

- Nous voyons que le plus grand rayonnement solaire est au mois de juillet (7566.7 wh/m²) et qui représente le plus grand nombre d'heures d'insolation (11.30h) ; Alors que la plus faible valeur du rayonnement solaire est dans le mois de Décembre (2388.4 wh/m²) avec une plus faible valeur pour le nombre d'heures d'insolation (5.08 h).
- Donc on peut dire que l'irradiation globale est directement proportionnelle aux moyennes mensuelles des insolation.
- L'analyse des courbes ci-dessous obtenues, indiquent que les valeurs du rayonnement global sont maximales en été, et minimales en hiver. Elles peuvent en effet dépasser 6 KWh/m², et l'énergie hors atmosphère peut dépasser 11 kWh/m² dans la période d'été.

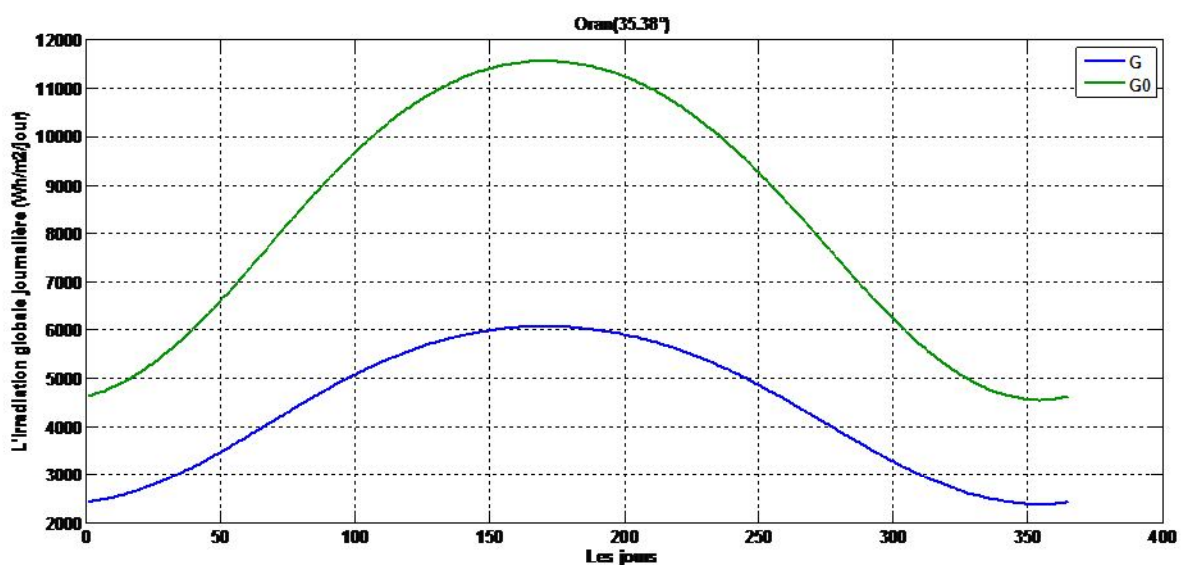


Fig. I-22 Distribution annuelle d'irradiation journalière dans le site d'Oran.

b. Deuxième modèle :

Le tableau suivant illustre les différents calculs et mesures effectués dans ce travail pour le deuxième modèle.

Tableau I-4 Calculs et mesures du rayonnement global

Mois	G ₀	G mesuré	L'humidité relative moyenne de l'air (R).	Durée d'insolation astronomique D ₀ (h)	Durée d'insolation mesurée D(h)	fraction d'insolation ⁶	G [Wh/m ²] calculé	Indice de clarté K _t
Jan	5025.6	2600	0,78	9.89	5.24	0.53	2608.3	0.5202
Fév	6354.50	3480	0,7622	10.70	5.67	0.53	3347.9	0.5258
Mar	8177.70	5140	0.7194	11.76	7.52	0.64	4821.0	0.5780
Avr	9933.69	5900	0,6911	12.89	8.12	0.63	5852.5	0.5890
Mai	11095.63	6410	0,7044	13.86	9.56	0.69	6763.8	0.6094
Jun	11542.97	7500	0,6661	14.36	9.90	0.69	7178.9	0.6214
Jull	11292.39	7390	0,6716	14.13	11.30	0.80	7506.2	0.6648
Aout	10333.95	6710	0,6627	13.30	10.50	0.79	6869.4	0.6635
Sep	8756.71	5710	0.6825	12.17	8.76	0.72	5493.0	0.6286
Oct	6879.64	3890	0,7194	11.05	7.29	0.66	4070.9	0.5924
Nov	5310.18	2760	0,745	10.10	5.35	0.53	2772.1	0.5229
Déc	4609.25	2230	0,7712	9.60	5.08	0.53	2357.7	0.5180

I.12.5 Paramètres statistiques :

L'erreur relative entre les valeurs mesurées (G_i) et celles calculées ($G_{cal,i}$) est donnée par :

$$e_i = \frac{(G_i - G_{cal,i})}{G_{cal,i}} \cdot 100$$

Les paramètres statistiques les plus abondants sont l'erreur biais moyen (MBE), le pourcentage erreur moyenne (MPE) et l'erreur quadratique moyenne (RMSE) [19-23].

$$RMSE = \left[\left(\frac{1}{m} \right) \sum_1^m e_i^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$MBE = \left(\frac{1}{m} \right) \sum_1^m |e_i|$$

$$MBE = \left(\frac{1}{m} \right) \sum_1^m e_i$$

m est le nombre de mesures concernées.

I.12.6 Comparaison entre les deux modèles :

Les résultats obtenus à partir des modèles étudiés sont simulés par le logiciel Matlab et qui correspondent aux jours type du mois comme le montre la figure (I.23) :

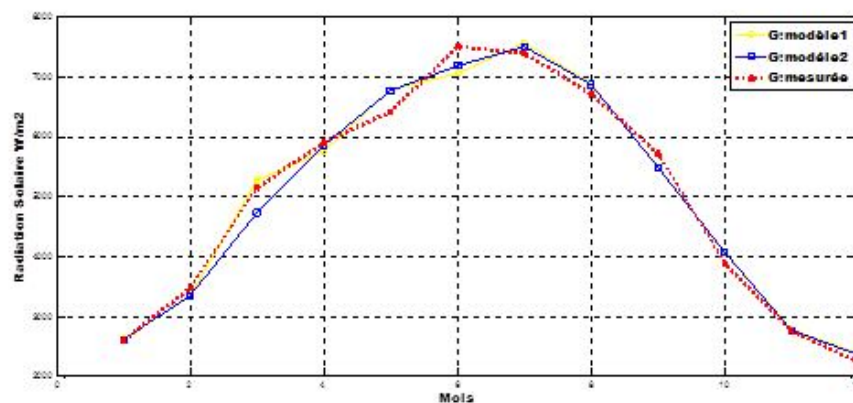


Fig. I-23 L'irradiation solaire globale mesurée et estimée pour le site d'Oran

Afin de réaliser une analyse critique des résultats obtenus, il a été effectué une comparaison des données expérimentales avec celles calculés, et nous avons calculé l'erreur relative des moyennes mensuelles de l'irradiation solaire globale sur le site d'Oran, les indicateurs statistiques de précision (MBE, MAE, RMSE). Les résultats obtenus sont regroupés dans le Tableau (I-5) ci-dessous.

Tableau I-5 Erreur relative moyenne

Mois	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Erreur relative moyenne (Modèle1) (%)	1.18	3.98	2.46	2.55	5.77	5.89	2.39	2.57	4.03	5.05	0.77	7.10
Erreur relative moyenne Model2(%)	0.31	3.79	6.20	0.80	5.51	4.28	1.57	2.37	3.80	4.65	0.43	5.72

Tableau I-6 Valeurs de MBE, MAE et RMSE.

	MBE	MAE	RMSE
Modèle1	-0.9051	3.6502	4.1155
Modèle2	-0.1427	3.2909	3.8691

Les valeurs du rayonnement solaire estimées par simulation à partir d'approches semi empirique considérées, sont comparées avec celles obtenues expérimentalement dans le site d'Oran. Cette comparaison montre que le deuxième modèle est plus proche des valeurs expérimentales que le modèle d'Angstrom ; par conséquent, nous pouvons considérer cela comme un modèle de référence pour la simulation de l'éclairement solaire dans le site étudié.

I.13 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté l'étude du gisement solaire avec ses deux aspects : géométrique et énergétique. L'aspect géométrique concerne les mouvements de la terre ; le mouvement de la rotation autour de l'axe des pôles et le mouvement de translation autour du soleil. L'étude de l'aspect énergétique du rayonnement solaire est caractérisée par la modélisation du flux solaire incident basé sur les modèles semi-empiriques de Perrin de Brichambaut et de Liu-Jordan. A travers ces modèles en utilisant le logiciel Matlab, on a pu estimer et vérifier expérimentalement l'énergie solaire journalière rayonnante pour une journée précise de l'année et pour des conditions climatiques sur la région d'Oran.

On a pu également estimer et vérifier expérimentalement des modèles du rayonnement solaire global mensuel reçu sur un plan horizontal (modèle d'Angstrom et modèle d'Angstrom amélioré par l'ajout d'un autre facteur climatique qui est l'humidité relative moyenne de l'air.

On a constaté d'après les relevés effectués pour le site d'Oran que cette région dispose d'un gisement solaire important. L'énergie acquise quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m^2 peut dépasser 6 kWh/m^2 dans la période d'été.

Ces résultats montrent que la région d'Oran dispose d'un climat très favorable à l'utilisation de l'énergie solaire et cela peut encourager l'exploitation de cette énergie.

I.14 Bibliographie chapitre I

- [1] Magazine Info Ressources Focus N°2/06 deuxième parution de l'an 2006, Page 3.
- [2] Yacef, R., Mellit, A., Belaid, S., "New combined models for estimating daily global solar radiation from measured air temperature in semi-arid climates: Application in Ghardaia, Algeria" *Energy Conversion and Management*. **79**: 606–615, 2014.
- [3] Belhadj Mohammed "Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome" thèse de magister, Université de Béchar 2007-2008.
- [4] C.Delerome "Revue internationale d'héliotechnique" année 1997.
- [5] Michel Capderou , Atlas solaire de l'Algérie, tome 1,2 ;O.P.U. 1986.
- [6] Iqbal M. An Introduction to Solar Radiation. Academic Press, Department of Mechanical Engineering, University of British Columbia, Canada, 1983.
- [7] J.A. Duffie and W.A. Beckman, 'Solar Engineering of Thermal Processes', 3rd Ed. JohnWiley and Sons, 2006.
- [8] Benbouza Naima "Etude du rayonnement solaire dans la région de Batna" thèse de magister, Université de Batna, 2008.
- [9] Gisement-solaire_Alain Ricaud_Jan-2011.doc
- [10] S. benlahmidi, N. moumami, A. moumami, K. aoues, A. labed "realisation d'une interface de simulation des performances des insolateurs plans" *Courrier du Savoir* ; **13**: 35-40, Avril 2012.
- [11] M.R. Yaïche, S.M.A. Bekkouche, "Conception et Validation d'un Programme sous Excel pour L'estimation du Rayonnement Solaire Incident en Algérie. Cas d'un Ciel Totalemment Clair" *Revue des Energies Renouvelables* ; **11**: 423-436, 2008.
- [12] A. Moumami, N. Hamani, N. Moumami, Z. Mokhtari, "Estimation Du Rayonnement Solaire Par Deux Approchessemi Empiriques Dans Le Site De Biskra " 8th International Meeting on Energetical Physics ; *Centre Universitaire de Béchar–Algérie*, 11 et 12 Novembre 2006.
- [13] M. BENSAFI, B. DRAOUI, M. HASNAT, N. KAID, "Elaboration d'un logiciel pour l'estimation de rayonnement solaire en Algérie" *Journal of Science Research* ; **4** : 20-24, 2001.
- [14] N. Keroumi, B. Ouradj, S. Slimi, A. Brihmat, N. Taibi, A. Tahri, " Estimation du rayonnement solaire au site de Béchar par le modèle de Liu Jordan " 11th International Meeting on Energetical Physics ; *Centre Universitaire de Béchar–Algérie* ; 16 et 17 Janvier, 2013.
- [15] H. Naim, A. Hassini, N. Benabadji, A. Bouadi "estimation et Validation d'un Modèle de Calcule de L'Irradiation Solaire Globale à Partir des Données in Situ de la Région D'Oran" *Journées de L'année Internationale de la Lumière 2015 JAIL'2015* ; USTO-MB ORAN, 15-16 Avril 2015.
- [16] R. shafiqur, O. talal, "Global solar radiation estimation" *Renew Energ* ; **12**: 369- 385, 1997.
- [17] H. M. Kandirmaz, K. Kaba, " Estimation of Daily Sunshine Duration from Terra and Aqua MODIS". *Adv Meteorol*, 1- 9, 2014.
- [18] I. Korachagaon, V. N. Bapat, "General formula for the estimation of global solar radiation on earth's surface around the globe" *Renew Energ*; **41**: 394-400. 2012.

- [19] A. M. Muzathik, "Daily global radiations estimate based on sunshine hours" *International Journal of Mechanical and Materials Engeneering* ; **6**: 75-80, 2011.
- [20] C, Tiba R. Aguiar, N. Fraidenraich "Analysis of a new relationship between monthly global solar irradiation and sunshine hours from a database of Brazil; *Renew Energ*; **30**: 957- 966, 2005.
- [21] F. S. Tymvios, C. P. Jacovides, S. C. Michaelides, C. Scouteli "Comparative study of Angstrom's and artificial neural networks' methodologies in estimating global solar radiation" *Sol Energy*; **78**: 752-762. 2005.
- [22] Z. Jin, W. Yezheng, Y. Gang "General formula for estimation of monthly average daily solar radiation in China" *Energ Convers Manage*; **46**: 257-268. 2005.
- [23] R. M. Darly "Solar radiation modelling and measurements for renewable energy applications: data and model quality" *Energy*; **30**: 1517-1531, 2005.

CHAPITRE II

II.1 Introduction

Les modules ou panneaux photovoltaïques sont composés de semi-conducteurs qui permettent de transformer directement la lumière du soleil en électricité.

Ces modules s'avèrent une source d'énergie électrique qui est sûre, fiable, sans entretien et non polluante. La majorité des modules solaires sur le marché aujourd'hui sont pourvus de garanties de plus de 20 ans, et ils fonctionneront bien au-delà de cette période.

Des millions de systèmes ont été installés dans le monde entier, de puissances différentes allant d'une fraction d'un watt à plusieurs mégawatts. Pour de nombreuses applications, les systèmes solaires électriques sont non seulement rentables, mais ils peuvent aussi représenter l'option la moins coûteuse.

Dans ce chapitre, on commencera par rappeler brièvement la généralité sur les générateurs photovoltaïques. On présente le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule PV et ses paramètres. Ensuite, on fait un rappel sur les générateurs PV et leurs performances.

II.2 Cellule PV

II.2.1 L'effet photovoltaïque

Le mot « photovoltaïque » signifie Lumière en Grec , il est composé de deux parties : « photos » (lumière) et du nom de famille du physicien italien (Alessandro Volta) qui inventa la pile électrique en 1800 et donna son nom à l'unité de mesure de la tension électrique, le volt.

Lorsqu'un matériau semi-conducteur est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont "bombardés" par les photons constituant la lumière ; sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être "arrachés".

Si l'électron revient à son état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau. L'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique.

Cependant, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons "arrachés" créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique : c'est l'effet photovoltaïque [1].

L'effet photovoltaïque constitue la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique au moyen de cellules généralement à base de silicium. Pour obtenir une puissance suffisante, les cellules sont reliées entre elles et constituent le module solaire.

L'effet photovoltaïque, c'est-à-dire la production d'électricité directement de la lumière, fut observée la première fois, en 1839, par le physicien français Edmond Becquerel. Toutefois, ce n'est qu'au cours des années 1950 que les chercheurs des laboratoires Bell, aux Etats-Unis, parvinrent à fabriquer la première cellule photovoltaïque, l'élément primaire d'un système photovoltaïque [1].

II.2.2 Principe de fonctionnement

Les cellules solaires photovoltaïques sont fabriquées à partir d'une jonction PN au silicium (diode). Pour obtenir du silicium dopé N, on ajoute du phosphore. Ce type de dopage permet au matériau de libérer facilement des électrons (charge -).

Pour obtenir du silicium dopé P, on ajoute du bore. Dans ce cas, le matériau crée facilement des lacunes électroniques appelées trous (charge +).

La jonction PN est obtenue en dopant les deux faces d'une tranche de silicium. Sous l'action d'un rayonnement solaire, les atomes de la jonction libèrent des charges électriques de signes opposés qui s'accumulent de part et d'autre de la jonction pour former un générateur électrique [2].

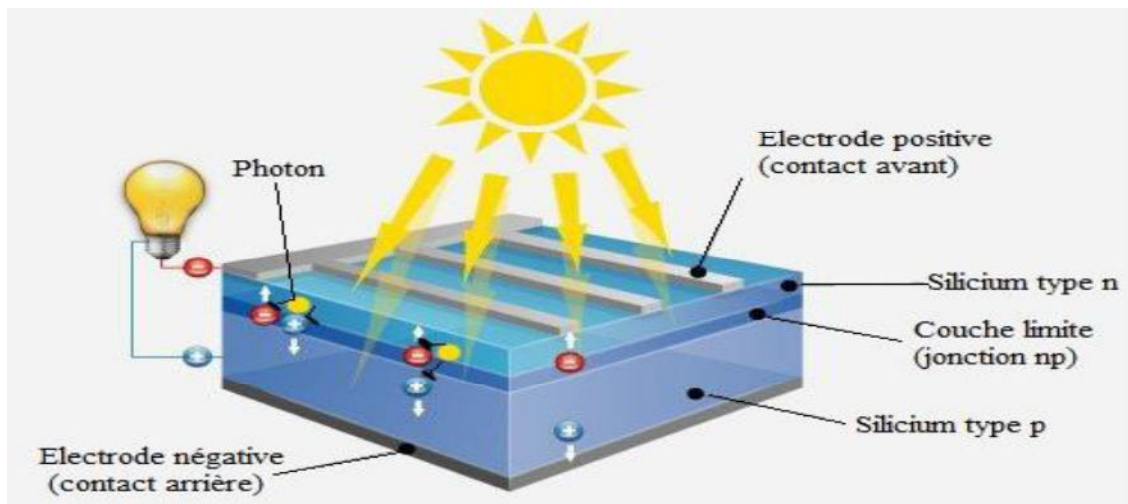


Fig. II-1 Schéma d'une cellule solaire

II.2.3 Modélisation de la cellule photovoltaïque :

a) Modèle idéal d'une cellule photovoltaïque :

On étudie la cellule photovoltaïque à partir du circuit équivalent donné par la figure (II-2) composé d'un générateur de courant et d'une diode en parallèle.

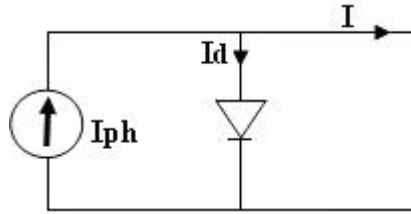


Fig. II-2 Schéma électrique idéal d'une cellule photovoltaïque

Donc le courant aux bornes de la cellule est [3]:

$$I = I_{ph} - I_d \quad (\text{II-1})$$

I_{ph} : photo- courant.

I_d : courant traversant la diode.

$$I_d = I_s \left[\exp\left(\frac{V}{U_T}\right) - 1 \right] \quad (\text{II-2})$$

Avec

$$U_T = \frac{kT}{q}$$

q : charge de l'électron ($1.9 \cdot 10^{-19} \text{c}$).

k : la constante de boltzman = $1,38064852 \times 10^{-23} \text{ J/K}$

U_T : tension thermique.

I_s : courant de saturation.

V : tension à la borne de la diode.

T : température absolue (en kelvin).

on traçant le courant (I) en fonction de la tension (v), on va avoir une soustraction de deux courbes [7, 20, 21]:

I_{ph} : le photo-courant.

I_d : la caractéristique de la diode $I(V)$.

La figure (II-3), représente les différentes courbes :

$$I(v)=I_{ph}-I_s \left[\exp \left(\frac{v}{V_t} \right) - 1 \right] \quad (\text{II-3})$$

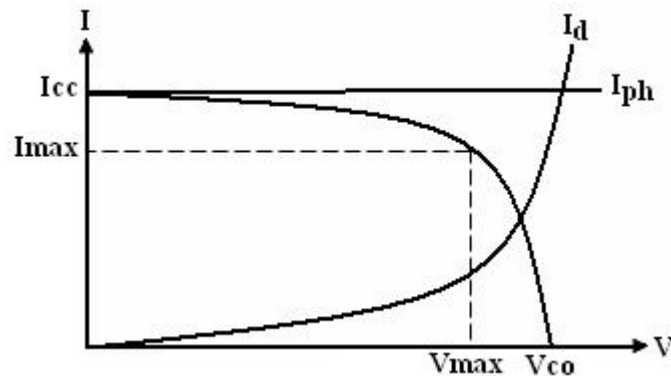


Fig. II-3 La caractéristique $I(V)$ d'une cellule photovoltaïque

b) Modèle réel d'une cellule solaire photovoltaïque :

Dans le cas d'une cellule photovoltaïque réelle, d'autres paramètres tenant compte des effets résistifs, des recombinaisons, des fuites vers les bords, doivent être pris en considération.

Le modèle mathématique du générateur photovoltaïque est basé sur le circuit équivalent.

Ce circuit est représenté sur la figure (II.4) par un générateur de courant I_{cc} , une diode et deux résistances R_s et R_{sh} . [4]

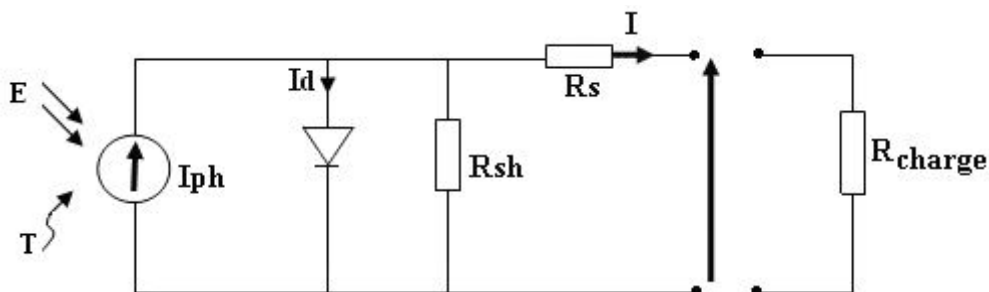


Fig. II-4 Schéma électrique réel d'une cellule photovoltaïque

R_s est une résistance série liée à la résistivité volumique et à l'impédance des électrodes et des matériaux. La pente de la courbe courant-tension au point V_{oc} représente l'inverse de la résistance série ($1/R_s$).

R_{sh} est une résistance shunt liée aux effets de bord et aux recombinaisons volumiques. La pente de la courbe courant tension au point I_{cc} représente l'inverse de la résistance shunt ($1/R_{sh}$).

Le photo courant I_{ph} crée dans la structure par une partie du rayonnement absorbé (ce courant est pratiquement le courant de court-circuit de la cellule).

- Le courant direct I_d d'obscurité de la jonction.
- Le courant I généré par la cellule et fourni à la charge.
- Le courant I_{sh} correspond au courant des connexions parallèles.

Cet équilibre s'écrit :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (II-4)$$

Selon le schéma équivalent d'une cellule solaire dans La figure (II.4), on a :

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{V + R_s I}{n U_t}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (II-5)$$

R_s : résistance série

R_{sh} : résistance shunt

A :Facteur de qualité

II.2.4 Différents types de cellules solaires :

Il existe différents types de cellules solaires photovoltaïques, et chaque type de cellules à un rendement et un coût qui lui est propre. Cependant, quel que soit leur type, leur rendement reste assez faible : de 5 à 22% de l'énergie qu'elles reçoivent.

Il existe trois principaux types de cellules [5] :

a) Cellules mono- cristallines :

La cellule monocristalline qui s'approche le plus du modèle théorique : cette cellule est effectivement composée d'un seul cristal divisé en deux couches. Les cellules monocristallines permettent d'obtenir de hauts rendements, de l'ordre de 15 à 22 %.

Ces cellules souffrent néanmoins des inconvénients :

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

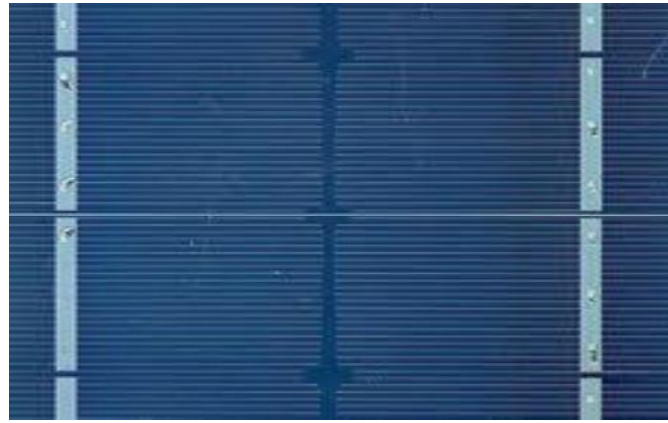


Fig. II-5 Cellules mono-cristallines.

b) Cellules poly-cristallines :

Pendant le refroidissement du silicium dans une lingotière, il se forme plusieurs cristaux. La cellule photovoltaïque est d'aspect bleuté, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux.

Les cellules poly- cristallines sont caractérisées par :

- Coût de production moins élevé.
- Nécessite moins d'énergie.
- Rendement de 13 % et jusqu'à 20 % en labo.



Fig. II-6 Cellules poly-cristallines.

c) Cellules amorphes :

Le silicium amorphe est apparu en 1976. Sa structure atomique est désordonnée, non cristallisée, mais il possède un coefficient d'absorption supérieur à celui du silicium cristallin.

Cependant, ce qu'il gagne en pouvoir d'absorption, il le perd en mobilité des charges électriques (rendement de conversion faible).

- Coût de production bien plus bas.
- Rendement de seulement 5 % par module et de 14 % au laboratoire.
- Fonctionne sous de très faible éclairement.



Fig. II-7 Cellule amorphe.

Grâce à la technologie des nouveaux matériaux tel que le tellure de cadmium (CdTe), l'arséniure de gallium (GaAs) ainsi que le diséléniure de cuivre et d'indium (CIS) ont permis d'obtenir des photopiles ayant des rendements 38 % au laboratoire[6].

II.2.5 Groupements des cellules photovoltaïques [7] :

Les cellules solaires ne sont pas employées seules et cela quel que soit leur type, si ce n'est pour l'alimentation de très petits circuits. Dans la plupart des cas, elles sont regroupées en grand nombre et associées à des dispositifs de régulation ou de stockage de l'électricité, par exemple, en vue de satisfaire une application déterminée.

La tension générée par une cellule photovoltaïque fonctionnant au point de puissance maximale et sous un éclairement de référence de 1 kW/m^2 est très faible pour être exploitée en milieu industrielle, par exemple pour le pompage de l'eau ou l'alimentation d'une installation électrique domestique. Quant au courant, il est fonction de la surface de captation de la cellule. En général, la puissance fournie par une cellule individuelle étant très petite, nous sommes donc appelés à réaliser des groupements séries ou parallèles des cellules afin de recueillir la tension et le courant nécessaires à une certaine application en fonction de la charge variable ou fixe à alimenter. Le groupement en série permet d'élever la tension disponible, le courant maximum débité (I_c) étant inchangé. Le groupement parallèle permet d'élever le courant débité tout en gardant la tension à vide (V_{co}) inchangée. Le groupement mixte ou série parallèle permet à la fois d'élever le courant et la tension, on parlera dans ce cas de module ou des panneaux solaires.

Il ne faudra connecter en série, en parallèle ou en mixte que les cellules identiques. La puissance maximale s'exprime en Watts crête.

La forme générale de la caractéristique (I-V) d'un module solaire ou photovoltaïque est identique à celle d'une cellule, par conséquent tout ce qui a été dit pour une cellule individuelle restera valable pour un groupement.

a) Association série

En effet, l'association en série des cellules délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule [8]. La caractéristique d'un groupement de N_s modules solaires en série est représentée par la figure suivante

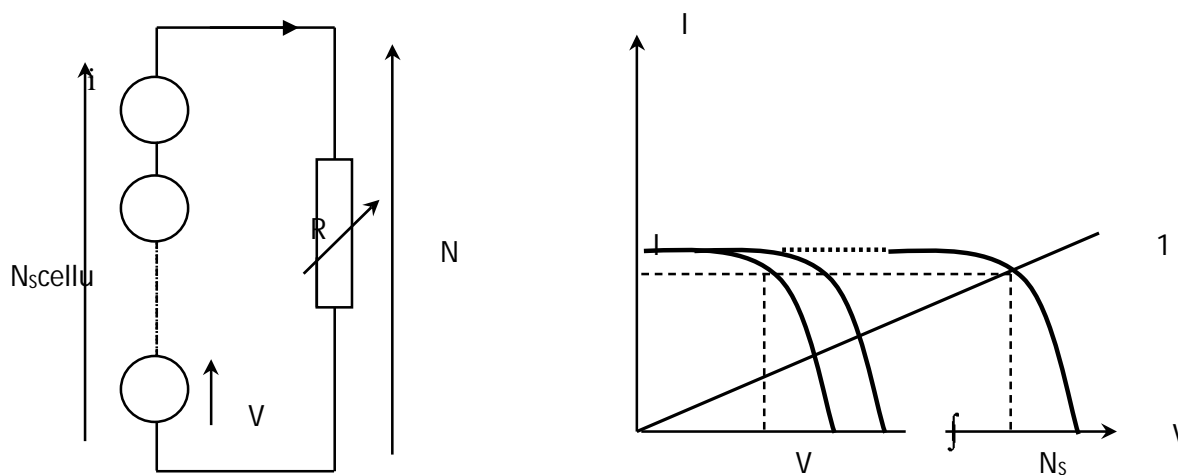


Fig. II-8 Association de N_s modules solaires en série

b) Association Parallèle

Tandis que l'association en parallèle des photopiles délivre un courant égal à la somme des courants individuels et une tension égale à celui d'une seule cellule [8]. La caractéristique d'un groupement de N_p modules solaires en parallèle est représentée par la figure suivante :

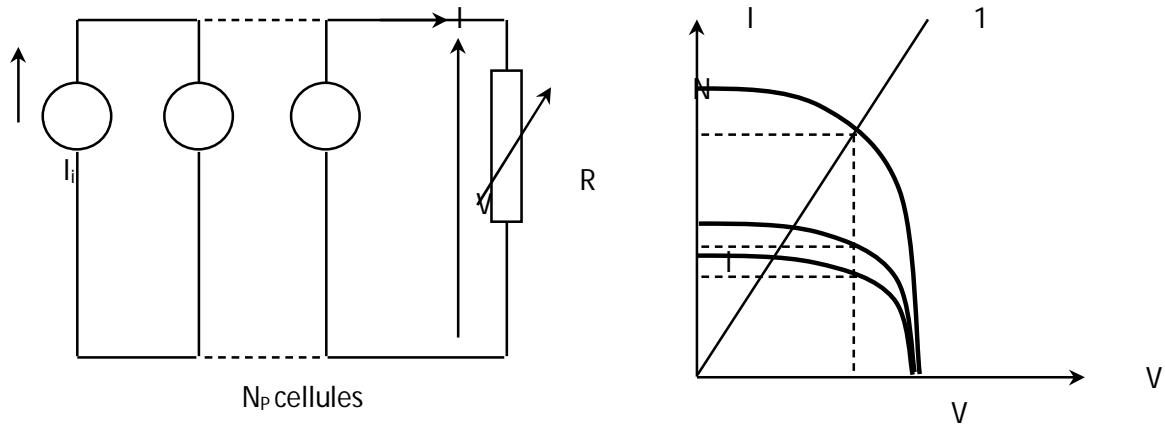


Fig. II-9 Association de N_p modules solaires en parallèle.

c) Associations (série parallèle) mixtes:

Si pour une application donnée il est nécessaire de faire augmenter le courant et la tension délivrée par les cellules solaires, on réalise un groupement mixte ou groupement série-parallèle. On parlera dans ce cas de module et de panneaux solaires. Un panneau solaire est par définition un ensemble de modules regroupés selon un montage mixte, le module étant à son tour composé d'un ensemble de cellules montés généralement en série. Il est possible d'utiliser un montage de N_c cellules identiques en série sur un module, N_{sp} nombre de branche (placées en parallèle) et N_{ms} nombre de modules par branche. La courbe de fonctionnement de cette association est une courbe semblable à celle de la cellule de base, obtenue en modifiant les échelles sur les deux axes[9].

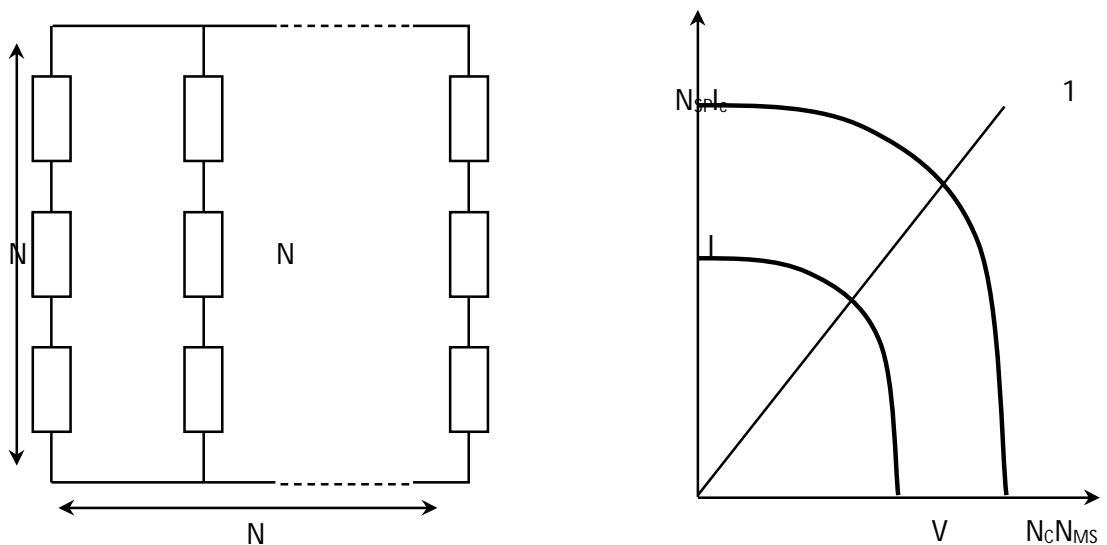


Fig. II-10 Association mixte de N_{sp} branches et de N_{ms} module composés de N_c cellules identiques.

II.3 Panneaux photovoltaïques :

Un panneau photovoltaïque se compose d'un certain nombre de modules qui sont constitués par l'association de cellules en série. La mise en série et en parallèle des panneaux permet d'obtenir la tension et le courant exigés dont les performances dépendent de l'association des cellules et de la matière qui les compose.

Le point de fonctionnement de cet ensemble de panneaux photovoltaïques est défini par l'intersection de sa caractéristique courant-tension avec la ligne de charge. [10]

II.3.1 Caractéristiques d'un module :

Voici la description des paramètres d'un module [10] :

- **La puissance crête P_c** : Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards (25°C et un éclairement de 1000 W/m^2).
- **La caractéristique $I=f(V)$** : Courbe représentant le courant I débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.
- **Tension à vide V_{co}** : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement " plein soleil ".
- **Courant de court-circuit I_{cc}** : Courant débité par un module en court-circuit pour un éclairement " plein soleil ".
- **Point de fonctionnement optimum (U_m, I_m)** : Lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil, $P_m = U_m \cdot I_m$
- **Rendement maximal** : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.
- **Facteur de forme** : Rapport entre la puissance optimale P_m et la puissance maximale que peut avoir la cellule : $V_{co} \cdot I_{cc}$.

II.3.2 Modélisation et simulation du générateur photovoltaïque :

a) Modélisation du générateur photovoltaïque (PV)[11] :

Pour trouver le modèle de ce générateur, il faut tout d'abord retrouver le circuit électrique équivalent à cette source. De nombreux modèles mathématiques de générateurs photovoltaïques,

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.

Le générateur photovoltaïque est représenté par un modèle standard à une seule diode, établi par Shockley pour une seule cellule PV, et généralisé à un module PV en le considérant comme un ensemble de cellules identiques branchées en série-parallèle.

On présente le schéma du circuit électrique par la figure (II-11) :

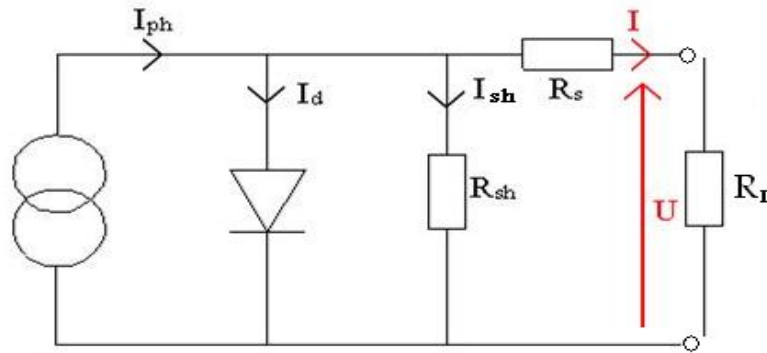


Fig. II-11 Modèle électrique de la cellule.

Les résistances R_s et R_{sh} permettent de tenir compte des pertes liées aux défauts de fabrication. R_s représente les diverses résistances de contact et de connexion tandis que R_{sh} caractérise les courants de fuite dus à la diode et aux effets de bord de la jonction [11]. Dans ces conditions, l'expression générale du courant est donnée par :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \tag{II-6}$$

Le courant d'obscurité I_D est donné par :

$$I_D = I_s [\exp((V + R_s I)q/kT) - 1] \tag{II-7}$$

$$I_{sh} = (V + R_s I) / R_{sh} \tag{II-8}$$

En pratique $R_{sh} \gg R_s$ donc on peut négliger I_{sh} et conséquence :

$$I = I_{ph} - I_s [\exp((V + R_s I)q/kT) - 1] \tag{II-9}$$

En circuit ouvert, le courant est nul, donc :

$$I = 0, V_{co} \approx \left(\frac{kT}{q}\right) \log\left[\frac{(I_{cc} + I_s)}{I_s}\right] \approx (kT/q) \log(I_{cc}/I_s) \quad (\text{II-10})$$

La puissance fournie par cette pile s'écrit sous la forme :

$$P = VI = V \left[I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{(V + R_s I) q}{kT}\right) - 1 \right] \right] \quad (\text{II-11})$$

Le maximum de la puissance fournie correspond à la tension V_m et un courant I_m qui se déduit de la relation $\frac{dP}{dV} = 0$. La résistance de charge R_L permettant d'utiliser la puissance maximale est :

$$R_L = V_m / I_m$$

Donc pour quelque soit les nombres des modules en série et parallèle, l'équation (II-11) devient sous la forme suivant :

$$I = N_p I_{ph} - N_p I_s \left[\exp\left(\frac{1}{AU_T} \left(\frac{V}{N_s} + \frac{R_s I}{N_r}\right)\right) - 1 \right] \quad (\text{II-12})$$

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 photo-courant I_{ph} varie avec l'irradiance, il est déterminé par rapport à des valeurs données aux conditions de référence.

Avec :

I : Courant fourni par la cellule [A]

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

I_{ph} : Photo courant [A], proportionnel à l'irradiance F , avec correction selon T

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

R_s : Résistance série [W].

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

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

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].

N_p : nombre de cellule

b) Simulation du générateur (PV) :

Les paramètres du panneau sont les suivants :

Dans la section précédente, nous avons présenté les bases de la modélisation mathématique du générateur PV. Ce modèle a été développé sous l'environnement Matlab pour étudier le comportement du GPV.

Le comportement d'un module photovoltaïque PV connecté à une charge est caractérisé par des courbes courant-tension I-V et puissance-tension P-V. Le point de fonctionnement dépend des connexions des différents modules, de leur inclinaison, du lieu [9].

Nous avons travaillé avec le module photovoltaïque (**ZT 180s**) formé de 72 cellules en série. Le tableau ci-dessous résume ses données théoriques

Tableau II-1 Relevés des mesures effectuées avec le panneau solaire pour $G=930W7m^2$

Model	ZT 180s
Pm	180 W
Power tolerance	± 5%
Vc0	44.28 (V)
Isc	5.6 (A)
Vmp	35.65 (V)
Imp	5.05 (A)
Weight	16 Kg
Model dimension	1580×808×35 mm
Fuse rating	11 A
Max system voltage	1000 (V)
Temp coefficient of Vc0	-(160 ± 10) mV/c⁰
Temp coefficient of Isc	+ (0.0065 ± 0.015) %/c⁰
Temp coefficient of power	-(0.5 ± 0.05) %/c⁰

All technical data at standard test condition AM = 1.5, E = 1000 w/m², T = 25 c⁰

Pour un G de 100% et T=25°C, en utilisant l'équation (II-12) notre programme nous fournit les courbes électriques pour 1e module. La figure ci-contre donne le réseau de caractéristiques (I-V et P-V).

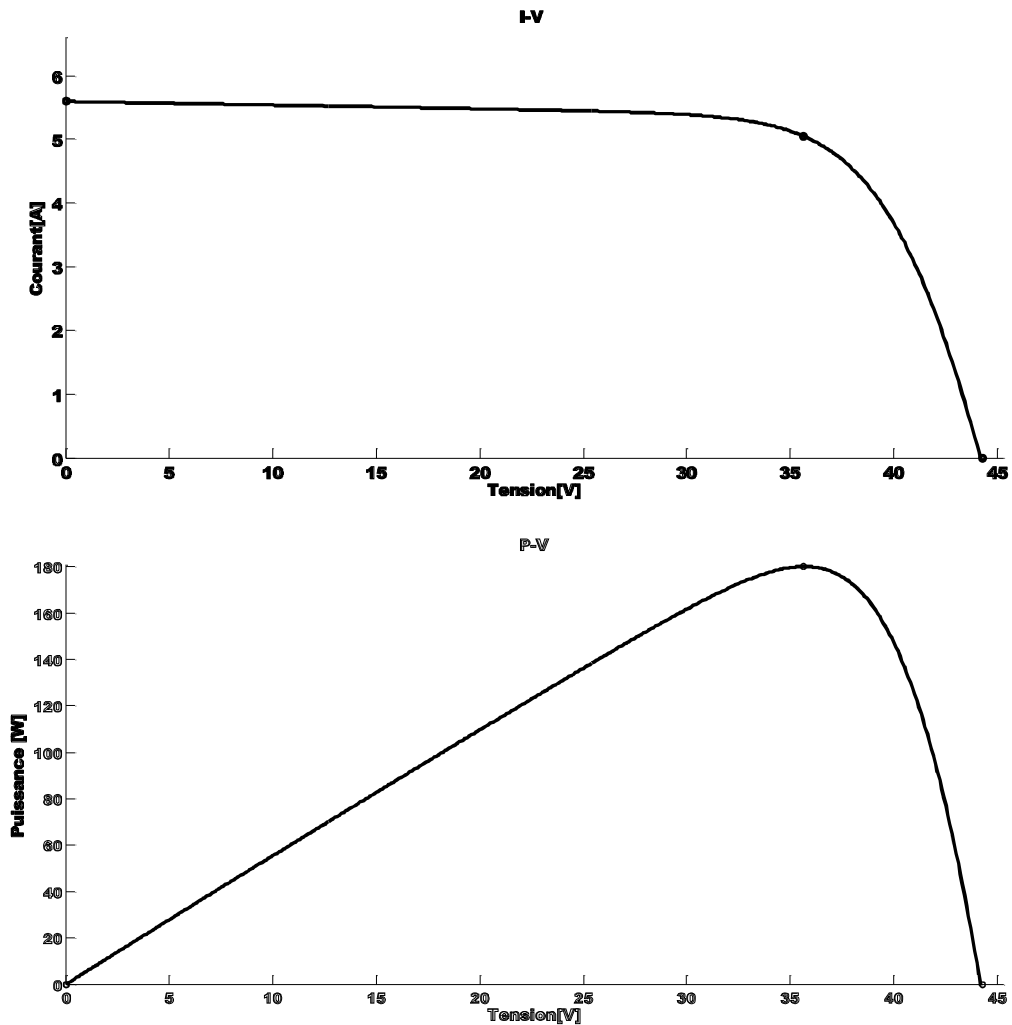


Fig. II-12 $I=f(V)$, $P=f(V)$ d'une cellule photovoltaïque.

c) Les paramètres qui influent sur la caractéristique $I = f(V)$

➤ Influence de l'éclairement

La puissance délivrée par un générateur PV dépend de l'irradiation qu'il reçoit. [12]

La figure (II-13) représente la caractéristique courant-tension et puissance-tension d'un module (PV) solaire en fonction de l'éclairement, à une température et une vitesse de circulation de l'air ambiant constantes.

On remarque que la tension V_{max} correspondant à la puissance maximale ne varie que très peu en fonction de l'éclairement, contrairement au courant I_{max} qui augmente fortement avec l'éclairement.

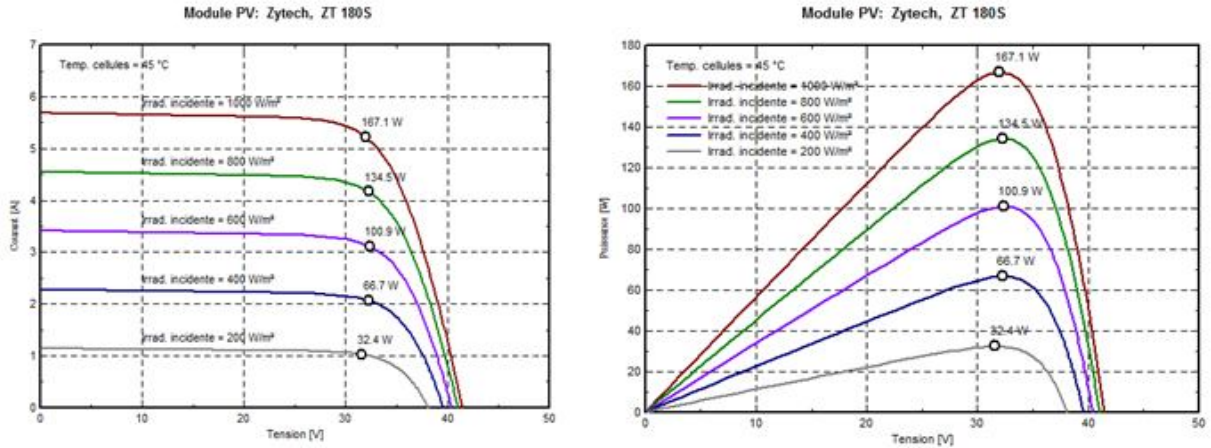


Fig. II-13 Influence de l'éclairement sur le module

➤ **Influence de la température :**

En effet la température est un paramètre très important dans le fonctionnement des cellules photovoltaïques, car les propriétés électriques d'un semi-conducteur sont très sensibles à la température. [13]

La figure (II-14) représente la caractéristique courant-tension et puissance-tension d'un module solaire en fonction de la température, à un éclairement constant.

On constate que l'augmentation de la température entraîne une diminution de la tension de circuit ouvert, ainsi qu'une diminution de la puissance maximale.

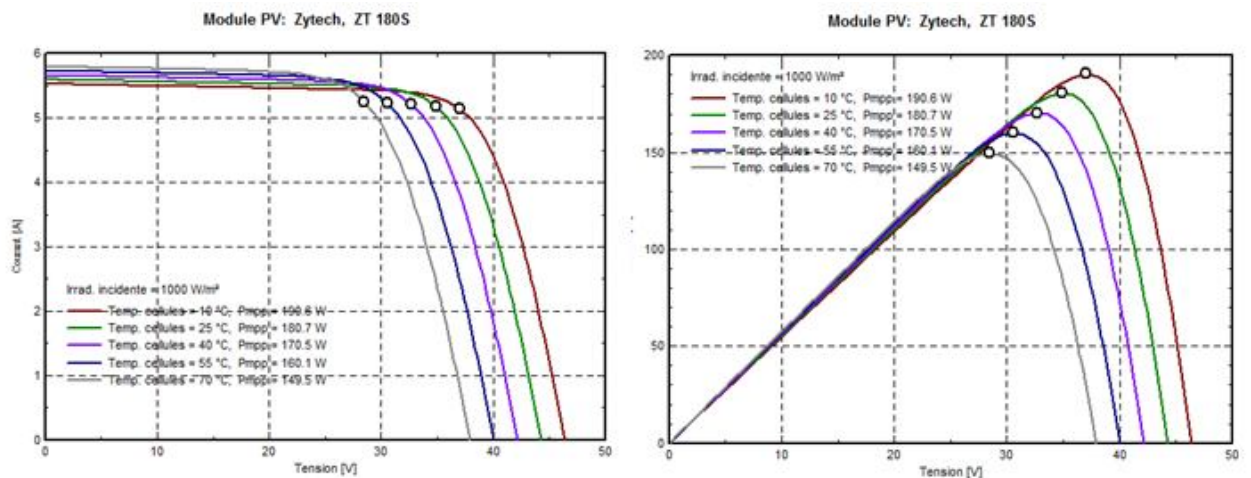


Fig. II-14 Influence de la température sur le module

➤ *Influence de la résistance série :*

La résistance série est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles.

La résistance série agit sur la pente de la caractéristique dans la zone où la photodiode qui se comporte comme un générateur de tension, et lorsqu'elle est élevée, elle diminue la valeur du courant de court-circuit (I_{cc}) .

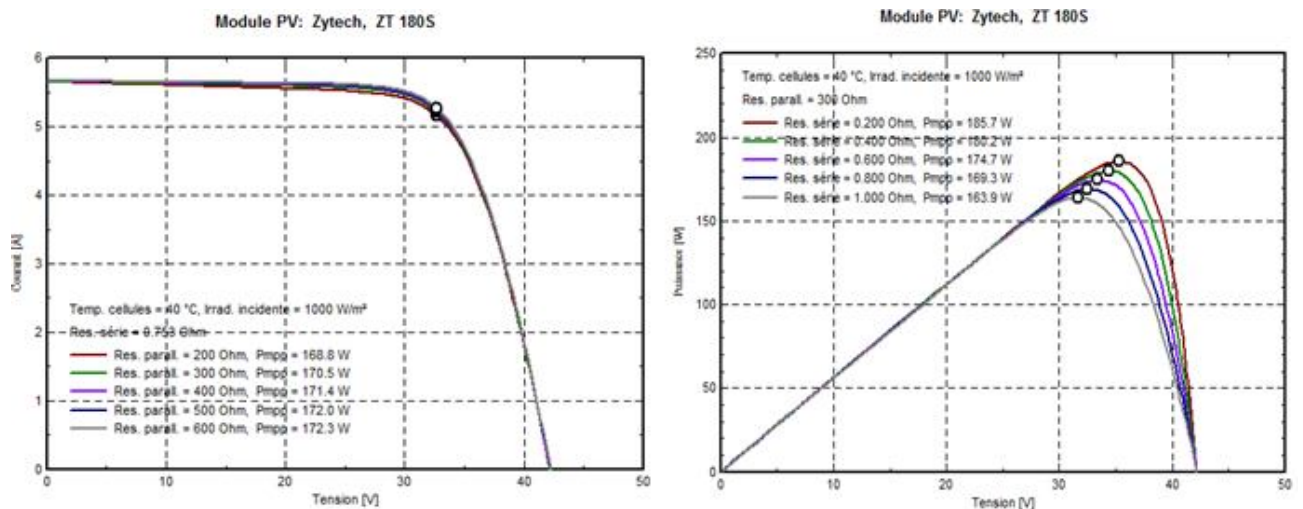


Fig. II-15 L'influence de la résistance série R_s sur la caractéristique $I(V)$, $P(V)$.

➤ *Influence de la résistance shunt :*

La résistance shunt est une résistance qui prend en compte les fuites inévitables du courant qui intervient entre les bornes opposées positives d'une photopile.

En générale, la résistance shunt est très élevée, son effet se fait sentir surtout dans la partie génération du courant. [12]

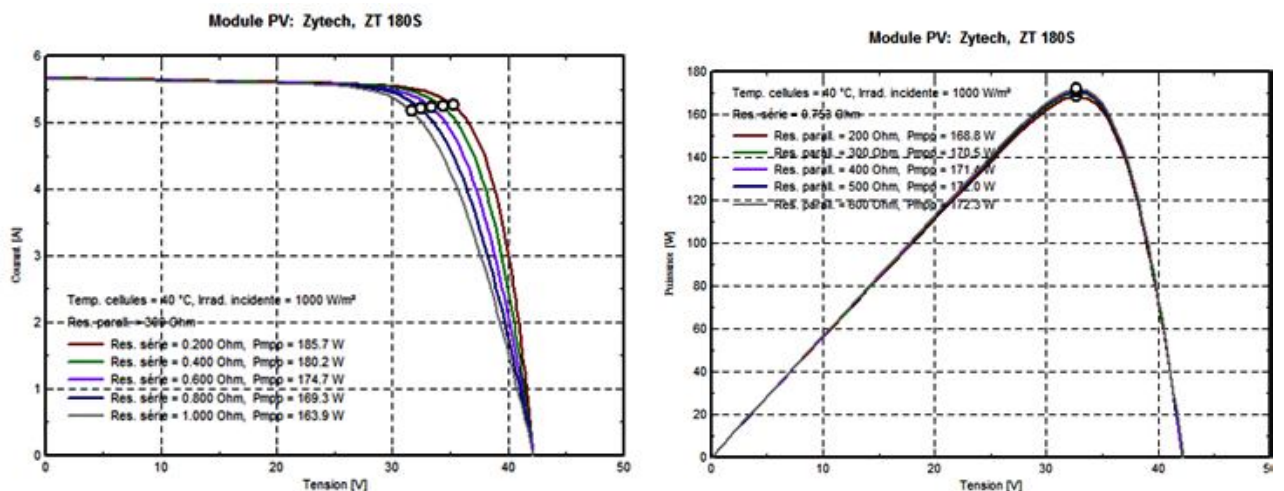


Fig. II-16 L'influence de la résistance shunt R_{sh} sur la caractéristique $I(V)$, $P(V)$

II.4 Mesure des caractéristiques du panneau solaire :

En photovoltaïque, la modélisation est indispensable pour le fonctionnement électrique des modules photovoltaïques (PV) [14].

Elle nous permet de qualifier le processus technologique de réalisation des cellules PV, et d'analyser le fonctionnement optimal.

Cette dernière étude est nécessaire afin de concevoir et de réaliser les systèmes photovoltaïques adéquats permettant la poursuite du point de puissance maximale (PPM) [15].

Actuellement, on trouve dans la littérature relativement peu de résultats concernant la modélisation du fonctionnement électrique des panneaux photovoltaïques en fonction des conditions météorologiques (éclairage, température,...).

Dans notre travail, nous allons présenter les résultats de la caractérisation et la modélisation fine des caractéristiques électriques courant-tension et puissance-tension des panneaux photovoltaïques (PV). Nous allons analyser les paramètres électriques des cellules photovoltaïques et les grandeurs électriques optimales des panneaux (tension et puissance) en fonction des variations météorologiques.

II.4.1 Méthode et analyse

Pour les essais sur le terrain, nous avons choisi un panneau solaire model **ZT 180s** que nous avons installé sur le toit du laboratoire LAMOSI de l'USTO. Il a été monté sur un support réglable pour différents angles d'inclinaison pour faire face aux changements de saison. Plusieurs mesures ont été réalisées à l'extérieur en fonction de différents rayonnements solaires avec une inclinaison fixe calculée auparavant pour déterminer les caractéristiques : $I_{pv} = f(U_{pv})$ et $P_{pv} = f(U_{pv})$.

La fiche technique du panneau solaire model ZT180s (vus dans le tableau(II 1))

Les essais réalisés sont :

✓ Mesure de l'intensité en court-circuit :

-L'intensité (en ampères) en court-circuit, dans ce cas la tension est de 0 volt.

✓ Mesure de la tension en circuit-ouvert :

- La tension (en volts) en circuit ouvert, dans ce cas l'intensité est de 0 ampère.

a) *Méthode de définition des caractéristiques de I-V de sortie :*

Afin de tracer une caractéristique I(V) d'un panneau PV, nous avons connecté directement à ses bornes une résistance variable pour permettre d'étudier l'évolution de la tension en fonction de l'intensité à différents niveaux d'ensoleillement.

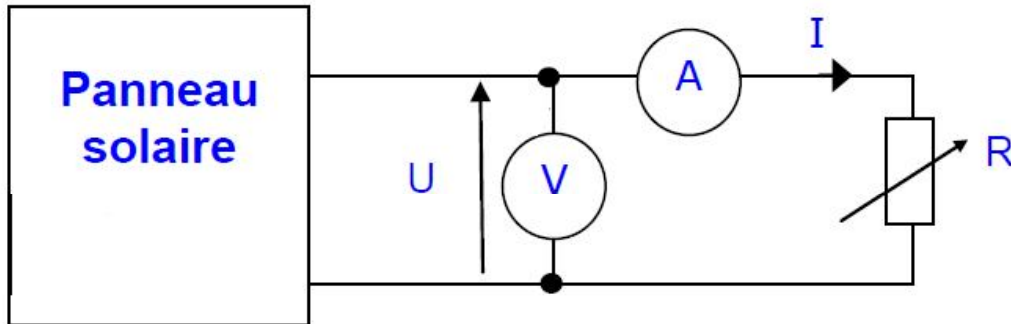


Fig. II-17 Schéma des mesures du panneau photovoltaïque.

b) *Tracé des caractéristiques I (V) et P (V) :*

Tableau II-2 Relevés des mesures effectuées avec le panneau solaire pour $G=930\text{W/m}^2$

Tension(V)	Courant(A)	Puissance (W/M ²)
0	5.51	0
8.77	5.49	48.14
16.12	5.39	86.88
19.22	5.33	102.44
24.00	5.26	126.24
29.96	5.10	152.79
31.71	5.00	158.55
32.40	4.8	155.52
34.00	4.5	153.90
37.8	4.10	154.98
39.80	3.41	135.71
40.52	2.54	102.92
40.61	2.12	86.09
41.2	1.53	63.03
41.36	1.01	41.77
41.62	0.8	33.29
42.02	0	0

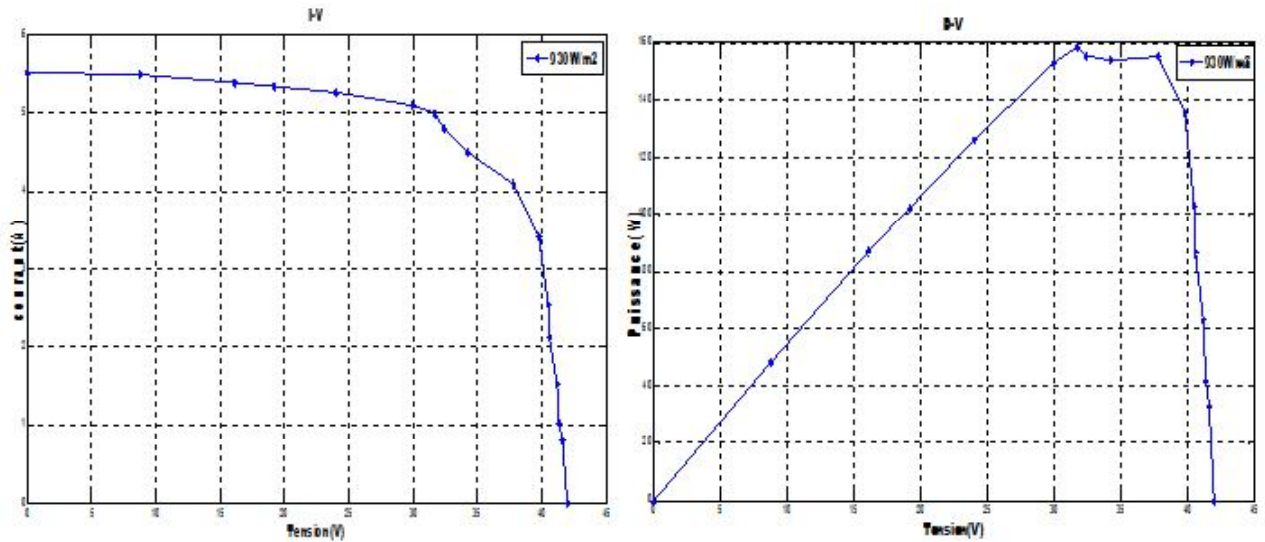


Fig. II-18 Courbes des caractéristiques du module photovoltaïque pour $G=930W/m^2$

Tableau II-3 Relevés des mesures effectuées avec le panneau solaire pour $G=700W/m^2$

Tension (V)	Courant (A)	Puissance (W/M ²)
0	4.5	0
6.10	4.23	25.80
8.53	4.20	35.82
15.20	4.18	63.53
20.33	4.15	84.36
25.21	4.10	103.36
27.25	4.08	111.18
30.10	4.04	121.60
31.5	4.01	126.31
34.37	3.9	134.04
36.10	3.5	126.35
38.43	3.00	115.29
39.00	2.50	97.50
39.57	2.10	83.09
40.22	1.5	60.33
40.71	0.9	36.63
41.00	0	0

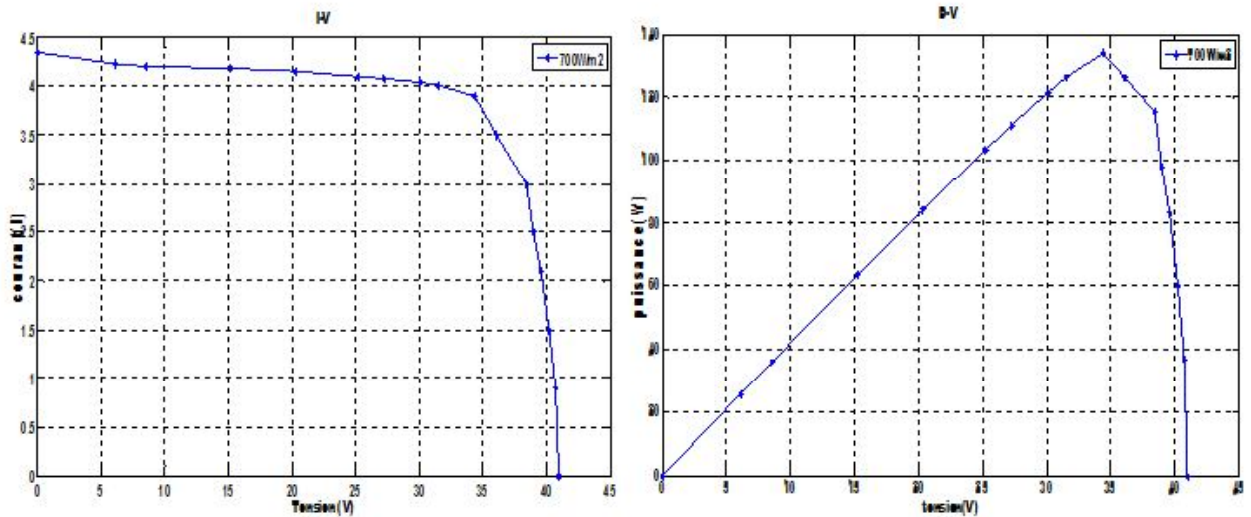


Fig. II-19 Courbes des caractéristiques du module photovoltaïque pour $G=700W/m^2$

Tableau II-4 Relevés des mesures effectuées avec le panneau solaire pour $G=600W/m^2$

Tension (V)	Courant (A)	Puissance (W/M ²)
0	3.51	0
9.83	3.48	34.20
13.54	3.41	46.17
15.11	3.37	50.92
18.33	3.30	60.48
22.89	3.22	73.70
26.19	3.14	82.23
29.83	3.10	92.47
32.42	3.08	99.85
34.11	2.88	98.23
36.28	2.40	87.07
37.84	2.01	76.05
39.13	1.60	62.60
39.99	1.20	47.98
40.03	0.9	36.02
40.08	0.6	24.04
40.69	0	0

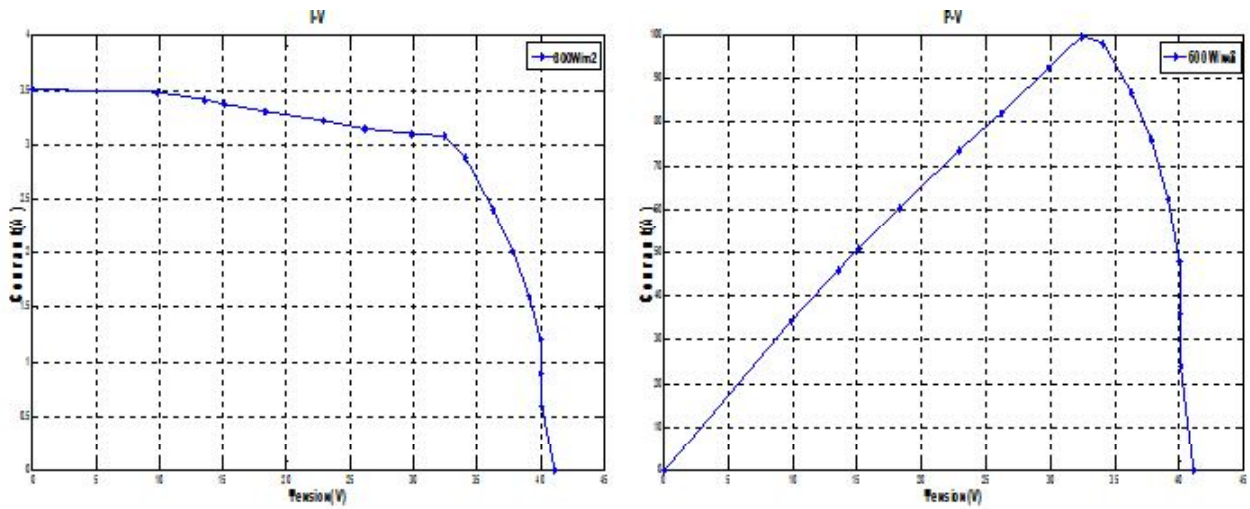


Fig. II-20 Courbes des caractéristiques du module photovoltaïque pour $G=600W/m^2$

II.4.2 Résumé des résultats :

Nous avons obtenu les résultats suivants (Tableau II-5) et en effectuant le produit ($V \times I$) nous nous sommes arrivés à la représentation graphique de la puissance en fonction de la tension pour tous les cas (Figure II-21).

Tableau II-5 Résultats de mesures des caractéristiques du panneau solaire.

	930W/m2	700W/m2	600W/m2
Vco	42.02	4.5	41.00
Icc	5.51	4.5	3.51
Vopt	37.80	34.37	32.42
Iopt	4.10	3.9	3.08
Pmax	154.98	134.04	99.85

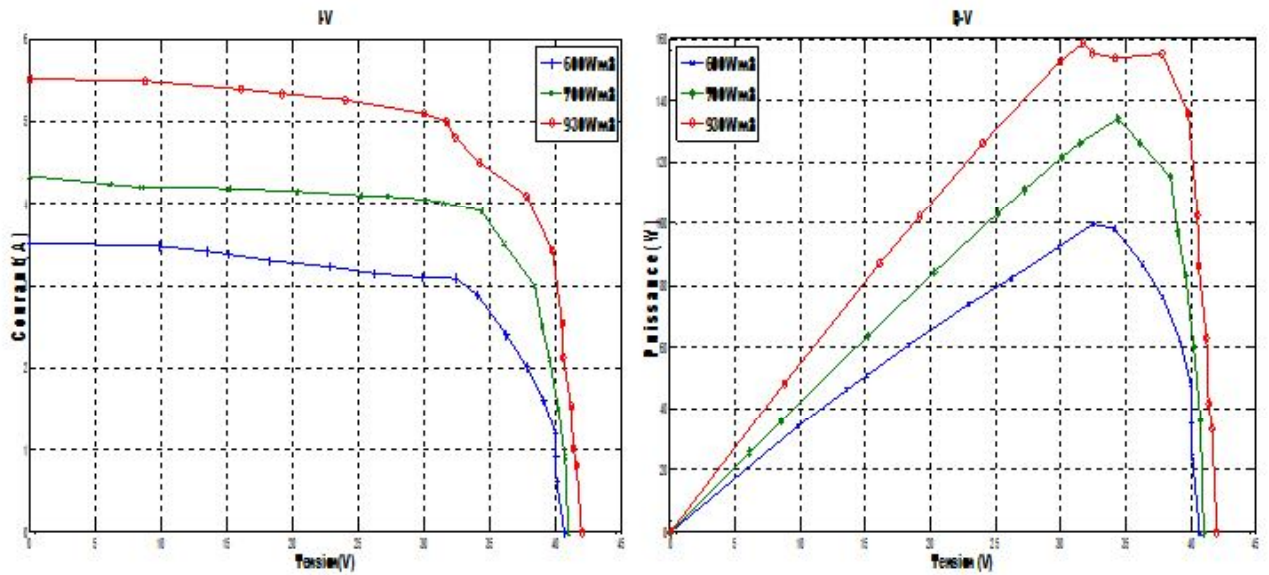


Fig. II-21 Superposition des courbes pour les différents rayonnements.

A travers la figure II-21, on remarque que le courant de court-circuit est proportionnel à l'irradiation et en première approximation, la puissance maximale aussi.

On effectuant des mesures à différents niveaux d'ensoleillement, On est arrivé à tracer les caractéristiques $I(V)$ du panneau solaire en fonction de l'ensoleillement (exprimés en W/m^2), et les caractéristiques $P(V)$ correspondantes

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le fonctionnement d'une cellule solaire en expliquant brièvement le phénomène photovoltaïque ; on a fait aussi la modélisation et simulation d'un module solaire commercial (model ZT 180s) en présentant l'influence des différents paramètres extérieurs et intérieurs sur ces caractéristiques.

Enfin, on a étudié expérimentalement les caractéristiques du panneau solaire (model ZT 180s). Les mesures effectuées dans les conditions réelles ont permis de tracer la famille des courbes $I(V)$ et $P(V)$ du panneau étudié.

II.5 Bibliographie chapitre II

- [1] A. Luque, S. Hegedus, "Handbook of Photovoltaic Science and Engineering", John Wiley & Sons Ltd, 2003.
- [2] Bernard EQUER, "Energie solaire photovoltaïque" jeune 2005
- [3] A. Labouret, M. Viloz "Energie solaire Photovoltaïque" Le manuel du professionnel, Paris, 2003
- [4] W.C. Benmoussa, S. Amara, A. Zerga, " Etude comparative des modèles de la caractéristique courant-tension d'une cellule solaire au silicium monocristallin " *Revue des Energies Renouvelables ICRESD-07 Tlemcen* ; 301 – 306, 2007.
- [5] B. Flèche, D. Delagnes, " Energie solaire photovoltaïque " *STI ELT Approche générale* ; juin 07
- [6] Francis Domain - INES Education - Savoie Technolac - BP258 - F73375 Le Bourget du Lac -Novembre 2007.
- [7] Boudghene Stambouli : cours d'optoélectroniques - cours USTO 2006
- [8] M. Makhlof, "Etude et optimisation d'un modèle de conversion d'énergie photovoltaïque application au pompage", mémoire de magister, univ.Mentouri Constantine, Algérie, 2006.
- [9] F.Z Zerhouni, M.H. Zerhouni, M.T Benmessaoud, M. Zegrar, A. Boudghene Stambouli , "Augmentation de performances d'un générateur solaire photovoltaïque avec validation pratique" *WORKSHOP'12 sur la Physique du Rayonnement et ses Application* ; 09-10 Juillet 2012, LAAR.
- [10] S. Diaf " étude et optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque " Thèse de Magister, Université de Boumerdès, 2002.
- [11] A.O. M. Yahya, I. Youm, "Etude et modélisation d'un générateur photovoltaïque" *Revue des Energies Renouvelables* ; **11 (3)** : 473 – 483, 2008.
- [12] L. Zarour "Etude et simulation d'un système de pompage photovoltaïque, optimisation de la conversion d'énergie", Mémoire de magister en électrotechnique, univ. Mentouri de Constantine, 2005.
- [13] L.Kemmouche, "Modèle de fonctionnement d'une station solaire photovoltaïque, en prévision de panne", mémoire de magistère, université de Constantine, année 2002.
- [14] R. Gules, J. de Pellegrin Pacheco, H.L. Hey, J. Imhoff, "A Maximum Power Point Tracking System with Parallel Connection for PV Stand-Alone Applications" *IEEE Transactions on Industrial Electronics*; **55 (7)**: 2674 – 2683, 2008.

- [15] M. El Ouariachi, T. Mrabti, B. Tidhaf, KA. Kassmi, "Regulation of the Electric Power Provided by the Panels of the Photovoltaic System", *International Journal of Physical Sciences*; **4 (5)**: 294 - 309, 2009.

CHAPITRE III

III.1 Introduction :

Un système photovoltaïque se compose de plusieurs outils nécessaires pour assurer une production d'électricité optimale. Ce troisième chapitre donne un aperçu général sur les différents composants et types d'installations d'un système photovoltaïque.

III.2 Centrale solaire photovoltaïque

Une centrale solaire photovoltaïque est formée par un ensemble de panneaux solaires photovoltaïques, à base de silicium, reliés entre eux en série ou en parallèle, et branchés sur un ou plusieurs onduleurs. Ces derniers sont utilisés pour transformer le courant continu basse tension en courant alternatif haute tension, utilisable directement par les appareils classiques. La quantité d'énergie obtenue dépend toutefois de plusieurs facteurs, à savoir, la surface des modules utilisées ainsi que leur rendement et de l'ensoleillement qui varie selon la latitude, la saison et la météo par exemple [1].

III.3 Eléments de l'installation photovoltaïque

Tout système photovoltaïque peut se composer, comme il est montré sur la figure (III.1), en trois parties :

- ❖ Une partie de production d'énergie.
- ❖ Une partie de conversion de cette énergie.
- ❖ Une partie de stockage de l'énergie.

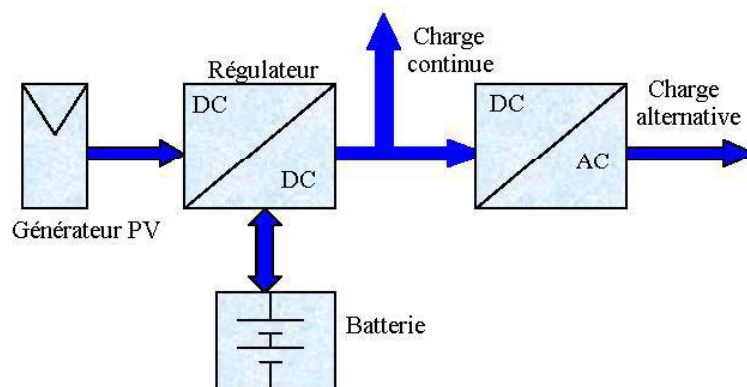


Fig. III-1 Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec batterie de stockage [2]

III.3.1 Production d'énergie (Panneaux photovoltaïques)

La production d'énergie se réalise par la conversion d'énergie solaire en électricité, cette partie est composée essentiellement d'un ou plusieurs modules,

Le panneau photovoltaïque se compose de petites cellules qui produisent une très faible puissance électrique (1 à 3 W). 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 [3].

III.3.2 Stockage de l'énergie

Dans les systèmes de production d'électricité à partir d'énergies intermittentes, en particulier les systèmes photovoltaïques, il est indispensable de pouvoir stocker l'énergie pour ajuster la production à la consommation.

Ceci est particulièrement vrai pour les systèmes autonomes (non connectés à un réseau électrique). Même dans le cas où le réseau électrique est présent, l'utilisation d'un moyen de stockage permet de lisser les productions intermittentes et d'injecter l'énergie pendant les périodes les plus pertinentes (la nuit et les jours "sans soleil").

Le système de stockage est un élément crucial de l'installation photovoltaïque du point de vue technique, mais aussi du point de vue économique ; car il représente 40 à 50 % du coût de l'installation. Vu l'importance du stockage électrochimique de l'énergie solaire [4], une étude théorique des différents types de batteries est menée, en particulier la batterie au plomb qui est la moins coûteuse comparativement aux autres batteries.

a) Principe général de fonctionnement d'une batterie [5] :

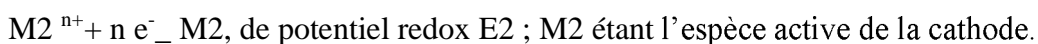
Deux électrodes, l'une positive et l'autre négative, sont séparées par un électrolyte. Aux deux interfaces électrode-électrolyte interviennent des réactions électrochimiques.

A l'anode (électrode négative en décharge) s'opère une réaction d'*oxydation* selon la formule suivante :

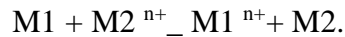


Les électrons libérés transitent dans le circuit extérieur pour atteindre finalement la cathode

(électrode positive en décharge) où s'opère une réaction de *réduction* selon :



L'électrolyte assure le transport des espèces ioniques mises en jeu dans la réaction globale d'oxydoréduction, qui s'écrit :



La force électromotrice E de ce convertisseur se calcule selon : $E = E2 - E1$.

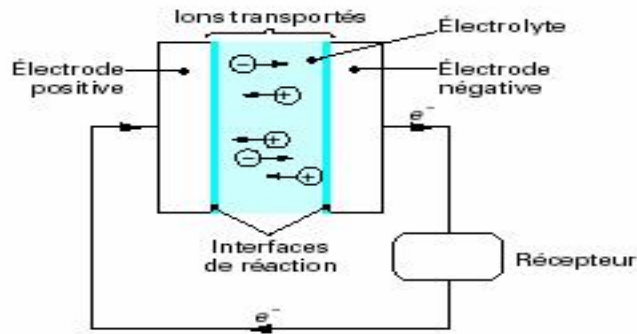


Fig. III-2 Principe de production d'électricité dans un convertisseur électrochimique.

La Figure III-2 présente le fonctionnement d'un accumulateur en décharge. A la différence des piles électrochimiques, les réactions d'oxydoréduction intervenant dans les batteries sont inversibles. On peut donc, à l'aide d'une source extérieure, fournir du courant à la batterie qui fonctionnera alors en charge et les réactions s'effectueront inversement.

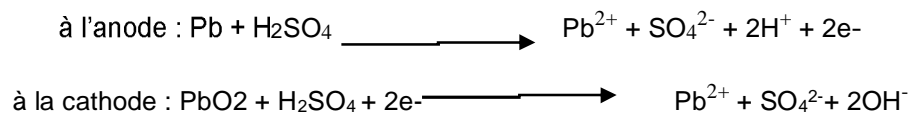
La capacité (en Ah) du convertisseur électrochimique est directement liée à la quantité des matières actives mises en jeu dans la réaction d'oxydoréduction. Elle confère en outre au convertisseur son rôle d'accumulateur d'énergie, dont l'expression est, en chaque instant, le produit de la capacité (chargée ou déchargée) et de la tension aux bornes de l'accumulateur.

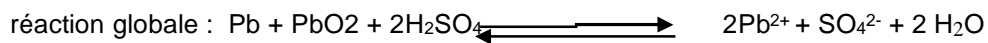
b) Différents type de batterie (avantages et inconvénients)[6] :**Tableau III-1** Les avantages et les inconvénients des différents types de batterie :

Type de la batterie	Avantages	Inconvénients
Plomb (Pb)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Prix bas -Solides ▪ Capables de fournir des courants élevés ▪ Eléments standards se trouvent n'importe où dans le commerce ▪ Facilité de mise en œuvre ▪ Sans effet mémoire (c'est-à-dire qu'on peut les recharger quand on veut, à n'importe quel niveau de décharge) ▪ Souplesse d'utilisation 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Densité d'énergie ▪ -Poids ▪ -Autodécharge (1% par jour environ) ▪ -Sensibles aux températures négatives (perte d'autonomie jusqu'à -25% à -10°C) ▪ -Risque de cristallisation de sulfate de Pb si laissée trop longtemps déchargée
Nickel Cadmium (Ni-Cd)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aptes à supporter de grands courants décharge et recharge grâce à leurs faibles résistances internes. ▪ Faible coût ▪ Solidité mécanique et électrique ▪ Recharge facile et grande tolérance face aux surcharges 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ -Effet mémoire ▪ -Densité énergétique moyenne ▪ -Recyclage compliqué à cause du cadmium qui est un métal lourd et polluant
Nickel Métal Hydride (NiMH)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bonne densité d'énergie ▪ Supporte des courants importants car résistance interne faible (les Ni-cd gardent cependant l'avantage dans ce domaine) ▪ Simples à stocker et à transporter ▪ 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ -Fragile car ne supportent pas la surcharge, nécessitant par conséquent l'usage de chargeurs automatiques performants et coûteux ▪ -Détection de fin de charge difficile ▪ -Durée de vie faible
Lithium (Li)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Densité énergétique très élevée grâce aux propriétés physiques du lithium ▪ Autodécharge très faible (5% par mois) ▪ Aucun effet mémoire -Poids ▪ Agrément d'utilisation 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Prix très élevé ▪ Nécessite un circuit de protection sérieux (B.M.S. et P.C.M.) pour gérer la charge et la décharge afin d'éviter la destruction des éléments. ▪

c) Les batteries au plomb :

Les batteries utilisées dans les systèmes solaires autonomes sont en général de type plomb acide [7]. Ils sont basés sur la réaction d'oxydoréduction suivante [8] :





d) Les différents types de batteries au plomb

Les accumulateurs au plomb sont divisés en deux grandes familles : les batteries ouvertes (Vented Batteries) et les batteries scellées (recombinaison de gaz) [9].

Tableau III-2 Principales comparaisons des 2 familles technologiques de la batterie au plomb

TYPE DE BATTERIE AU PLOMB	OUVERTE	À RECOMBINAISON DE GAZ
ÉLECTROLYTE	Liquide	gélifié
AVANTAGES	<ul style="list-style-type: none"> • durée de vie pouvant être importante (5 à 15 ans) • technologie la moins chère 	<ul style="list-style-type: none"> • recombinaison => pas de perte en eau (<i>pas d'entretien</i>) • très faible taux de dégagement de gaz (<i>sécurité</i>)
INCONVÉNIENTS	<ul style="list-style-type: none"> • consommation d'eau (<i>maintenance</i>) • installation en locaux spécifiques (<i>dégagements gazeux</i>) 	<ul style="list-style-type: none"> • plus faible durée de vie (<i>modes de défaillance spécifiques</i>) • plus sensible à la température

e) Caractéristiques de la batterie :

➤ **Capacité nominale** : C'est la quantité maximum d'énergie que contient une batterie (sous température idéale de 25°). Elle s'exprime en Ampère heure (Ah).

➤ **Etat de charge** : C'est le pourcentage de la quantité d'énergie disponible dans la batterie à un instant t.

➤ **Profondeur de décharge (PDD)** : C'est le pourcentage d'énergie maximum que l'on peut retirer d'une batterie. Elle ne doit pas être déchargée au-delà de cette valeur, afin de prolonger sa durée de vie.

➤ **Température** : La variation de température influence le rendement de la batterie. Celle-ci a un fonctionnement idéal à température ambiante de 25°C ; Il faut donc prévoir si possible une régulation thermique pour maintenir sa durée de vie.

- **Tension nominale** : C'est la tension type de la batterie. Elle correspond aussi à la tension de fonctionnement du système autonome. Ex : Tension 12V, 24V, 48V...
- **Taux de décharge** : C'est le temps nécessaire pour décharger entièrement la batterie. Supposons une batterie de capacité de 100Ah et de courant de décharge de 5 A : Le taux de décharge sera $100\text{Ah} / 5\text{A}$ soit 20 heures ; Il est noté C/20.
- **Taux de recharge** : C'est la quantité de courant qu'il faut pour recharger une batterie en un temps donné (temps du taux de décharge). Supposons une batterie de 100Ah et de taux de décharge C/20 : Le taux de recharge sera $100\text{Ah} / 20\text{h}$ soit 5 A.
- **Cycle et durée de vie** : C'est le nombre de séquences de charge/décharge, que peut subir une batterie à sa profondeur de décharge. Il détermine les performances de la batterie et sa durée de vie.
- **Nombres de jours d'autonomie** : C'est la durée pendant laquelle la batterie peut alimenter toute seule l'installation en courant, sans être rechargée ni endommagée [10].

f) Problèmes liés aux batteries [11] :

Les batteries, quelque soit la technologie qu'elles utilisent, peuvent poser un certain nombre de problèmes, souvent évitables lors d'une utilisation correcte ou en s'équipant du matériel adéquat.

➤ **Stratification :**

Ce phénomène signifie que l'électrolyte n'est pas homogène. L'acide étant plus lourd que l'eau, il s'accumule au fond de la batterie et l'eau au-dessus. La réaction ne se fait plus aussi bien, le haut des électrodes s'oxyde et risque de geler, tandis que le bas est attaqué par l'acide. On remédie facilement à cela par une charge d'égalisation délivrée périodiquement par le régulateur.

➤ **Sulfatation :**

La sulfatation apparaît naturellement lorsque la batterie se décharge. Il se forme alors une accumulation de sulfate de plomb sur les électrodes, ce qui réduit les surfaces de contact avec l'électrolyte et par conséquent l'intensité du courant. Quand la batterie est rechargée, la sulfatation disparaît sauf en cas de forte température, de décharge trop profonde ou de dégagement gazeux.

➤ **Oxydation des électrodes et des bornes :**

Lorsque le niveau de l'électrolyte est trop faible, les électrodes sont exposées à l'air et s'oxydent. Il en va de même pour les bornes de la batterie si celle-ci n'est pas dans un endroit sec ou si les cosses ne sont pas assez serrées. L'oxydation empêche de manière définitive le courant de circuler.

➤ **Prix :**

Une batterie coûte relativement cher comparé aux autres équipements d'une installation photovoltaïque autonome (environ 25% du coût initial). Sachant qu'une installation peut vivre plus de 30 ans, et que durant cette période il faudra nécessairement changer les batteries, leur prix peut facilement représenter la moitié du coût final. Les véritables économies ne se font pas à court terme. Choisir une batterie moins chère qui ne fonctionnera que 2 ou 3 ans n'est pas rentable. Il existe des modèles, plus onéreux, qui peuvent fonctionner pendant 10 ans voir plus.

g) Solutions :

- Acheter des batteries ayant une longue durée de vie pour faire de vraies économies.
- Les conserver dans un endroit ventilé et d'une température proche de 25°C.
- Vérifier le serrage des cosses et les niveaux d'électrolyte.
- Il faut que les batteries soient chargées pour être stockées si on ne les utilise pas.
- Choisir un bon régulateur capable d'effectuer des charges d'égalisation et de ne pas délivrer des tensions trop fortes.
- Si l'endroit où sont placées les batteries subit de grandes variations de température il faut que les batteries disposent d'une sonde thermique pour adapter la tension du régulateur.

h) Contexte industriel et économique [5]

Le marché de la batterie au plomb est un enjeu industriel important. Il concerne les batteries de démarrage (SLI, Starting Lighting Ignition) ainsi que la plupart des batteries stationnaires.

Les industriels sont par conséquent très nombreux dans le monde entier : Panasonic, Hawkerou GP Batteries, CEAC, Fulmen ou Varta. Le marché est donc très concurrentiel.

Le coût des accumulateurs au plomb varie entre 50 et 150 Euros/kWh, qui est un des plus faibles parmi les systèmes de stockage. C'est l'une des principales raisons pour lesquelles la

batterie au plomb est très utilisée. Ce coût est quasiment incompressible, du fait de la très grande maturité de la technologie.

Le taux de recyclabilité de la batterie au plomb atteint pratiquement 100 % ce qui participe aux avantages de ce type d'accumulateur malgré la haute toxicité de son principal matériau, le plomb.

III.3.3 Système de régulation

Tous les systèmes photovoltaïques doivent comporter une régulation soignée de la charge et de la décharge de la batterie. En effet, la batterie est l'un des éléments les plus fragiles d'un système PV ; sa durée de vie est étroitement liée à la façon dont elle est chargée et déchargée : une longévité raisonnable n'est atteinte que par une protection soignée contre la surcharge ou la décharge trop profonde.

Le régulateur a un rôle essentiel dans la réduction du courant lorsque la batterie est presque entièrement chargée. Lorsqu'une batterie se rapproche d'un état de charge complète, de petites bulles commencent à se former sur les électrodes positives. A partir de ce moment, il vaut mieux réduire le courant de charge non seulement pour éviter des dégâts mais aussi afin de mieux atteindre l'état de charge complète. Un courant trop élevé peut provoquer une déformation des électrodes à l'intérieur, ce qui pourrait créer un court-circuit.

Le régulateur de charge assure deux fonctions principales :

- la protection des batteries contre les surcharges et les décharges profondes
- l'optimisation du transfert d'énergie du champ PV à l'utilisation.

La tension aux bornes de la batterie est l'indication sur laquelle s'appliquera le régulateur pour assurer sa fonction. Le régulateur mesure en permanence cette tension et la compare à deux seuils de tensions préétablis : seuil haut et seuil bas. Il existe plusieurs types de régulateurs.

a) Types de régulateurs [5] :

➤ **Régulateur Shunt :**

Convient aux applications de petite puissance comportant 1 ou 2 modules PV. Le régulateur shunt contrôle la charge de la batterie en court-circuitant le module photovoltaïque sans aucun risque. Tous les régulateurs shunt exigent la présence d'une diode anti-retour en série entre la batterie et l'élément shunt afin d'empêcher le court-circuit de la batterie.

➤ **Régulateur Série :**

Convient aux applications de moyenne puissance dont le courant des modules PV est supérieur à 10 A. Lorsque la batterie atteint la pleine charge, le régulateur coupe le courant provenant des modules PV.

➤ **Régulateur MPPT :**

Convient aux applications de grande puissance. Il garantit une récupération maximale de la puissance provenant des modules PV en mesurant en permanence le courant et la tension ; Cependant il faut considérer les pertes dues à cette technique. Aussi ce régulateur peut travailler dans une vaste gamme de température.

III.3.4 Système de conversion

Le système de conversion d'énergie est disposé généralement soit entre le champ PV et la charge (sans stockage avec charge en continu, convertisseur continu-continu), soit entre la batterie et la charge (dans ce cas il sera appelé onduleur ou convertisseur continu alternatif) [12].

a) Le convertisseur continu– continu

Ce type de convertisseur est destiné à adapter à chaque instant l'impédance apparente de la charge à l'impédance du champ PV correspondant au point de puissance maximal. Ce système d'adaptation est couramment appelé MPPT (maximum power point tracking). Son rendement se situe entre 90 et 95 %.

Ce système présente deux inconvénients pour un PV de faible puissance

- Prix élevé ;
- Le gain énergétique annuel par rapport à un système moins complexe (cas d'une régulation de la tension) n'est pas important [13].

b) Le convertisseur continu – alternatif

Pour alimenter les appareils qui fonctionnent en courant alternatif, il faut interposer un convertisseur entre la batterie et ces appareils. Les convertisseurs les plus utilisés transforment le courant continu issu de la batterie en courant alternatif 220 V/50 Hz ou 380 V/50 Hz [13].

III.4 Utilisation de l'énergie produite

La charge est l'équipement électrique alimenté par le système peut être de type continue comme des équipements de télécommunications, le pompage d'eau, ou de type alternative dans les cas d'usage domestique (maison solaire), ce cas nécessite un onduleur [14].

III.4.1 Expression en Wattheures par jour (Wh/j) :

➤ Multiplier la puissance que consomme chaque appareil, par le nombre d'heures durant lesquelles l'appareil est utilisé sur une journée de 24h.

➤ Additionner ensuite la consommation électrique de tous les appareils ; Le résultat trouvé est la consommation électrique totale de l'application par jour. Elle s'exprime en Wattheure par jour (Wh/j).

III.4.2 Expression en Ampère-heure par jour (Ah/j) :

➤ Multiplier la puissance que consomme chaque appareil, par le nombre d'heures durant lesquelles l'appareil est utilisé sur une journée de 24h ; Diviser ensuite le résultat par la tension nominale de l'appareil : On obtient ainsi la charge électrique en courant par jour de chaque appareil.

➤ Additionner ensuite la charge électrique de tous les appareils ; Le résultat trouvé est la charge électrique totale en courant de l'application par jour. Elle s'exprime en Ampère-heure par jour (Ah/j).

Il est primordial de bien évaluer votre consommation électrique, car elle définit la taille de votre système ; Plus la consommation est élevée, plus la taille de vos composants sera importante et plus le coût d'achat sera élevé. Il faut bien choisir ses appareils, et éviter les appareils à forte consommation.

III.5 Type de systèmes photovoltaïque

On peut représenter les systèmes photovoltaïques par une très grande variété de configuration et peuvent être classés en six groupes distincts. Les trois premiers groupes a, b et c sont des systèmes autonomes non reliés à un réseau électrique. Par contre les groupes d, e et f sont reliés différemment au réseau électrique [15].