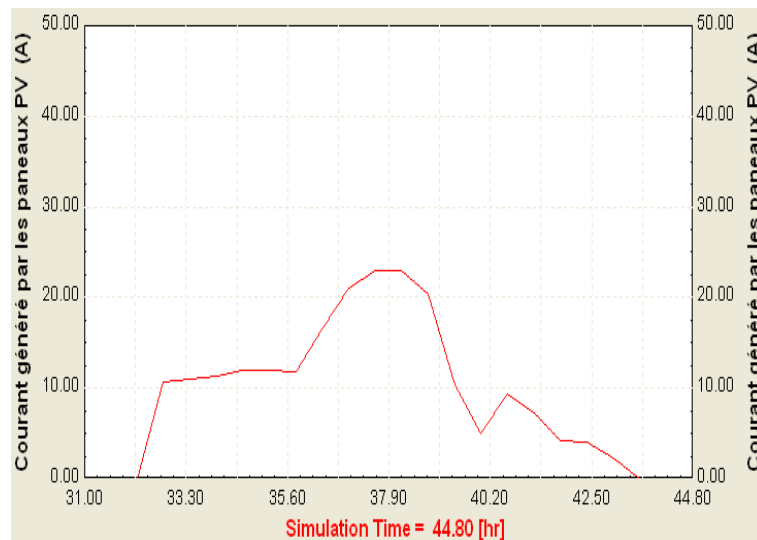


Figure III.18 : Effet de l'éclairement sur le courant produit
 $G = 400 \text{ w/m}^2$, $T_{am} = 20 \text{ °C}$

III.4.2 Effet de la température ambiante sur la puissance produite et le courant généré par les panneaux photovoltaïques

Cette partie est consacrée cette fois ci à prouver l'influence de la température ambiante sur la puissance produite par le système photovoltaïque durant plusieurs journées. La simulation numérique a été effectuée sous l'environnement TRNSYS 16. Les résultats et les valeurs trouvées sont présentés sur les figures ci-dessous (fig.III.9 à fig. III.21).

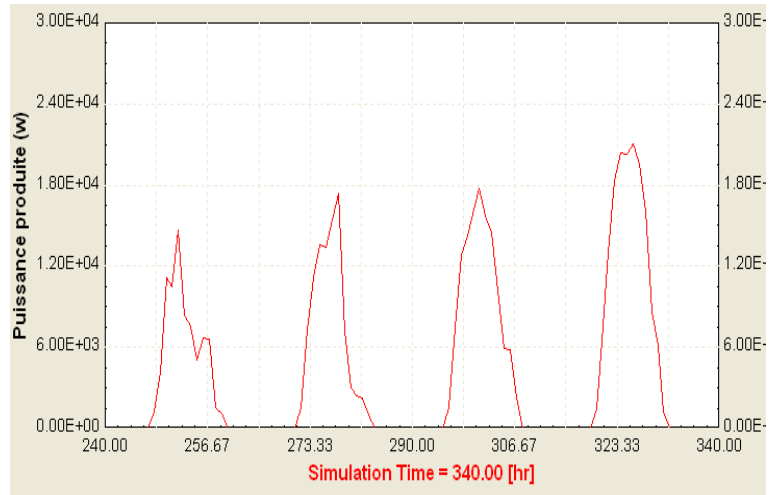


Figure III.19 : Effet de la température sur la puissance produite
 $G = 800 \text{ w/m}^2$, $T_{am} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$

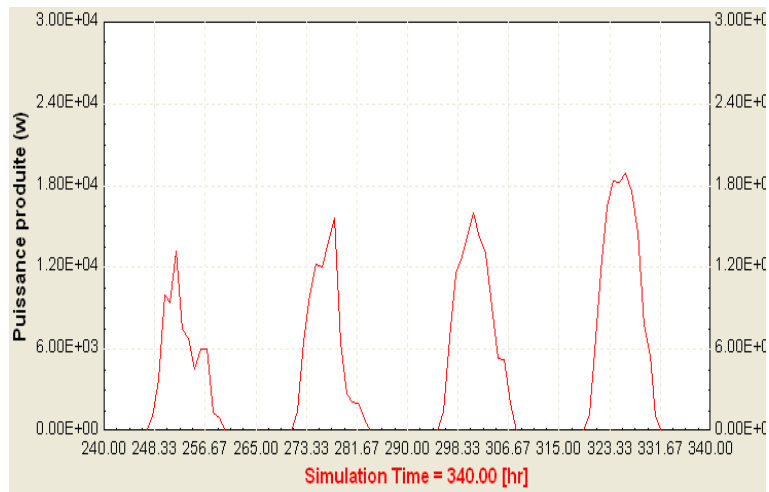


Figure III.20 : Effet de la température sur la puissance produite
 $G = 800 \text{ w/m}^2$, $T_{am} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

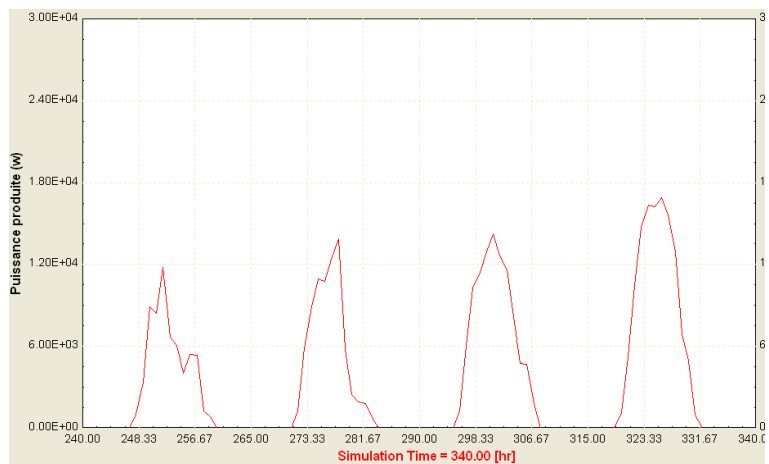


Figure III.21 : Effet de la température sur la puissance produite
 $G = 800 \text{ w/m}^2$, $T_{am} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$

III.5 Comparaison entre les deux modèles mathématiques [18]

Afin de mettre en évidence une comparaison adéquate et bien conduite entre les deux modèles, nous avons exploité des mesures effectuées par Monsieur Mohammed Sadok exposées dans un article publié dans *Renewable Energy* 33 (2008) 2516– 2524 portant sur « Outdoor Testing of Photovoltaic Arrays in the Saharan Region ». Nous allons confronter chaque fois les valeurs délivrées par notre simulation avec quelques valeurs expérimentales associées à un module photovoltaïque. C'est pourquoi, il est légitime de tracer sur les figures III.22 et III.23 la caractéristique I-V trouvée par les deux modèles proposés. Cette étape sera suivie par une autre étape incontournable qui consiste à présenter dans la figure III.24 la variation de l'erreur absolue commise pour chaque cas.

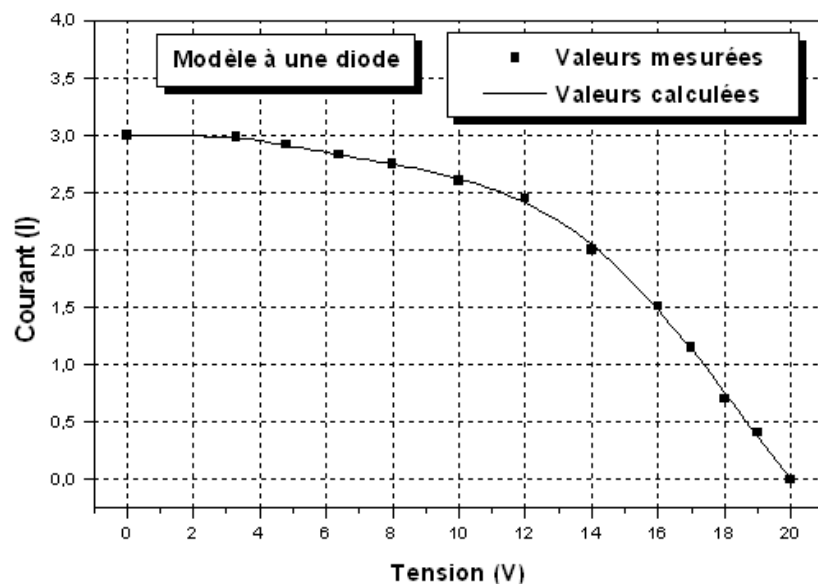


Figure III.22 : Caractéristique I-V. Confrontation de la théorie avec l'expérience.
Modèle à une diode. $G = 840 \text{ w} / \text{m}^2$, $T_{\text{am}} = 24 \text{ }^\circ\text{C}$.

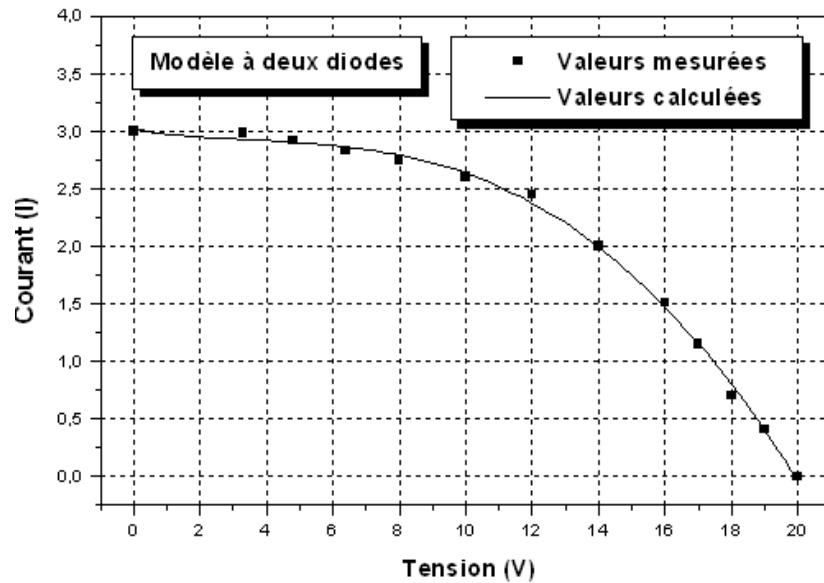


Figure III.23 : Caractéristique I-V. Confrontation de la théorie avec l'expérience. Modèle à deux diodes. $G = 840 \text{ w / m}^2$, $T_{\text{am}} = 24 \text{ }^\circ\text{C}$.

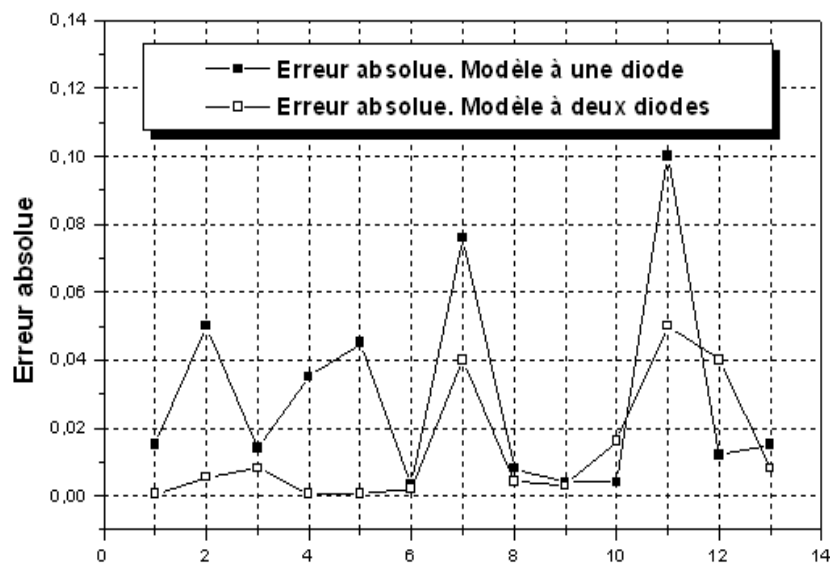


Figure III.24 : Erreur absolue commise par les deux méthodes

III.6 Interprétation et conclusion

Les influences de l'éclairement et de la température sur la puissance pouvant être délivrée par un panneau PV sont importantes. Lorsque l'irradiation varie pour une température donnée, le courant de court-circuit I_{cc} varie proportionnellement à l'irradiation. Dans un même temps, la tension de circuit ouvert V_{oc} (à vide) varie très peu. Par contre, si la température croît à irradiation constante, la tension V_{oc} décroît alors que le courant I_{cc} croît légèrement. De ces données, on peut estimer qu'en fonction des conditions de

fonctionnement auxquelles on va soumettre le panneau, on peut en déduire la puissance qu'il va pouvoir délivrer.

Il faut cependant prendre quelques précautions quant à l'utilisation de ces données pour estimer la quantité d'énergie délivrée par un générateur.

Dans ce travail, nous avons utilisé deux modèles mathématiques du panneau photovoltaïque SM 110 de Siemens. Nous avons montré aussi le bon accord entre l'expérience et la simulation.

D'après la validation effectuée, on peut dire que ces modèles régissent le fonctionnement électrique des panneaux solaires.

Le modèle à deux diodes a un léger avantage, car il fait appel à la recombinaison des porteurs minoritaires dans le volume du matériau.

Conclusion Générale

Ce travail contribue à la modélisation d'une cellule solaire. Les deux modèles utilisés sont: le modèle à une diode et le modèle à deux diodes.

Nous avons établi des programmes de calculs sous les environnements Maple 6 et Matlab 7.0 permettant de tracer la caractéristique I-V et de calculer la puissance maximale délivrée par la cellule photovoltaïque correspondante.

Ces études sont effectuées sur une cellule d'un panneau solaire Siemens SM110 et sur un module de type X910023. L'objectif est de tester les paramètres intensifs et influents sur la modélisation d'un générateur ou d'une cellule photovoltaïque. On s'intéresse plus particulièrement à l'effet de la température et de l'éclairement solaire incident. Notre programme est utilisé pour générer les caractéristiques théoriques I-V et PV, il peut être facilement adapté pour le calcul d'autres effets (température, éclairement) sur la performance des dispositifs photovoltaïques. Nous avons vu l'influence de ces paramètres sur un banc d'essai faisant partie de la bibliothèque de l'outil de simulation TRNSYS 16 pour calculer les puissances et les courants générés par les panneaux solaires. De ce fait, on peut déduire que TRNSYS16 est un d'outil qui devient un élément incontournable pour valider le concept énergétique ainsi que pour développer et expérimenter des approches innovatrices.

La représentation d'une cellule photovoltaïque par le circuit équivalent à une ou à deux diodes semble correcte. Malgré ça, le modèle à deux diodes présente quand même un léger avantage, car il fait appel à la recombinaison des porteurs minoritaires dans le volume du matériau. Ces résultats sont justifiés par le simple calcul d'erreur absolue effectué dans le chapitre 3. Le modèle à deux diodes est très bon si l'on possède une quantité suffisante de données expérimentales pour déterminer l'ensemble des paramètres. Reste, à vérifier la validité du modèle pour d'autres types de cellules.

L'équation théorique dérivée de ces pseudos circuits associée à nos observations nous a permis de déterminer les paramètres I_{cc} , V_{co} , P_{max} , η .

Naturellement, ces modèles électriques ne sont pas exacts car une cellule réelle est constituée d'un réseau réparti de cellules élémentaires connectées en parallèle sur une ligne de transmission. Néanmoins, ils fournissent une précision suffisante dans la plupart des cas

et sont largement utilisés comme schémas de référence dans l'analyse des performances photovoltaïques.

Par ce travail, nous pensons avoir apporté une contribution à l'étude des caractéristiques photovoltaïques de la cellule solaire.

Annexe

Annexe 1:**Intelligent Module Design [19]**

The Siemens SM110/SM100 single crystalline solar module is available in a framed and a laminate version. Both modules feature a rugged laminate design and PowerMax® solar cells to provide maximum energy production throughout the day. The module has a rated output of 110 WP/100 WP and is available in a 12 volt and as the SM110-24/SM100-24 in a 24 volt version. The efficient design of the SM110/SM100 module, with its large surface area, is ideally suited for medium and high output applications.



SM110/SM100		SM110		SM100	
Electrical Parameters		12V	24V	12V	24V
Maximum power rating, Pmax	[Watts]	110	110	100	100
Minimum power rating, Pmin	[Watts]	100	100	90	90
Rated current, Imp	[Amps]	6.3	3.15	5.9	2.95
Rated voltage, Vmp	[Volts]	17.5	35.0	17.0	34.0
Short circuit current, Isc	[Amps]	6.9	3.45	6.5	3.25
Open circuit voltage, Voc	[Volts]	21.7	43.5	21.0	42.0
Thermal Parameters					
Nominal operating cell temperature ²	[°C]	45(+or-)2			
Change of Isc with temperature		+1.2mA/°C (+0.04%/K)			
Change of Voc with temperature		-0.0775 Volts/°C (-0.34%/K)			
Qualification Test Parameters					
Temperature cycling range	[°C]	-40 to +85			
Humidity, freeze, damp heat condition	[% RH]	85			
Maximum system voltage	[Volts]	1000 per ISPRA (EC) 600 per UL1703			
Wind loading or surface pressure	[N/m ²] (lb/sqft)	[2400] (50)			
Maximum distortion ⁴	[degrees]	1.2			
Hailstone impact withstand (diameter @ velocity)	[mm @ m/s] (in @ MPH)	25 @ 23 (1.0 @ 52)			
Physical Parameters					
Number of cells in series		72			
Length	[mm] (in)	1316 (51.8)			
Width	[mm] (in)	660 (25.98)			
Depth (without box)	[mm] (in)	40 (1.6)			
Weight	[kg] (lb)	11.5 (25.1)			

Warranty			
Power \geq 90% of minimum power rating above	[Years]	10	
Power \geq 80% of minimum power	[Years]	25	
1	Determined under standard test conditions (STC): Irradiance = 1000w/m ² cell temperature = 25 °C; solar spectral irradiance per ASTM E892 (Air Mass = 1.5).		
2	Determined under nominal operating conditions (NOC): Irradiance = 800 w/m ² ambient temperature = 20 °C; wind speed = 1m/s.		
3	Qualification Tests performed as per CEC 503 Test Specification, to ensure durability and performance in outdoor conditions.		
4	Diagonal lifting of module corner with three corners fixed.		
5	To original consumer purchaser. See full Limited Warranty for all conditions.		

Référence Bibliographique

- [1] Corinne ALONSO. 'Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie'. UNIVERSITÉ PAUL SABATIER – TOULOUSE III, 12 Décembre 2003.
- [2] Etudes des Cellules Photovoltaïques, Olympiades de la Physique 2004.
- [3] A. Zerga, 'Optimisation du rendement d'une cellule solaire à base de silicium monocristallin de type n⁺p', Mémoire de Magistère Tlemcen-1998.
- [4] Energie solaire photovoltaïque.doc / B. Flèche - D. Delagnes / juin 07.
- [5] Centrale photovoltaïque. Guide pour le dimensionnement et la réalisation de projets. A l'usage des bureaux d'ingénieurs. PACER.
- [6] Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie, UNIVERSITÉ PAUL SABATIER – TOULOUSE III, Décembre 2003.
- [7] M. Belhadj, 'Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque. Mémoire de magistère', Université de Béchar - 2008.
- [8] H CHENOUI, 'Optimisation du procédé technologique de réalisation d'une cellule solaire par la technique de diffusion'. Mémoire de Magistère, Université de Batna-2005
- [9] Etude de la conversion photovoltaïque : effets des résistances parasites des photopiles. Laboratoire d'Electronique et de Physique des Interfaces, Institut des Sciences de l'Ingénieur de Nancy, Parc Robert Bentz, 54500 Vandoeuvre, France. P. H. Nguyen, C. Michel et J. Bottin.
- [10] Rapport de stage projet de fin d'études Ingénieur Technique Industrielle, Septembre 2006, Réalisation de Technique MPPT numérique, par Alain Bilbao Learreta, Université Virgile.
- [11] H. Khachab, 'Modélisation d'une cellule solaire sous concentration'. Mémoire de magistère, CUB Béchar - 2001.
- [12] <http://lyc-mgenevoix-ingre.tice.ac-orleans-tours.fr/php5/Cours/Cours/Analogique/diod-txt.pdf>
- [13] 4th International Conference on Computer Integrated Manufacturing CIP'2007. Modélisation d'un générateur photovoltaïque dans l'environnement « Matlab ». D.Saheb-Koussa, M.Haddadi.
- [14] R. Maouedj, 'Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah'. Mémoire De Magistère Décembre 2005.

- [15] http://www5.epfl.ch/webdav/site/polymaths/users/107044/public/PM_08/H7-Energie_solaire.pdf
- [16] Olivier GERGAUD, Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur, Thèse de Doctorat de l'école Normale Supérieure de Cachan 9 décembre 2002
- [17] D.L. King, J.A. Kratochvil, W.E. Boyson, and W.I. Bower, Sandia National Laboratories. 'Field experience with a new performance characterization procedure for photovoltaic arrays'
- [18] Outdoor testing of photovoltaic arrays in the Saharan region. Mohammed Sadok, Ahmed Mehdaoui. Research Unit of Renewable Energy in Saharan Middle (URER/MS), B.P. 478, Adrar 01000, Algeria. (Renewable Energy, journal homepage: www.elsevier.com/locate/renene)
- [19] http://www.innovationhouse.com/products/solar_siemens_sm110_sm100.html.