

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Abderrahmane Mira – Béjaïa

Faculté de la Technologie

Département de Génie Electrique



جامعة بجاية
Tasdawit n' Bgayet
Université de Béjaïa

MEMOIRE DE MAGISTER

Présenté par : **Kahina OUALI**

En vue de l'obtention du diplôme de Magister en
Automatique et Traitement de Signal
Option : **Systemes**

Thème

**Influence des facteurs météorologiques sur le rayonnement
solaire à Bejaïa**

Soutenu le 13 juin 2011 devant le jury composé de :

M ^r Y. ZEBBOUDJ	Prof.	Univ. A. Mira Bejaia	Président
M ^r A. KHIREDINE	MCA	Univ. A. Mira Bejaïa	Examineur
M ^r S. BERRAH	MCA	Univ. A. Mira Bejaia	Examineur
M ^r R. ALKAMA	MCA	Univ. A. Mira Bejaia	Rapporteur

Remerciements

Mes remerciements au bon Dieu qui m'a donné la force et la volonté de poursuivre ce travail jusqu'au bout.

Je remercie mon promoteur, M^r R. ALKAMA, pour son attention permanente et son encouragement constant. J'ai été très heureuse de travailler avec lui.

Je remercie l'ensemble des membres du jury de mémoire : M^r Y. ZEBBOUDJ qui a bien voulu présider le jury, M^r A. KHIREDDINE et M^r S. BERRAH qui ont accepté d'être rapporteurs.

Un immense merci à mon mari GHANI pour son soutien, sa patience et son sacrifice consenti tout au long de ce travail.

Je voudrais remercier mes deux familles OUALI et BELLAL pour l'encouragement et le soutien constants

En fin, Je remercie tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à l'élaboration de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce travail à :

Mes chers parents

Mon mari

Mes beaux parents

Mes frères et sœurs et leurs familles

Mon beau frère, sa femme et ses enfants

Mes belles sœurs et leurs familles

Mes nièces et neveux

A toute la famille Ouali et Bellal

Mes amis.

Nomenclature	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale	1
 Chapitre I : Généralités sur l'énergie solaire photovoltaïque	
I.1 Introduction.....	3
I.2 Géométrie terre-soleil	3
I.3 Le rayonnement solaire.....	5
I.3.1 Rayonnement extraterrestre	6
I.3.2 Les différentes composantes du rayonnement solaire	6
I.3.3 Spectre solaire	7
I.4 Le générateur photovoltaïque	7
I.4.1 Principe	7
I.4.2 Le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	8
I.4.3 Technologie des cellules PV.....	9
I.4.4 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque.....	10
I.4.5 Le module photovoltaïque	11
I.4.6 Le panneau solaire	12
I.5 Conclusion	13
 Chapitre II : Générateur photovoltaïque : modélisation, simulation, caractérisation expérimentale	
II.1 Introduction	14
II.2 Modélisation du générateur photovoltaïque	14
II.3 Simulation du générateur photovoltaïque.....	18
II.4 Simulation de l'influence de la température et de l'éclairement.....	20
II.4.1 Influence de la température	20
II.4.2 Influence de l'éclairement	22
II.5 Caractérisation expérimentale du générateur photovoltaïque	23
II.5.1 L'influence de la température.....	24
II.5.2 L'influence de l'éclairement.....	25
II.6 Conclusion	26

Chapitre III : Capteurs des grandeurs météorologiques

III.1 Introduction	27
III.2 Paramètres météorologiques	27
III .2.1 La température.....	27
a) Thermo résistance.....	27
b) Thermistance	27
c) Thermomètre à quartz	28
d) Thermocouple.....	28
e) Thermomètre à semi-conducteur.....	28
III.2.2 La pression atmosphérique.....	28
a) Capteurs à jauge de contrainte	29
b) Les capteurs capacitifs	29
c) Les capteurs piézo-électriques	30
III.2.3 L'humidité relative.....	30
a) Hygromètre à cheveux	30
b) Hygromètre résistif.....	31
c) Hygromètre à condensation.....	31
d) Hygromètre capacitif.....	32
e) Capteurs gravimétriques.....	33
III.2.4 La vitesse du vent.....	33
a) Anémomètre à fil chaud	33
b) Anémomètre à coupelles	33
c) Anémomètre à ultrasons.....	33
III.2.5. Direction du vent.....	34
III.2.6. Les précipitations	34
a) Pluviomètres à augets basculeurs.....	34
b) Pluviomètres à mesure de hauteur d'eau.....	35
c) Pluviomètres optiques	35
III.2.7 Mesure de l'insolation.....	35
a) Héliographe Campbell-stokes	35
b) Héliographe à fibre optique.....	35
III.3 Capteurs utilisés	36
III.4 Conclusion.....	37

Chapitre IV : Rayonnement solaire et facteurs météorologiques

IV.1 Introduction.....	38
IV.2 Base de données utilisée	38
IV.3 Evolutions des données météorologiques	38
L'irradiation globale.....	39
L'insolation.....	39
La pression.....	40
La température.....	41
L'humidité relative RH (%).....	42
IV.4 Modèle de l'irradiation solaire globale	42
IV.5 Les critères de performance	45
IV.6 Résultats et discussion	46
IV.7 Conclusion	50
Conclusion générale	51

Bibliographie

Figure (I.1) : Définition des coordonnées terrestres d'un lieu donné [2].....	3
Figure (I.2) : Représentation de la déclinaison et de l'azimut. [2]	4
Figure (I.3) : Spectre solaire hors atmosphère. [8]	7
Figure (I.4) : Structure (à gauche) et diagramme de bande (à droite) d'une cellule photovoltaïque. [10].....	8
Figure (I.5) : Schéma de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	10
Figure (I.6) : Module PV	12
Figure (I.7) : Vue en coupe d'un module PV.....	12
Figure (I.8) : Champ de panneaux solaires [18]	12
Figure (II.1): Schéma équivalent d'une cellule solaire réelle. [14].....	14
Figure (II.2) : Schéma équivalent du panneau photovoltaïque.....	16
Figure (II.3) : Schéma bloc de simulation du panneau photovoltaïque.....	19
Figure (II.4) : Caractéristiques I (V) pratiques et simulées	19
Figure (II.5) : Caractéristiques P (V) mesurées et simulées	20
Figure (II.6) : Caractéristique simulée courant -tension à 1000W/m ² pour plusieurs températures.....	21
Figure (II.7) : Caractéristique simulée puissance- tension à 1000W/m ² pour plusieurs températures.....	21
Figure (II.8) : Caractéristique simulée courant tension pour différentes valeurs d'éclairement à température constante (25°C)	22
Figure (II.9) : Caractéristique simulée puissance tension pour différentes valeurs d'éclairement à température constante (25°C).	22
Figure (II.10) : Montage de mesure	23
Figure (II.11) : Caractéristique mesurée courant -tension à 1000W/m ² pour plusieurs températures.....	24
Figure (II.12) : Caractéristique mesurée puissance- tension à 1000W/m ² pour plusieurs températures.....	24
Figure (II.13) : Caractéristique mesurée courant tension pour différentes valeurs d'éclairement à température constante 24,5°C.....	25
Figure (II.14) : Caractéristique mesurée puissance tension pour différentes valeurs d'éclairement à température constante 24,5°C	25
Figure (III.1) : Capteur passif à jauges extensométriques	29
Figure (III.2) : Capteur à variation de capacité [16].....	29
Figure(III.3) : Capteur de pression piézoélectrique [16]	30
Figure (III.4) : Variation de longueur du cheveu en fonction de l'humidité relative [18]	31
Figure (III.5) : Hygromètre à condensation [19]	32
Figure (III.6) : Schéma de principe d'un hygromètre capacitif [19].....	32

Figure (III.7) : Pluviomètre à augets basculeurs [20]	34
Figure (III.8) : Station météorologique OREGON Scientific	36
Figure (IV.1) : L'irradiation (kWh/m²/j) durant l'année 2010 à Bejaïa	39
Figure (IV.2) : L'insolation (heures) durant l'année 2010 à Bejaïa	39
Figure (IV.3) : La pression atmosphérique (hPa) durant l'année 2010 à Bejaïa	40
Figure (IV.4) : La pression atmosphérique en mars 2010	40
Figure (IV.5) : Variation de la température et de l'humidité relative durant le mois de mars 2010 à Bejaïa	41
Figure (IV.6): Moyennes mensuelles de la température ambiante (°C) durant l'année 2010 à Bejaïa	41
Figure (IV.7) : L'humidité relative (%) durant l'année 2010 à Bejaïa	42
Figure (IV.8) : Comparaison de l'irradiation mesurée et estimée par le modèle d'Angstrom- Prescott	47
Figure (IV.9) : Comparaison d'irradiations mesurée et estimée par le modèle de Bahel	48
Figure (IV.10) : Comparaison d'irradiations mesurée et estimée par le modèle de Newland	48
Figure (IV.11) : Comparaison d'irradiations mesurée et estimée par le modèle d'Abdalla	49
Figure (IV.12) : Comparaison d'irradiations mesurée et estimée par notre modèle proposé	49

Liste des tableaux

Tableau(II.1) : Paramètres du module photovoltaïque Tenesol TE 1300 18
**Tableau (IV.1) : Valeurs des critères de performances MBE, RMSE, MPE et R pour les
différents modèles 47**

- A : Facteur d'idéalité de la jonction.
- AM0 : Spectre solaire hors atmosphère.
- A,b,c,d: Paramètres des modèles.
- D : Diode qui modélise la jonction PN.
- E : Eclairement (W/m^2).
- Eg : L'énergie de gap (eV).
- Eref : L'éclairement de référence ($1000 W/m^2$).
- EVA : Ethylène-vinyl- acétate.
- FF : Facteur de forme.
- Gi : Source de courant.
- H : L'irradiation globale ($Wh/m^2/j$).
- h : Constante de Planck (J.s).
- h : Hauteur angulaire du soleil (deg).
- H₀ : Rayonnement extraterrestre ($Wh/m^2/j$).
- H_{i, c} : L'irradiation calculé au jour i.
- H_{i, m} : L'irradiation mesuré au jour i.
- I : Courant délivré par le panneau (A).
- i : Le courant délivré par la cellule(A).
- I_{cc} : Le courant de court circuit (A).
- I_{cs} : Constante solaire (W/m^2).
- I_d : Courant de la diode (A).
- I_{ph} : Le photo-courant (A).
- I_{pm} : Courant à la puissance maximale sous conditions standards (A).
- i_{rsh} : Le courant shunt (A).
- I_{sat} : Courant de saturation de la jonction (A).
- K : Constante de Boltzmann (J/k).
- MBE : Mean Bias Error ($MJ/m^2/j$).
- MPE : Mean Percentage Error (%).
- N : Nombre de points de mesure.
- n : Le numéro de jours dans l'année compté à partir du 1er janvier.
- np : Nombre de branches en parallèles.
- ns : Nombre de cellules en séries sur une branche.
- P : Pression atmosphérique (hPa).
- P1, P2, P3, P4 : Paramètres constants du panneau.

- P_m : Puissance maximale sous conditions de référence (W).
- PV : Photovoltaïque.
- q : Charge de l'électron (coulomb).
- R : Coefficient de corrélation.
- RH : Humidité relative (%).
- Rh1, Rh2: Potentiomètre (ohm).
- RMSE: Root Mean Square Error (MJ/m²/j).
- R_s : Résistance série du module (ohm).
- r_s : Résistance série de la cellule (ohm).
- R_{sh} : Résistances shunt du module (ohm).
- r_{sh} : Résistance shunt de la cellule (ohm).
- S_a : Surface active de la cellule (m²).
- S : L'insolation (heures/j).
- S_0 : L'insolation hors atmosphère (heure/j).
- STC : Standard Test Condition.
- T : Température ambiante (°C).
- T_j : Température de la jonction des cellules (°C).
- T_{ref} : Température de référence (25°C).
- V : Tension aux bornes du panneau (V).
- V_{co} : La tension de circuit ouvert (V).
- V_{pm} : Tension à la puissance maximale sous conditions standards (A).
- W : Pluviométrie (mm).
- η : Rendement énergétique.
- α : Azimut.
- δ : Déclinaison du soleil (rad).
- ν : Fréquence des photons (Hz).
- φ : Latitude (rad).
- ω_s : Angle horaire du soleil à son coucher (rad).

Introduction

générale

Introduction générale

L'énergie est au centre de l'économie pour tous les pays, elle est à la base de toute activité humaine. Ses sources se sont diversifiées au cours du temps afin de satisfaire une demande toujours croissante. Les pays développés sont ainsi passés du bois au charbon, à des hydrocarbures plus avancés, l'hydroélectricité puis, enfin, au nucléaire. Cependant, les réserves de combustibles fossiles et nucléaires sont limitées. De plus, l'utilisation des combustibles fossiles est responsable des pluies acides et du réchauffement de la planète et l'exploitation de l'énergie nucléaire présente des risques d'accidents graves sans parler de ceux induits par la gestion des déchets résultants dont la dangerosité radioactive peut durer plusieurs milliers d'années.

Les énergies renouvelables constituent une solution de substitution. Elles peuvent provenir du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. A la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée et à différentes filières technologiques. La filière étudiée dans ce mémoire est l'énergie solaire photovoltaïque.

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule photovoltaïque. L'association de plusieurs cellules en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque qui a une caractéristique courant-tension non linéaire présentant un point de puissance maximale.

Toute étude ou application de l'énergie solaire en un site donné nécessite une connaissance complète de l'ensoleillement du site qui est indispensable pour le dimensionnement. Ceci est généralement facile lorsque le site est pourvu d'une station de mesures. Cependant, dans la majorité des cas, il n'existe pas des mesures locales d'ensoleillement et de flux solaire et on doit recourir à certaines méthodes approchées permettant de prédire les caractéristiques du rayonnement solaire. En plus des considérations géographiques, l'ensoleillement devrait être directement tributaire des facteurs météorologiques.

C'est dans ce cadre que s'inscrit notre travail avec pour objectif la modélisation de l'irradiation solaire globale en fonction des paramètres météorologiques.

Nous devons d'abord présenter l'état de l'art de l'énergie solaire et du générateur photovoltaïque. C'est l'objet du premier chapitre.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation électrique d'un panneau photovoltaïque basée sur le modèle à une seule diode. L'implémentation de ce modèle dans l'environnement Matlab/Simulink, permet de simuler les différentes caractéristiques afin de les comparer aux résultats expérimentaux.

Le troisième chapitre traite des différents capteurs des grandeurs météorologiques, en mettant l'accent sur les capteurs utilisés pour la collecte de nos données.

Le traitement des données météorologiques et des mesures de l'éclairement pour obtenir les différents modèles ainsi que les performances du modèle sélectionné seront présentés dans le dernier chapitre.

Chapitre I

*Généralités sur l'énergie
solaire photovoltaïque*

I.1 Introduction :

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) est de plus en plus utilisée pour opérer diverses applications terrestres comme l'éclairage, les télécommunications, la réfrigération et le pompage. Les systèmes PV ne nécessitent aucun apport extérieur de combustible; de plus, le générateur lui-même ne contient aucune pièce mobile et ne requiert donc pratiquement pas d'entretien. Pour ces raisons, cette source d'énergie convient particulièrement bien pour les utilisations en milieu rural où les populations sont réparties dans de petites communautés et où la demande énergétique est relativement faible.

I.2 Géométrie terre-soleil :

✓ **Latitude φ :**

C'est l'angle que fait le plan de l'équateur avec la direction reliant le centre de la terre à l'hémisphère sud.

✓ **Longitude :**

C'est l'angle que fait le méridien local passant par le point considéré avec le méridien d'origine passant par la ville de Greenwich. Sa valeur est positive à l'ouest et négative à l'est du méridien origine.

✓ **Méridien :**

Grand cercle de la terre passant par les pôles. Tous les points d'un même méridien ont évidemment la même longitude ; le méridien pris pour origine (0°) des longitudes est celui de Greenwich. Le plan méridien en un lieu est déterminé par ce lieu et par l'axe des pôles; sa trace au sol est parfois dénommée méridienne. [1]

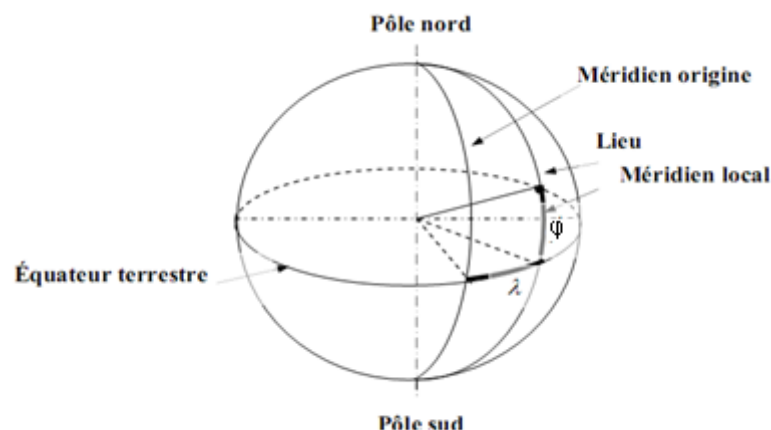


Figure (I.1) : Définition des coordonnées terrestres d'un lieu donné [2].

✓ **Déclinaison :**

C'est l'angle formé par le vecteur Soleil-Terre avec le plan équatorial. Elle est due à l'inclinaison de l'axe des pôles terrestre par rapport au plan elliptique, ce qui est traduit par les différentes saisons. Elle varie au cours de l'année entre $-23,45^\circ$ et $+23,45^\circ$. Elle est nulle aux équinoxes de printemps (21 mars) et d'automne (23 septembre), et maximale aux solstices d'été (22 juin) et d'hiver (22 décembre).

La variation journalière de la déclinaison δ est d'environ de $0,5^\circ$. Elle est calculée par une équation simple approximative : [3]

$$\delta = 23.45 \sin[(360(284 + n)/365)] \quad (1.1)$$

n est le nombre de jours de l'année comptés à partir du 1er janvier, il varie de 1 à 365 ou 366 selon l'année.

✓ **Azimut α :**

C'est l'angle compris entre le méridien du lieu et le plan vertical passant par le soleil, l'azimut nul, correspond à la direction sud dans l'hémisphère nord et la direction nord dans l'hémisphère sud. L'orientation Est correspond à l'azimut $\alpha = -90^\circ$, et l'orientation Ouest à $\alpha = +90^\circ$.

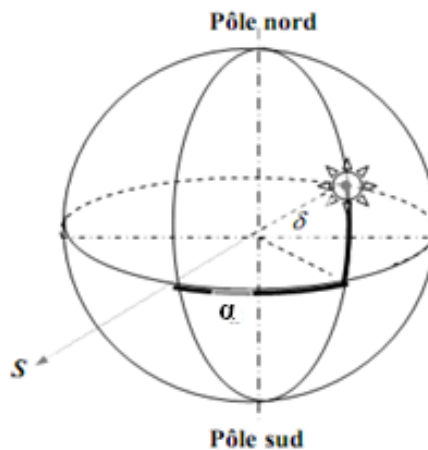


Figure (I.2) : Représentation de la déclinaison et de l'azimut. [2]

✓ **La hauteur angulaire du soleil h:**

C'est l'angle formé par le plan horizontal du lieu d'observation avec la direction du soleil. Cette hauteur durant le jour peut varier de 0° (soleil à l'horizon) à 90° (soleil au zénith).

La hauteur angulaire du soleil h est alors donnée par la formule : [4]

$$\sin h = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \quad (1.2)$$

Où φ : Latitude du lieu

δ : La déclinaison du soleil

ω : L'angle horaire du soleil

✓ **Angle horaire du soleil et angle horaire du soleil à son coucher : [2]**

L'angle horaire solaire est le déplacement angulaire du soleil autour de l'axe polaire, dans sa course d'est en ouest, par rapport au méridien local. La valeur de l'angle horaire est nulle au midi solaire, négative le matin, positive en après-midi et augmente de 15° par heure (un tour de 360° en 24 heures). Ainsi, à 7 h 00 du matin (heure solaire), l'angle horaire du soleil vaut -75° (7 h 00 du matin est 5 h avant midi; cinq fois 15° égal 75° , avec un signe négatif pour signifier que c'est le matin).

L'angle horaire du soleil à son coucher ω_s est l'angle horaire solaire correspondant à l'heure où le soleil se couche. Il est donné par l'équation suivante :

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan\varphi\tan\delta) \quad (1.3)$$

I.3 Le rayonnement solaire :

Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. Il a un diamètre de 1390000 km, soit environ 50 fois celui de la terre. Il est composé à 80% d'hydrogène, 19% d'hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments, soit pratiquement tout les éléments chimiques connus depuis que Langevin et Perrin, s'appuyant sur la théorie de la relativité d'Einstein, ont émis l'idée il y a une soixantaine d'années que c'est l'énergie de fusion nucléaire qui fournit au soleil sa puissance, il est aujourd'hui admis que le soleil est une bombe thermonucléaire hydrogène-hélium transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions de tonnes d'hélium; la réaction se faisant dans son noyau à la température d'environ 25 millions de degrés Celsius. Ainsi, à chaque seconde, le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement. [5]

I.3.1 Rayonnement extraterrestre :

Avant d'atteindre le sol, le rayonnement solaire est atténué par l'atmosphère terrestre et les nuages.

Il peut être calculé pour un jour précis n de l'année, par l'équation suivante : [6]

$$H_0 = \frac{24}{\pi} I_{cs} \left(1 + 0.0333 \cos\left(\frac{360n}{365}\right)\right) \times \left(\cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin \varphi \sin \delta\right) \quad (1.4)$$

Où I_{cs} est la constante solaire (1373 W/m^2), φ est la latitude du site ($36,817 \cdot \pi / 180$ rad), δ est la déclinaison solaire (rad), ω_s est l'angle horaire (rad) et n est le numéro du jour dans l'année à partir du 1^{er} janvier.

I.3.2 Les différentes composantes du rayonnement solaire :

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé. Au sol on distingue plusieurs composantes :

- ✓ **Le rayonnement solaire direct** : C'est le rayonnement reçu directement du soleil, sans diffusion.
- ✓ **Le rayonnement diffus** : Il est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols).
- ✓ **L'albédo** : C'est la partie réfléchiée par le sol. Il est déterminé à l'aide d'un appareil albédomètre et dépend de l'environnement du site.
- ✓ **Le rayonnement solaire global** : C'est la somme des différents rayonnements, on le mesure avec un pyranomètre.
- ✓ **La durée d'insolation** : Le temps pendant lequel le rayonnement solaire direct est supérieur à un seuil de 120 W/m^2 ; elle est exprimée en dixième d'heure. [7]

I.3.3 Spectre solaire :

Le rayonnement électromagnétique est composé de «grains» de lumière appelés photons. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde λ :

Le spectre du rayonnement extraterrestre correspond environ à l'émission d'un corps noir porté à 5800 K. Une courbe standard, compilée selon les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom de AM0. Sa distribution en énergie est répartie en [8]:

Ultraviolet UV	$0.20 < \lambda < 0.38 \text{ mm}$	6.4%
Visible	$0.38 < \lambda < 0.78 \text{ mm}$	48.0%
Infrarouge IR	$0.78 < \lambda < 10 \text{ mm}$	45.6%

La figure I.3 illustre le spectre solaire hors atmosphère.

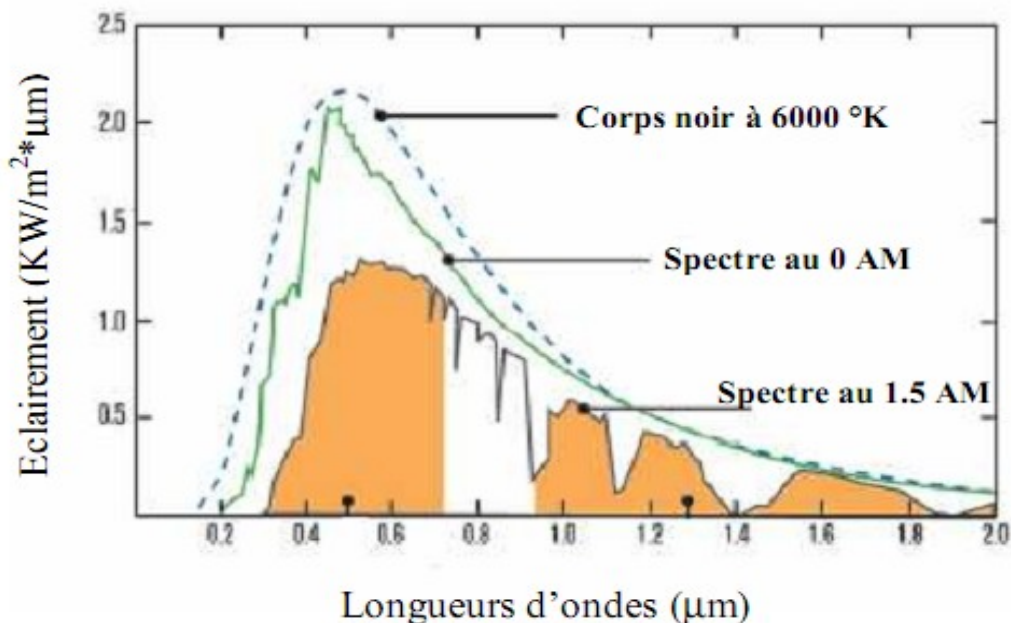


Figure (I.3) : Spectre solaire hors atmosphère. [8]

I.4 Le générateur photovoltaïque :

I.4.1 Principe :

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à engendrer une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et du vieillissement de la cellule [9].

I.4.2 Le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants :

- Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif.
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron/trou dans le matériau semi-conducteur ;
- Collecte des particules générées dans le dispositif.

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant : d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque.

Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électron/trou créés est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction p-n. D'autres structures, comme les hétérojonctions et les Schottky peuvent également être utilisées. Le fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la figure I.4 :

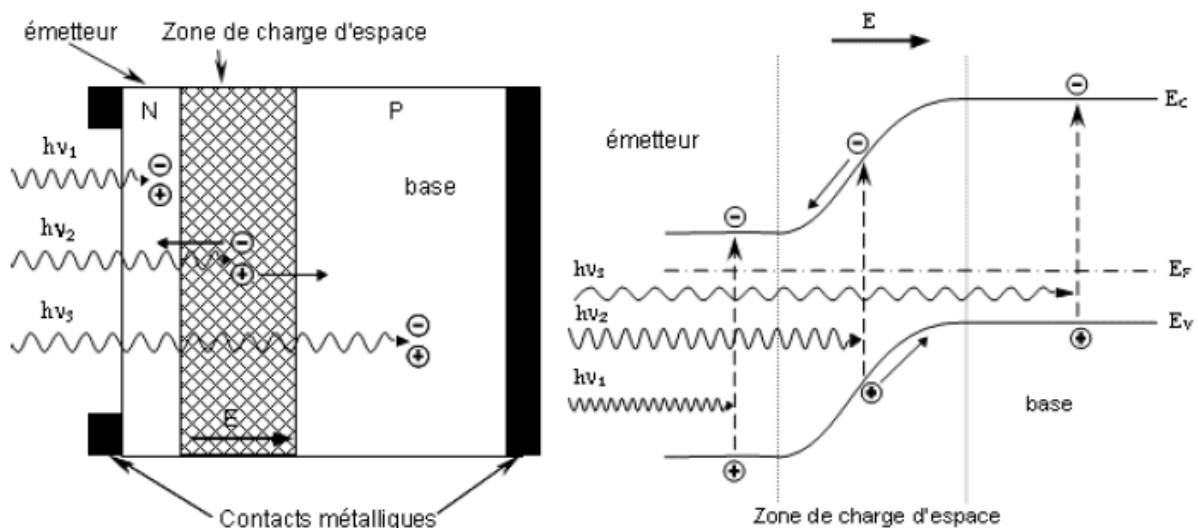


Figure (I.4) : Structure (à gauche) et diagramme de bande (à droite) d'une cellule photovoltaïque. [10]

Les photons incidents créent des porteurs dans les zones n et p et dans la zone de charge d'espace, les photoporteurs ont un comportement différent suivant la région :

- Dans la zone n où p, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace sont « envoyés » par le champ électrique dans la zone p (pour les trous) ou dans la zone n (pour les électrons) où ils sont majoritaires. On aura un photocourant de diffusion.
- Dans la zone de charge d'espace, les paires électro/trou créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique : les électrons vont aller vers la région n, les trous vers la région p. On aura un photocourant de génération.

Ces deux contributions s'ajoutent pour donner un photocourant résultant I_{ph} . c'est un courant de porteurs minoritaires.

I.4.3 Technologie des cellules PV:

➤ **Cellule en silicium monocristallin :**

Le silicium à l'état brut est fondu pour créer un barreau. Lorsque le refroidissement du silicium est lent et maîtrisé, on obtient un monocristal, son rendement typique est de 12%-15%, au laboratoire le rendement maximum obtenu est de 24%. [11]

➤ **Cellule en silicium polycristallin :**

Dans ce cas le silicium subit un refroidissement forcé qui crée une structure polycristalline ; son rendement typique est inférieur à celle du monocristallin, il est de l'ordre de 11%-14%, au laboratoire le rendement maximum obtenu est de 18%. [11]

➤ **Cellule en silicium amorphe :**

La technologie « couche mince » désigne un type de cellule obtenue par diffusion d'une couche mince de silicium amorphe sur un substrat (verre). Son rendement typique est de 6%-7%, au laboratoire le rendement maximum obtenu est de 12.7%. [11]

➤ **Cellules à base des composés III-V :**

L'objectif des cellules à base des composés III-V est la réduction des deux principales causes de perte de rendement des cellules unijonction, les pertes résultant de la non absorption des photons d'énergie $h\nu < E_g$ et les pertes thermiques associées à la thermalisation des photoporteurs chauds créés par les photons d'énergie $h\nu > E_g$.

Dans cette optique les semi-conducteurs III-V tels que le GaAs et InP, ainsi que leurs alliages, sont potentiellement plus performants que le silicium pour deux raisons évidentes, leur gap est direct et sa valeur est voisine de la valeur optimale.

Le principal obstacle dans les applications terrestres reste leur coût, mais leur domaine de prédiction est incontestablement le domaine spatial où le marché est moins sensible au coût qu'aux performances.

A cause de leurs propriétés, les composés III.V résistent mieux que le silicium aux rayonnements cosmiques et aux températures de fonctionnement en orbite ($\sim 50^\circ\text{C}$). [12]

➤ Cellules à base des nitrures :

Les nitrures d'éléments III, GaN, AlN, InN et leurs alliages ternaires et quaternaires sont des matériaux semi-conducteurs ayant une forte importance en microélectronique grâce à leurs propriétés réfractaires qui permettent d'envisager leur application dans des environnements hostiles (hautes températures, hautes puissances) et pour l'optoélectronique du fait de leurs gaps directs qui couvrent l'ensemble du spectre visible et même au delà. [13]

Dernièrement, les nitrures sont utilisés pour développer des cellules solaires de haute efficacité.

I.4.4 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque :

Le fonctionnement d'une cellule peut être représenté par la courbe $I=f(V)$, qui indique l'évolution du courant généré par la cellule PV en fonction de la tension à ses bornes depuis le court-circuit, jusqu'au circuit ouvert.

La cellule peut fonctionner selon toute combinaison de courant et de tension présentée sur sa caractéristique courant-tension mais, en réalité, elle fonctionne selon une seule combinaison à un moment donnée. Cette combinaison n'est pas déterminée par la cellule mais bien par les caractéristiques électriques du circuit qui y est raccordé.

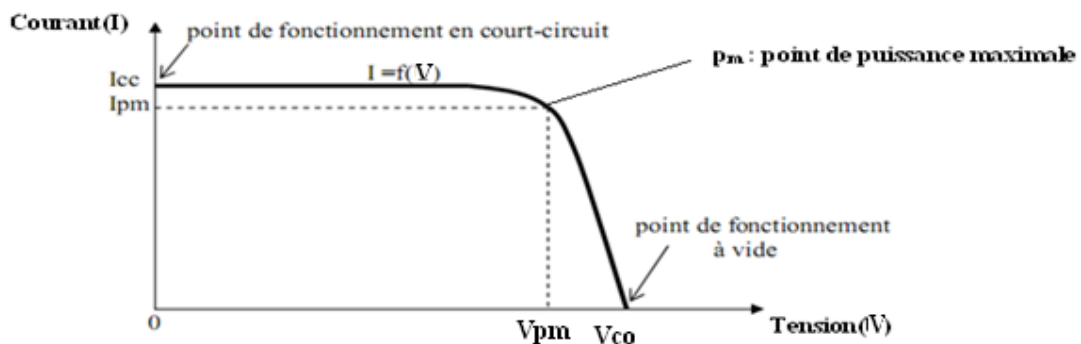


Figure (I.5) : Schéma de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

A partir de la caractéristique $I(V)$ de la cellule photovoltaïque de la figure (I.5), on déduit les paramètres électriques propres à la cellule et notamment :

I_{cc} : Courant de court-circuit (obtenu pour $U=0$).

V_{co} : Tension en circuit ouvert (obtenue pour $I=0$).

I_{pm} : Courant à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.

V_{pm} : Tension à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.

FF : Facteur de forme qui indique le degré d'idéalité de la caractéristique.

$$FF = \frac{P_m}{V_{co} I_{cc}} \quad (1.5)$$

Le rendement énergétique η d'une cellule est défini par le rapport entre la puissance électrique maximale (P_m) et la puissance du rayonnement solaire qui arrive sur la cellule photovoltaïque : [10]

$$\eta = \frac{P_m}{E \cdot S_a} \quad (1.6)$$

Avec :

– E : Eclairement (W/m^2) ;

– S_a : surface active de la cellule (m^2) ;

– P_m : puissance maximale mesurée dans les conditions de référence (STC : *Standard Test Condition*), c'est-à-dire sous l'ensoleillement de $1\,000\, W/m^2$, spectre AM 1.5 et à la température de $25^\circ C$.

I.4.5 Le module photovoltaïque :

Pour produire plus de puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module comme le montre la figure (I.6). 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. Comme illustré sur la figure (I.7), ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA (éthylène-vinyl- acétate) et protégées sur la surface avant d'un verre trempé à haute transmission et de bonne résistance mécanique, et sur la surface arrière d'une couche de polyéthylène . [17]

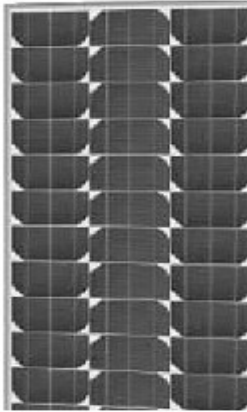


Figure (I.6) : Module PV.

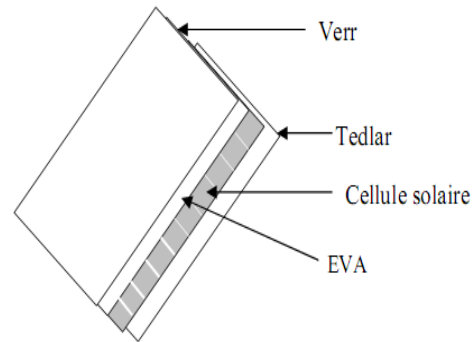


Figure (I.7): Vue en coupe d'un module PV.

I.4.6 Le panneau solaire :

Le panneau solaire ou (champ solaire) se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique.



Figure (I.8) : Champ de panneaux solaires [18].

I.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques notions sur le rayonnement solaire et les différents paramètres intervenant dans les calculs. Nous avons décrit le principe de fonctionnement d'une cellule PV et les technologies de fabrication utilisées. Nous avons abordé la constitution du générateur photovoltaïque dont la modélisation sera présentée dans le deuxième chapitre.

Chapitre II

*Générateur photovoltaïque:
modélisation, simulation,
caractérisation expérimentale*

II.1 Introduction :

Pour obtenir le modèle du générateur photovoltaïque, il faut tout d’abord retrouver le circuit électrique équivalent de 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 rencontre dans la littérature plusieurs modèles mathématiques du panneau photovoltaïque (modèle à une diode, à deux diodes,..), qui ont été développés, dont le but est l’obtention de la caractéristique courant- tension pour l’analyse et l’évaluation des performances des systèmes photovoltaïques.

II.2 Modélisation du générateur photovoltaïque :

Dans ce présent travail on choisit le modèle à une diode représenté sur la figure II.1.

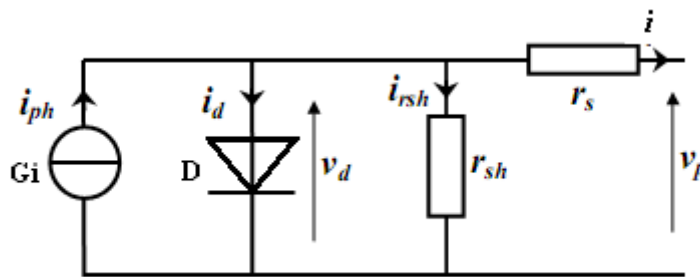


Figure (II.1): Schéma équivalent d'une cellule solaire réelle. [14]

Avec :

G_i : Source de courant parfaite.

D : Diode qui modélise la jonction PN.

r_{sh} : Résistance shunt qui prend en compte les fuites inévitables de courant qui intervient entre grille collectrice et le courant arrière des cellules.

r_s : Résistance série qui est due essentiellement à la résistance de contact des grilles collectrices avec la surface des cellules et la résistance du matériau constituant les cellules.

L’étude de la physique d’une cellule solaire nous permet d’obtenir l’équation de courant de la charge : [14]

$$i = i_{ph} - i_d - i_{rsh} \tag{2.1}$$

Avec :

i : Le courant délivré par la cellule.

i_{ph} : Photo courant.

i_d : Courant de la diode.

i_{rsh} : Le courant shunt.

La résistance (r_{sh}) étant assez élevée, on peut négliger le courant i_{rsh} et l'équation (2.1) s'écrit :

$$i = i_{ph} - i_d \quad (2.2)$$

D'autre part le courant i_{ph} est proportionnel à l'éclairement donc :

$$i_{ph} = a_1 \times E \quad (2.3)$$

Tel que :

a_1 : Coefficient de proportionnalité.

E : Eclairement direct en (W/m^2).

Le courant de polarisation est de la forme :

$$i_d = a_2 [\exp(a_3 v) - 1] \quad (2.4)$$

Les paramètres a_1 , a_2 , a_3 sont en fonction de la température T , ils sont exprimés comme suit :

$$a_1 = 2.5 \times 10^{-7} T + 2 \times 10^{-4} \quad (A / (w/m^2))$$

$$a_2 = 4 \times 10^{-6} T^{-4} \exp(-a_3) \quad (A)$$

$$a_3 = \frac{q}{KT} = \frac{1.6 \times 10^{-19}}{1.38 \times 10^{-28} T} \quad (A/W)$$

Tel que:

T : La température (Kelvin).

q : La charge d'électron (coulomb).

K : La constante de Boltzmann (J/k).

Donc l'équation finale du courant est :

$$i = a_1 E - a_2 [\exp(a_3 v) - 1] \quad (2.5)$$

Par contre un panneau photovoltaïque est une association série/parallèle de $n_s \times n_p$ cellules élémentaires, n_s étant le nombre de cellules en séries sur une branche et n_p le nombre de branches en parallèles. Si toutes les cellules sont identiques et fonctionnent dans les mêmes conditions, nous obtenons le panneau photovoltaïque présenté par le circuit électrique équivalent de la/figure II.2 : [14]

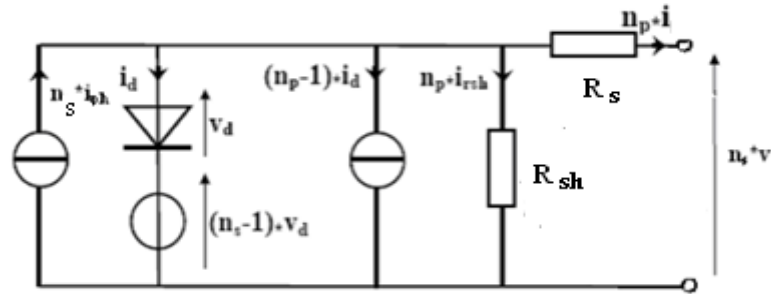


Figure (II.2) : Schéma équivalent du panneau photovoltaïque.

Nous utiliserons dans ce qui suit les notations suivantes :

$$I = n_p \times i$$

$$I_{ph} = n_s \times i_{ph}$$

$$I_d = n_s \times i_d$$

$$I_{rsh} = n_p \times i_{rsh}$$

$$V_d = n_s \times v_d$$

$$V = n_s \times v$$

$$R_s = \frac{n_s}{n_p} \times r_s$$

$$R_{sh} = \frac{n_s}{n_p} \times r_{sh}$$

Ce modèle comporte quatre variables. Les deux variables d'entrées sont :

E : L'éclairement (W/m^2).

T_j : Température de la jonction des cellules ($^{\circ}C$).

Les deux variables de sorties sont :

I : Courant délivré par le panneau (A).

V : Tension aux bornes du panneau (V).

On obtient alors l'équation caractéristique pour un panneau photovoltaïque déduite du schéma électrique équivalent de la figure (I.2).

$$I = I_{ph} - I_d - I_{rsh} \tag{2.6}$$

Le photocourant, I_{ph} , est directement dépendant de l'éclairement et de la température du panneau et peut se mettre sous la forme :

$$I_{ph} = p_1 \times E[1 + p_2 \times (E - E_{ref}) + p_3 \times (T_j - T_{ref})] \quad (2.7)$$

Tel que :

E_{ref} : L'éclairement de référence (1000 W/m²).

T_{ref} : Température de référence (25°C).

p_1, p_2, p_3 : Des paramètres constants.

Le courant de polarisation de la jonction PN, I_d , est donné par l'expression suivante :

$$I_d = I_{sat} \times \left[\exp\left(\frac{q \times (V + R_s I)}{K \times A \times n_s \times T_j}\right) - 1 \right] \quad (2.8)$$

Où :

I_{sat} : Courant de saturation.

K : Constante de Boltzmann (1.38×10^{-23} J/K).

q : Charge élémentaire (1.6×10^{-19} C).

A : Facteur d'idéalité de la jonction.

On a aussi le courant de saturation qui est fortement dépendant de la température ; il s'écrit sous la forme :

$$I_{sat} = P_4 \times T_j^3 \times \exp\left(-\frac{E_g}{K \times T_j}\right) \quad (2.9)$$

Où :

E_g : L'énergie de gap (pour le silicium $E_g = 1.12$ eV).

P_4 : Paramètre constant.

Le courant shunt est donné par l'expression suivante :

$$I_{rsh} = \frac{V}{R_{sh}} \quad (2.10)$$

On peut alors écrire l'équation finale comme suit:

$$I = p_1 \times E \left[1 + p_2 \times (E - E_{ref}) + p_3 \times (T_j - T_{ref}) \right] - \frac{V}{R_{sh}} - P_4 \times T_j^3 \times \exp\left(-\frac{E_g}{K \times T_j}\right) \times \left[\exp\left(\frac{q \times (V + R_s \times I)}{K \times A \times n_s \times T_j}\right) - 1 \right] \quad (2.11)$$

Finalement on obtient une fonction implicite de la forme : $I = f(I, V, E, T_j)$ avec 7 paramètres $p_1, p_2, p_3, p_4, A, R_s$ et R_{sh} caractéristiques du panneau photovoltaïque.

Les paramètres optimaux du module photovoltaïque type Tenesol TE 1300 sont rassemblés dans le tableau II.1. [15]

Tableau(II.1) : Paramètres du module photovoltaïque Tenesol TE 1300

Paramètre	valeur
P_1	0.00755
P_2	$8.7857 \cdot 10^{-5}$
P_3	0.001
P_4	778.7
A	1
R_s	0.714
R_{sh}	131

II.3 Simulation du générateur photovoltaïque :

Le schéma de simulation du générateur photovoltaïque implanté dans l'environnement Simulink/ Matlab est représenté sur la figure II.3.

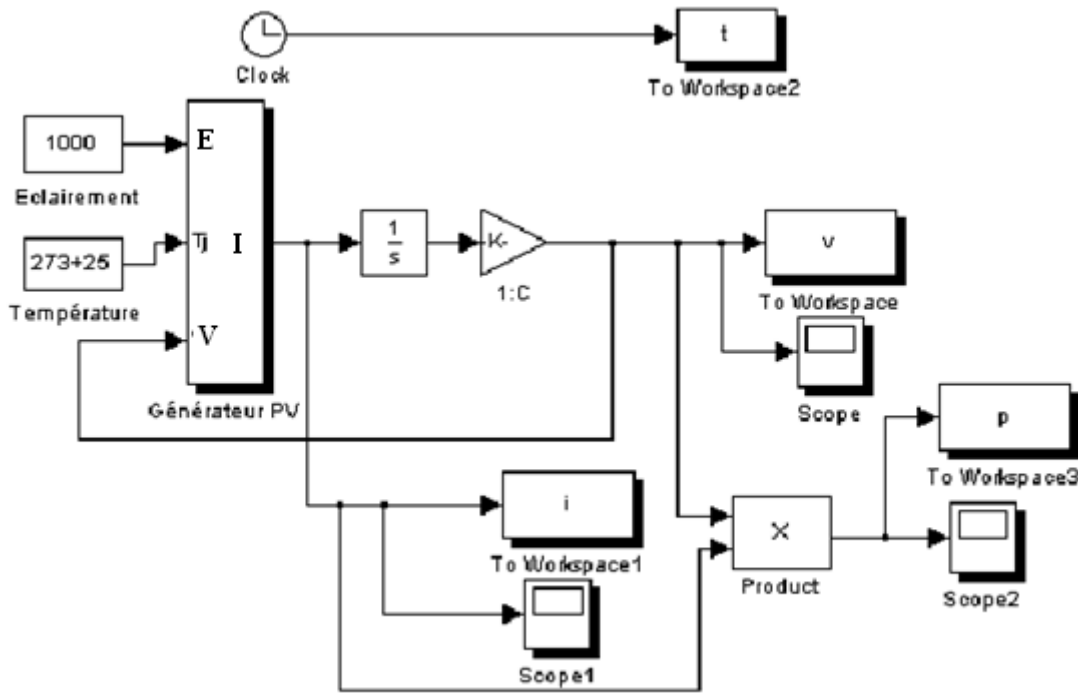


Figure (II.3) : Schéma bloc de simulation du panneau photovoltaïque.

Nous pouvons voir sur les figures (II.4) et (II.5) les caractéristiques courant/tension et puissance/tension obtenues par le modèle ainsi que les relevés expérimentaux obtenus au niveau du laboratoire de Génie Electrique de l'université de BEJAIA sur le module photovoltaïque Tenesol TE 1300.

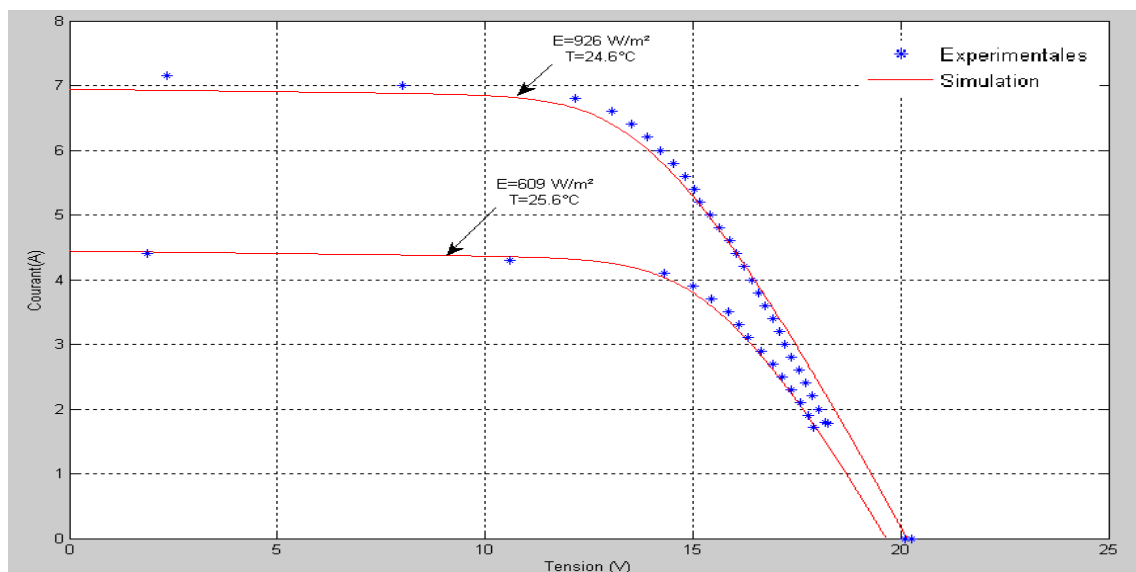


Figure (II.4) : Caractéristiques I (V) pratiques et simulées.

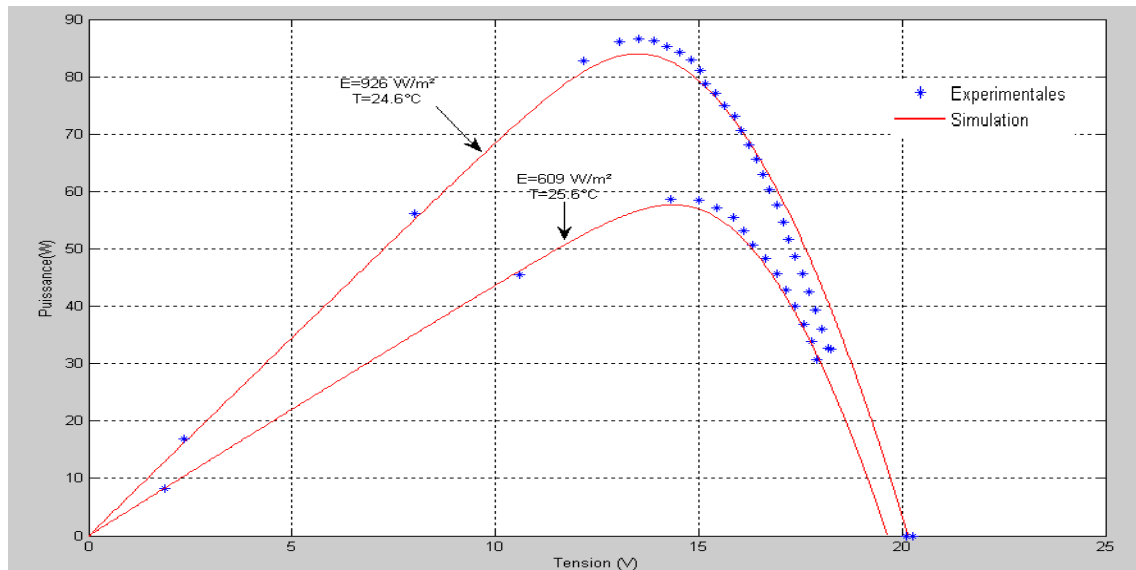


Figure (II.5) : Caractéristiques P (V) mesurées et simulées.

Nous constatons un très bon accord entre les caractéristiques expérimentales et celles simulées. Ceci permet de valider le modèle mathématique du générateur photovoltaïque.

II.4 Simulation de l'influence de la température et de l'éclairement :

Nous avons simulé les caractéristiques puissance-tension P (V) et courant-tension I (V) pour une large plage de variation de l'éclairement reçu par le panneau photovoltaïque (de 200 à 1000 W/m²) et de température (20°C à 45°C).

Les résultats de simulation du modèle sont représentés sur les figures II.6 à II.9.

II.4.1 Influence de la température :

Pour voir l'influence de la température, nous avons tracé les caractéristiques I(V) et P(V) pour différentes valeurs de température pour un éclairement solaire constant

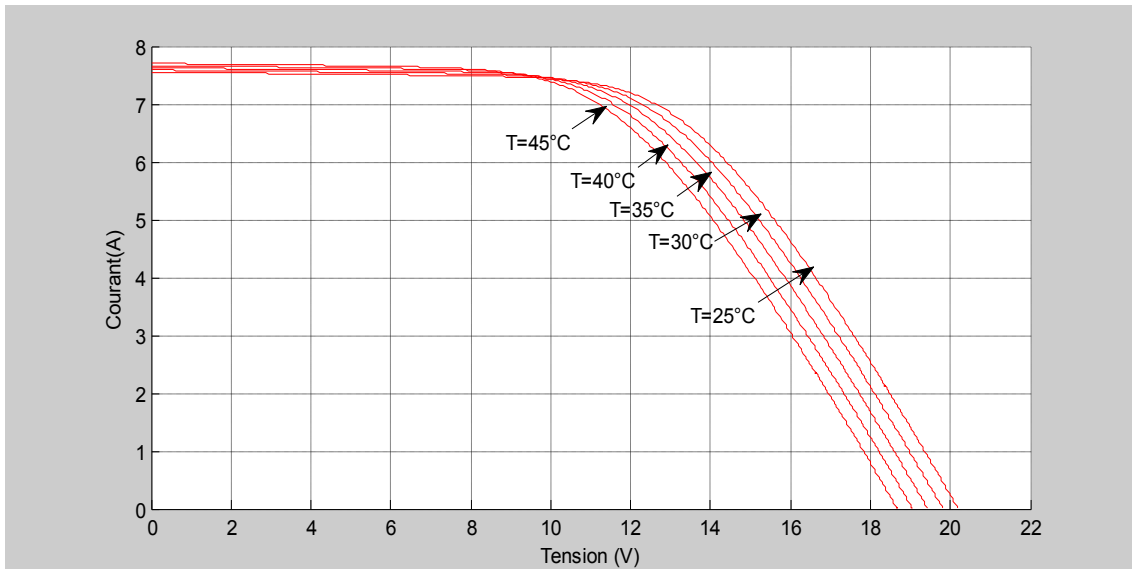


Figure (II.6) : Caractéristique simulée courant -tension à 1000W/m² pour plusieurs températures

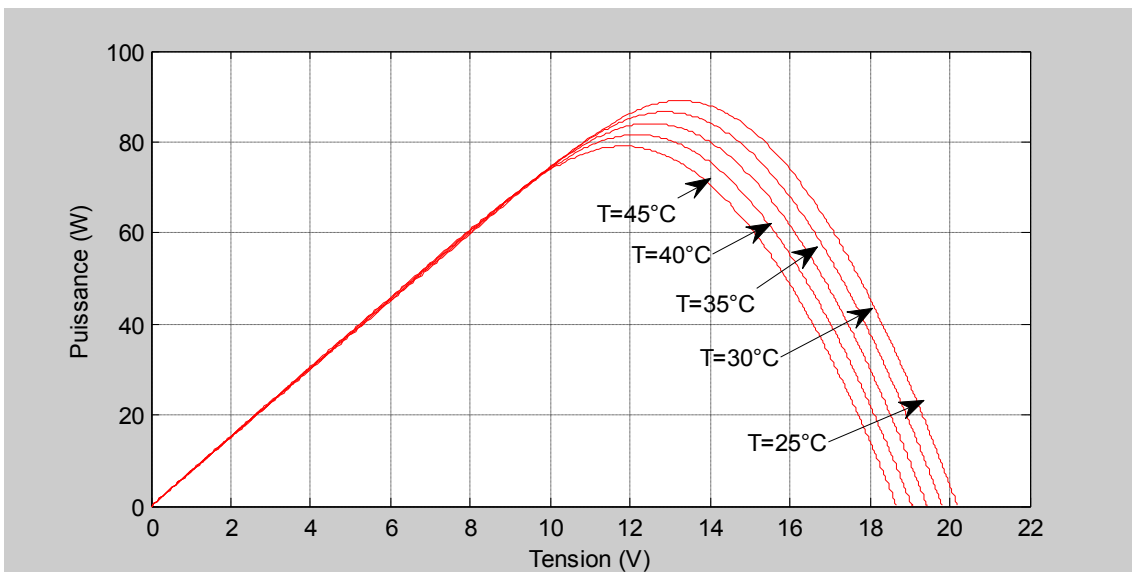


Figure (II.7) : Caractéristique simulée puissance- tension à 1000W/m² pour plusieurs températures

La figure (II.6) montre que la tension en circuit ouvert du module photovoltaïque diminue avec l'augmentation de la température, par contre, le courant de court circuit varie très peu avec la température. La figure (II.7) montre que la puissance optimale P_m diminue

avec l'augmentation de la température et la tension du point de puissance optimale diminue également.

II.4.2 Influence de l'éclairement :

Pour voir l'influence de l'éclairement, nous avons tracé les caractéristiques I(V) et P(V) pour différents niveaux d'éclairement solaire mais à une température constante.

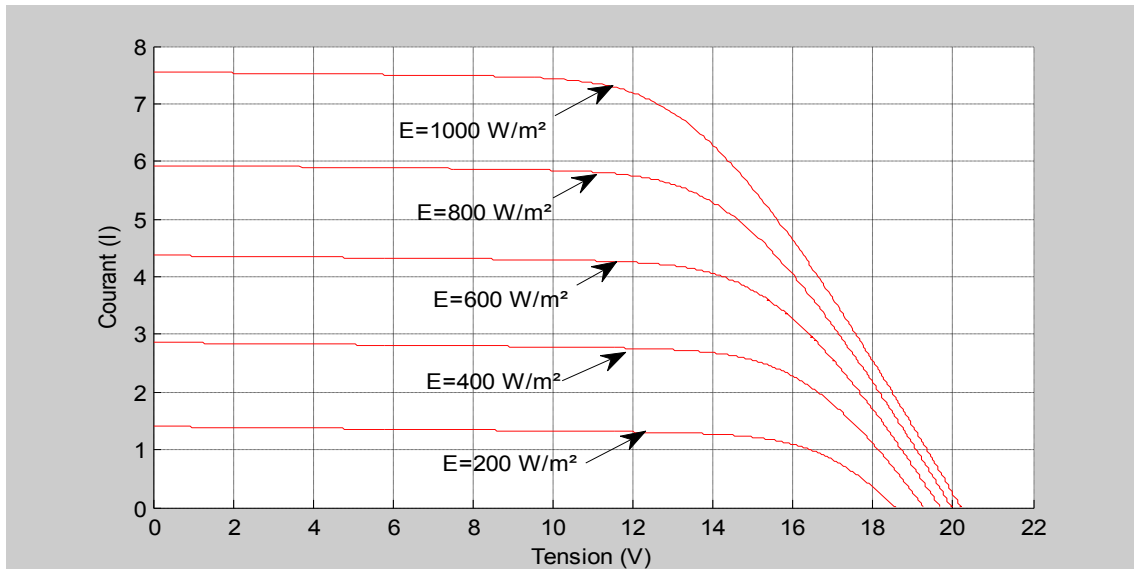


Figure (II.8) : Caractéristique simulée courant tension pour différentes valeurs d'éclairement à température constante (25°C).

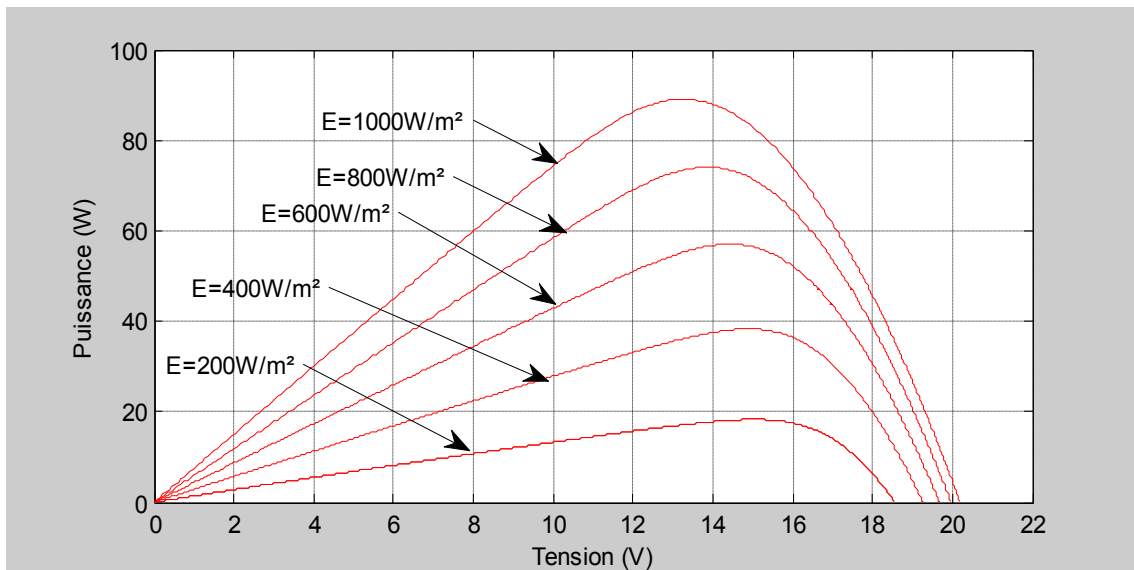


Figure (II.9) : Caractéristique simulée puissance tension pour différentes valeurs d'éclairement à température constante (25°C).

La figure (II.8) montre que le courant de court circuit du module photovoltaïque augmente fortement avec l'augmentation de l'éclairement solaire, par contre, la tension en circuit ouvert varie légèrement avec l'éclairement solaire. La figure (II.9) montre que la puissance optimale P_m augmente avec l'augmentation de l'éclairement. Mais, les points de tension qui correspondent à la puissance optimale varient peu.

II.5 Caractérisation expérimentale du générateur photovoltaïque :

Nous avons utilisé un panneau solaire Tenesol TE 1300 orienté plein sud avec une inclinaison de 45 degrés. Un capteur solaire (Silicon pyranometer SOZ-03 de sensibilité 97.8 mV pour 1000 W/m²) placé dans les mêmes conditions que le panneau permet de mesurer l'éclairement et un capteur de température indique la température ambiante au voisinage du panneau. Le montage de la figure II.10 permet de relever la tension et le courant.

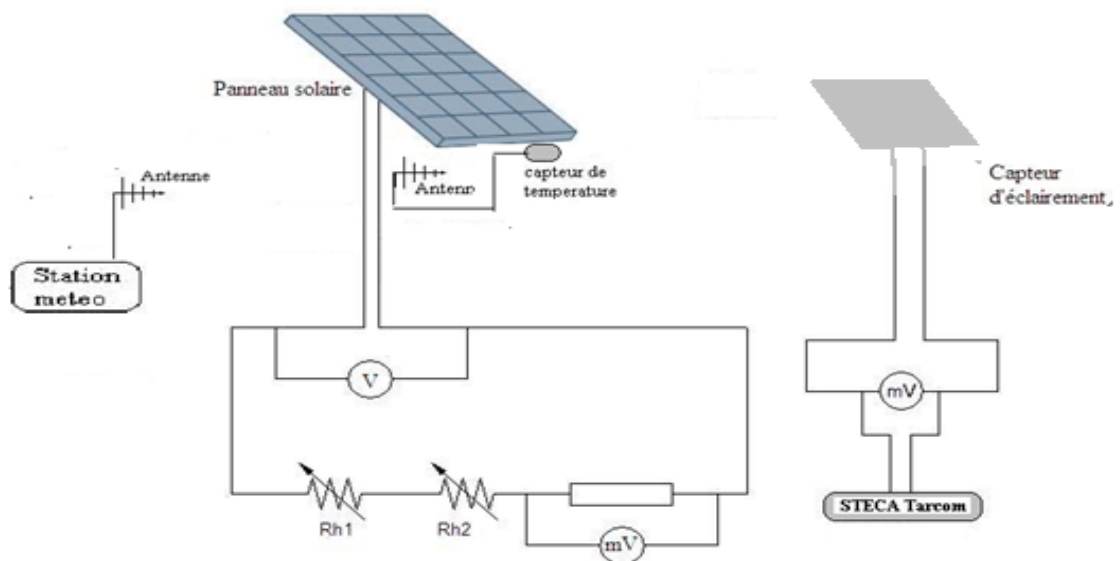


Figure (II.10) : Montage de mesure.

Le potentiomètre Rh1 est de 33 Ω, 3.1 A et Rh 2 est de 6.9 Ω, 6 A. Le shunt est de 100 mV, 10 A. Nous avons relevé $I=f(V)$ pour les deux éclairements (509.5 et 1000 W/m²) et à températures ambiantes (22 et 35 °C) durant l'année 2010.

Les résultats de mesures sont représentés sur les figures II.11 à II.14.

II.5.1 L'influence de la température :

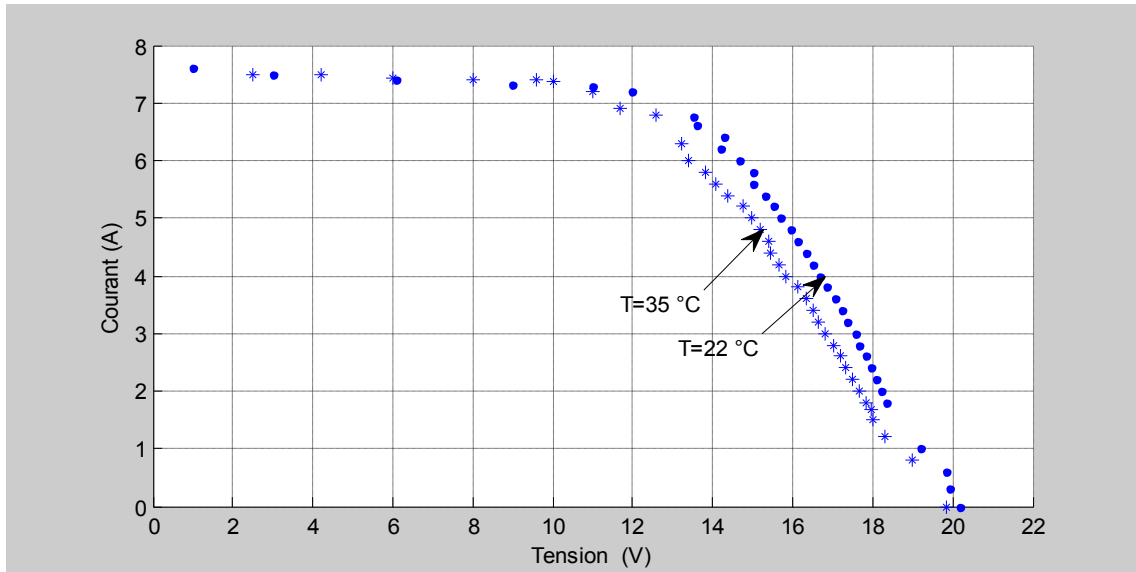


Figure (II.11) : Caractéristique mesurée courant -tension à 1000W/m² pour plusieurs températures

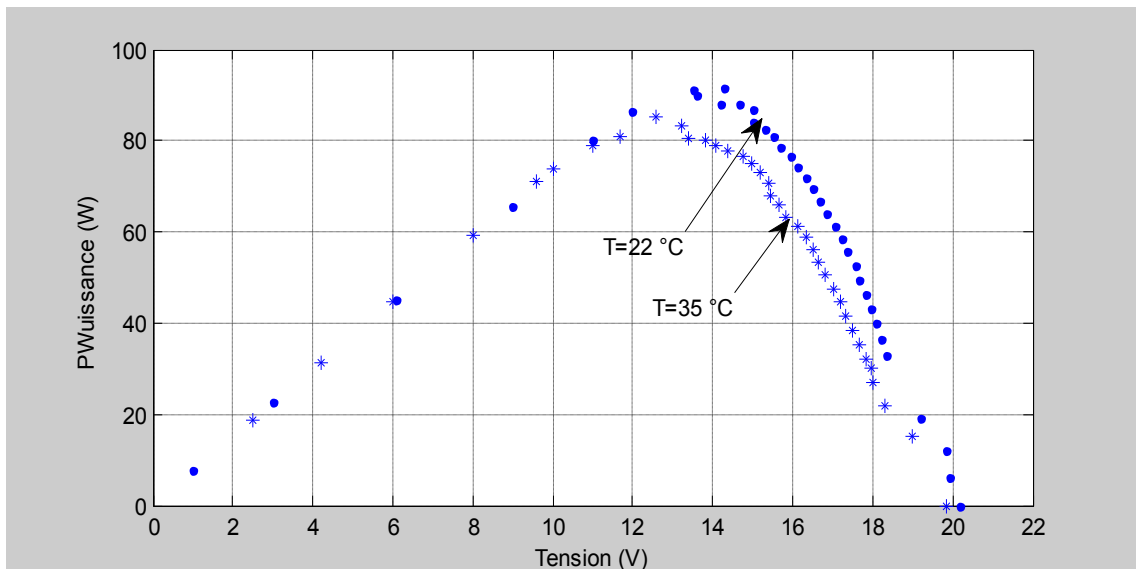


Figure (II.12) : Caractéristique mesurée puissance- tension à 1000W/m² pour plusieurs températures.

II.5.2 L'influence de l'éclairement:

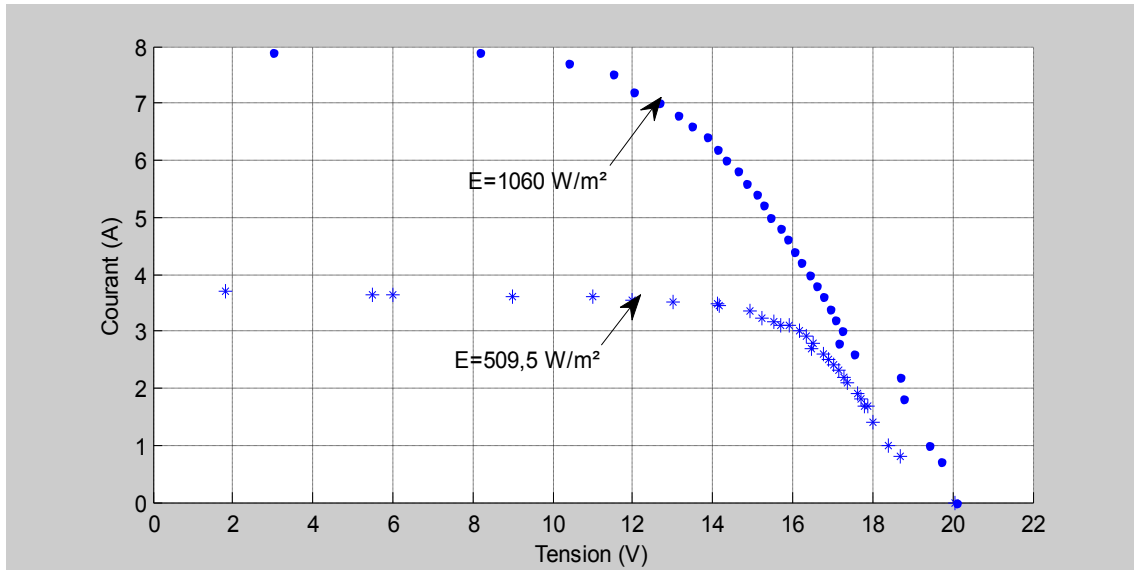


Figure (II.13) : Caractéristique mesurée courant tension pour différentes valeurs d'éclairement à température constante 24 ,5°C.

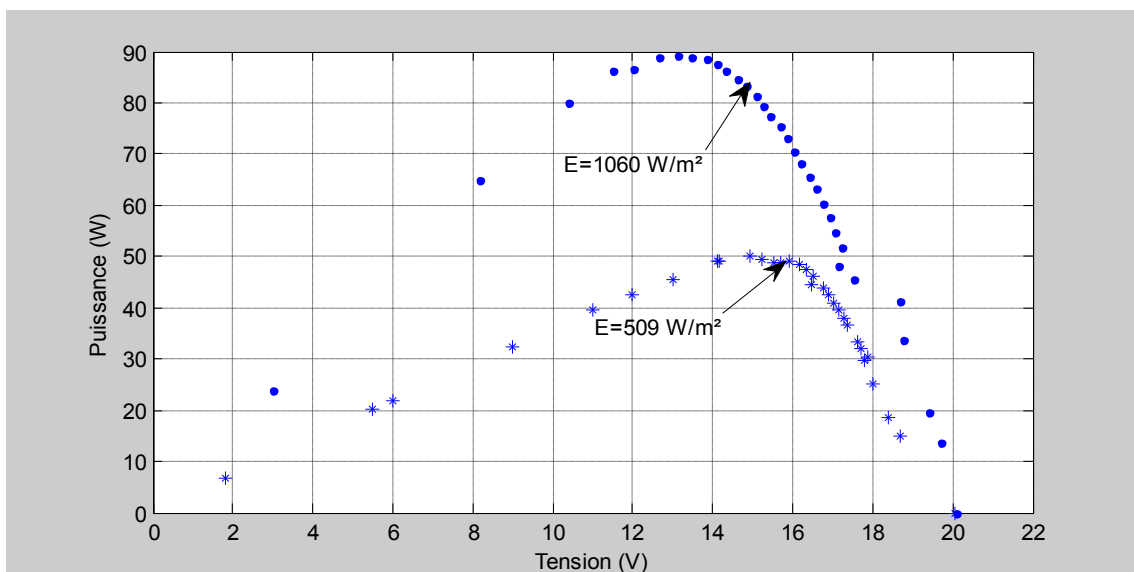


Figure (II.14) : Caractéristique mesurée puissance tension pour différentes valeurs d'éclairement à température constante 24 ,5°C.

D'après les figures II.11 à II.14, nous remarquons que les variations expérimentales ont les mêmes allures que les courbes simulées.

II.6 Conclusion :

A partir du modèle à une diode de la cellule photovoltaïque, le panneau solaire Tenesol TE 1300 a été modélisé. Les résultats de simulation des caractéristiques courant- tension et puissance-tension sont similaires aux résultats de mesures.

Les influences de l'éclairement et de la température sur la puissance pouvant être délivrée par un panneau PV sont importantes. Lorsque l'éclairement varie pour une température donnée, le courant de court-circuit varie proportionnellement à l'éclairement alors que la tension de circuit ouvert varie très peu. Par contre, si la température croît à éclairement constant, la tension de circuit ouvert décroît alors que le courant de court circuit croît légèrement. Ces influences ont été vérifiées par simulation et par des mesures.

Chapitre III

Capteurs des grandeurs météorologiques

III.1 Introduction :

La météorologie repose sur l'observation régulière des phénomènes météorologiques et sur l'étude des lois qui régissent les gaz de l'atmosphère, leurs changements d'état et leurs mouvements. Les principaux facteurs observés sont la pression atmosphérique, la température, l'humidité, le vent, les précipitations et les nuages.

L'atmosphère terrestre est une couche de gaz entourant la terre. On considère que sa constitution est la suivante :

- 78 % de diazote (N₂)
- 21% de dioxygène (O₂)
- 1 % de gaz divers (Ar, CO₂, ...)

La couche la plus éloignée de l'atmosphère monte jusqu'à 400 km d'altitude. Toutefois la partie la plus importante de l'atmosphère est groupée dans les basses couches. La partie dans laquelle les phénomènes météorologiques sont concentrés évolue entre 7 km d'altitude aux pôles et 15 km à l'équateur.

III.2 Paramètres météorologiques :

Nous nous intéressons aux paramètres qui peuvent avoir une relation avec l'éclairement arrivant sur le panneau photovoltaïque et son rendement : la température, la pression atmosphérique, l'humidité relative de l'air, la vitesse et direction du vent, les précipitations et l'insolation.

III .2.1 La température :

Lorsque deux particules d'eau dans l'air se rencontrent, il y a interaction ce qui entraîne des échanges d'énergie très importants qui donnent naissance à la température.

Les capteurs de température les plus utilisés sont :

a) Thermo résistance :

Elles sont basées sur le fait que la résistance électrique d'un conducteur métallique augmente avec la température .On utilise souvent le platine qui est caractérisé par sa linéarité et sa stabilité.

b) Thermistance :

Ce sont des semi-conducteurs dont la résistance varie inversement avec la température.

Elles sont tout particulièrement utilisées dans les radiosondes en raison de leur faible inertie thermique, d'un encombrement, d'une masse, et d'un coût faibles.

c) Thermomètre à quartz :

Ce capteur contient un oscillateur à quartz, sa fréquence varie avec la température. Le domaine d'utilisation est entre -200 et 600 °C.

d) Thermocouple :

Un thermocouple est constitué de deux conducteurs A et B formant entre eux deux jonctions aux températures T1 et T2. La première température (T1) est connue et sert de référence et l'autre (T2) est placée dans le milieu étudié et représente la température inconnue. Il apparaît une différence de potentiel entre les deux électrodes qui est fonction de la différence de température et du couple de métaux utilisé.

e) Thermomètre à semi-conducteur :

Les composants utilisés, diodes ou transistors au silicium montés en diode, sont alimentés dans le sens direct à courant I constant. L'équation qui régie la tension à ses bornes (V_d) est en fonction de la température.

$$V_d = (KT_j/q) * \ln(I_d / I_{sat}) \quad (3.1)$$

I_d : Courant de polarisation la jonction PN.

I_{sat} : Courant de saturation.

T_j : Température en degré Kelvin

K : Constante de Boltzmann.

q : Charge de l'électron.

Ces capteurs présentent une erreur absolue assez faible et une bonne sensibilité, mais ils nécessitent une source d'alimentation externe.

III.2.2 La pression atmosphérique:

La pression atmosphérique est représentée par la force que l'atmosphère exerce par son poids sur une unité de surface. L'unité de pression utilisée en météorologie est l'hectopascal (hPa). Les principaux capteurs de pression sont les capteurs à membrane (à jauges de contrainte ou capacitif) et les capteurs piézoélectriques.

a) Capteurs à jauge de contrainte :

Le capteur est constitué d'un corps d'épreuve qui se déforme sous l'effet de la pression atmosphérique et d'un élément sensible solidaire (jauge de contraintes) dont la résistance électrique est fonction de la déformation.

Ces jauges de contraintes sont montées en pont Wheatstone afin d'éliminer les effets dus aux contraintes parasites ; le déséquilibre du pont peut être exploité directement ou amplifié. L'ajustage de la sensibilité et la compensation de température sont réalisés à l'aide de résistances intégrées au capteur.

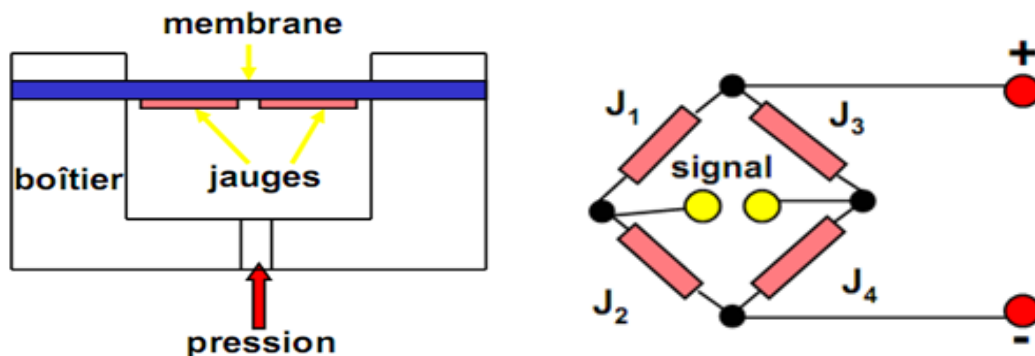


Figure (III.1) : Capteur passif à jauges extensométriques.

b) Les capteurs capacitifs :

La capacité entre deux plaques de métal se modifie quand la distance qui les sépare varie. Un capteur de pression à capacité variable, tel qu'illustré à la Figure (III.2), permet de mesurer la variation de capacité entre un diaphragme métallique et une plaque de métal fixe.

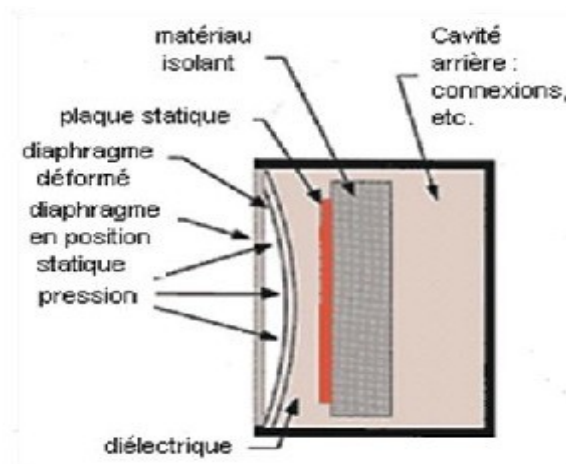
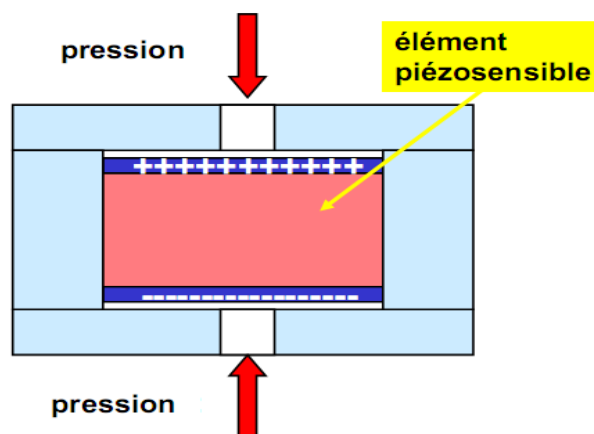


Figure (III.2): Capteur à variation de capacité [16].

c) Les capteurs piézo-électriques :

Les capteurs de pression piézoélectriques (Figure III.3) tirent partie des propriétés électriques de cristaux naturels comme le quartz. Ces cristaux génèrent une charge électrique lorsqu'ils sont soumis à une contrainte. Ces capteurs piézoélectriques ne demandent pas de source d'excitation extérieure et sont particulièrement robustes. Ils requièrent en revanche un amplificateur de charge et ils sont très sensibles aux chocs et aux vibrations.



Figure(III.3) : Capteur de pression piézoélectrique [16].

III.2.3 L'humidité relative :

L'humidité relative de l'air se définit par le rapport de la pression exercée par la vapeur d'eau contenue dans l'air à une température donnée sur la pression de la vapeur d'eau saturante (c'est-à-dire au maximum de vapeur d'eau que cet air pourrait absorber à cette même température).

L'humidité relative de l'air indique suivant une échelle allant de 0 à 100 %, l'état d'humidité ou de sécheresse de l'air. Elle caractérise donc le contenu de l'air en vapeur d'eau et la capacité de cette vapeur d'eau à se condenser. La température du point de rosée T_d correspond à la température à laquelle l'air humide doit être amené, à pression constante, pour qu'il se sature et la vapeur se condense. L'humidité relative de l'air s'exprime en pourcentage.

Les principaux capteurs d'humidité sont:

a) Hygromètre à cheveux :

Ce principe est historiquement le premier utilisé pour évaluer le taux ambiant d'humidité. La transduction repose sur la déformation d'un cheveu après absorption d'humidité [17].

L'absorption d'humidité provoque un effet de gonflement du cheveu qui se traduit essentiellement par une variation de longueur qui est transmise à une aiguille ou à une pointe d'enregistrement par une transmission spéciale.

Des fibres organiques sont aussi utilisées à la place de cheveux.

L'avantage de cette technique de transduction est qu'elle n'est pas sujette à la dérive en température, le matériau est généralement fiable sur une longue durée.

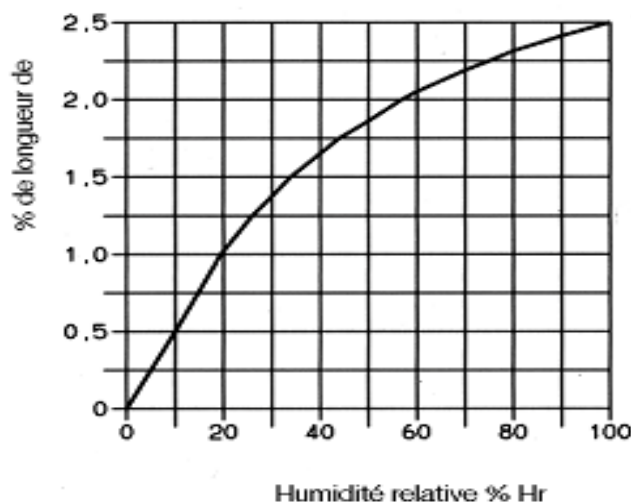


Figure (III.4) : Variation de longueur du cheveu en fonction de l'humidité relative [18].

b) Hygromètre résistif :

Ces capteurs mettent en œuvre des substances dont le contenu en eau est fonction de l'état hygrométrique ambiant. Les quantités d'eau retenues par le matériau affectant ses propriétés électriques (résistivité), on peut alors connaître l'humidité en mesurant la résistance.

c) Hygromètre à condensation :

Un hygromètre à condensation comporte un petit miroir constamment refroidi par effet Peltier devant un échantillon d'air humide, jusqu'à ce que de fines gouttelettes d'eau apparaissent à sa surface. A cet instant, la phase liquide (et /ou solide) est en équilibre avec la vapeur d'eau que renferme l'air. On mesure la température de rosée et on déduit le taux d'humidité.

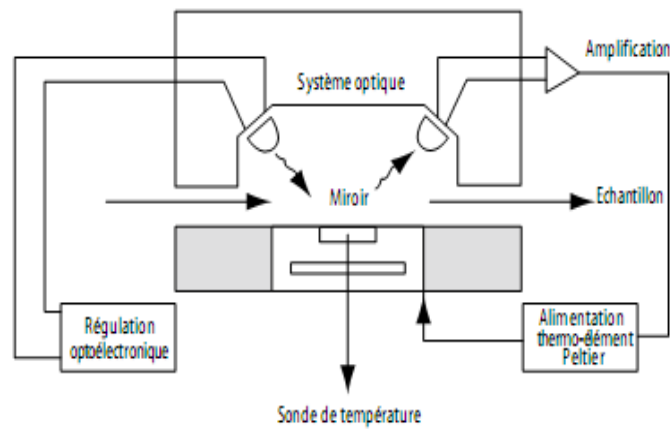


Figure (III.5): Hygromètre à condensation [19].

d) Hygromètre capacitif :

L'élément sensible dans ce type d'hygromètre est un condensateur dont on mesure les variations de capacité en fonction de l'humidité ambiante. Une sonde d'humidité est constituée d'un circuit oscillant (pré-conditionneur du capteur) relié à un condensateur qui constitue la cellule de mesure. Ce condensateur dont le diélectrique est constitué d'une substance hygroscopique de quelques millimètres constitue l'élément sensible de la cellule de mesure.

Cette substance sensible, un film de polymère hygroscopique, absorbe les molécules d'eau de l'air ambiant jusqu'à atteindre l'équilibre avec la vapeur d'eau qu'il contient. On observe une variation de la constante diélectrique du polymère, et donc une variation de la capacité du condensateur. Le circuit oscillant lui, permet d'obtenir une fréquence précise, fonction de la capacité du condensateur. Cette fréquence est transformée par la partie pré-conditionneuse du capteur en un courant électrique ou en une tension qui varie linéairement en fonction de l'humidité relative.

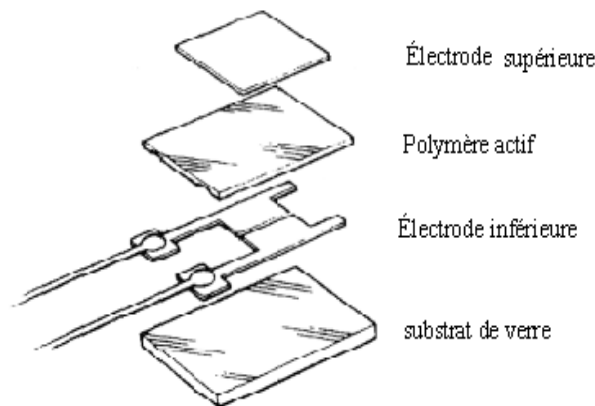


Figure (III.6) : Schéma de principe d'un hygromètre capacitif [19].

e) Capteurs gravimétriques :

Le principe de transduction repose sur la variation de masse d'une couche sensible exposée à une variation du taux d'humidité. Ces capteurs utilisent généralement une microbalance à quartz pour détecter la variation de masse. La mesure est alors effectuée en mesurant la variation de fréquence de résonance du quartz, matériau piézorésistif, excité par un signal électrique [18].

III.2.4 La vitesse du vent :

Le vent est un déplacement d'air horizontal dû à des différences de pression entre les points de la surface de la terre. L'air se déplace de la haute pression vers la basse pression. La vitesse du vent se mesure en Kilomètres par heure (Km /h) ou mètre par seconde (m/s). Pour mesurer la vitesse du vent on peut utiliser un anémomètre à fil chaud, à coupelles ou à ultrasons.

a) Anémomètre à fil chaud :

Les anémomètres à fil chaud enregistrent la vitesse du vent en comparant chaque minute les écarts de température existant entre les fils chauds placés du côté du vent et ceux placés à l'abri du vent.

L'intérêt de ces anémomètres réside surtout dans leur très large domaine de mesure (de quelques centimètres par seconde à 100 m.ms^{-1}) et dans leur très faible inertie (réponse inférieure à 1s). Ils ne sont pas utilisés pour des mesures de réseau [7].

b) Anémomètre à coupelles :

Ce type d'anémomètre est muni d'un rotor de trois coupelles. Lorsqu'il est placé dans le vent, le rotor est mis en mouvement, la vitesse de rotation est alors proportionnelle à la vitesse du vent. La constante de proportionnalité est la distance entre l'axe de rotation et le centre d'une coupelle exprimé en m.

Plus la vitesse de l'air est élevée, plus la rotation du moulinet est rapide.

c) Anémomètre à ultrasons :

Il utilise le principe de mesure de la vitesse de propagation du son dans l'air, cette vitesse dépend de la température de l'air et de la composante longitudinale du vent dans la direction considérée.

Trois couples d'émetteur/récepteur sont placés dans les directions orthogonales et mesurent chacun une composante du vent.

Alternativement, l'onde sonore est envoyée dans un sens et en sens opposé, en inversant l'émetteur et le récepteur. Cela permet, par soustraction de s'affranchir de l'influence de la température sur la vitesse du son.

III.2.5. Direction du vent :

On utilise la girouette qui permet le repérage de l'angle que fait la direction d'où vient le vent avec la direction du nord géographique ; cet angle compté dans le sens des aiguilles d'une montre, est exprimé en degrés, mais chiffré en dizaines de degrés.

III.2.6. Les précipitations :

La pluviométrie étudie la répartition des précipitations dans le temps. Le plus souvent, il s'agit de précipitations d'eau à l'état liquide (la pluie), mais il peut s'agir aussi de grêlons, ou de neige. Les précipitations s'expriment en mm. Une chute de pluie de 1 mm sur une surface de 1 m² correspond à un volume de 1 litre d'eau tombé sur cette surface.

a) Pluviomètres à augets basculeurs :

Ces appareils fonctionnent avec un compteur volumétrique à augets basculeurs. Ce capteur possède deux petits récipients identiques accolés pouvant tourner autour d'un axe horizontal. L'eau provenant du cône de réception s'écoule dans l'un d'eux. Lorsqu'il est plein, le système bascule par suite du déplacement de son centre de gravité, assurant la vidange du premier auget et le positionnement du second sous l'orifice du cône.

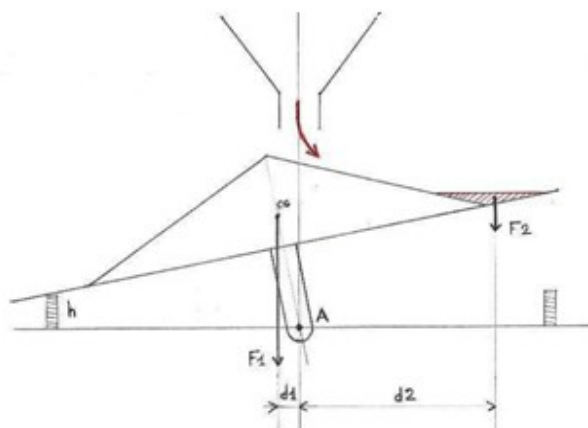


Figure (III.7) : Pluviomètre à augets basculeurs [20].

b) Pluviomètres à mesure de hauteur d'eau :

Ces appareils accumulent l'eau recueillie dans un récipient. Si ce récipient est un tube, un capteur de pression différentielle mesure la hauteur d'eau dans le tube. Un système de siphon ou d'électrovanne permet le vidage du tube.

Ces appareils permettent d'obtenir l'intensité des précipitations avec une meilleure résolution que les pluviomètres à augets basculeurs.

c) Pluviomètres optiques :

Ces appareils comptent le nombre de gouttes passant devant un détecteur optique, avec parfois même une analyse de leur vitesse de chute pour affiner l'estimation de leur taille.

Ils présentent l'avantage de ne pas posséder des pièces mobiles et l'inconvénient de ne pas mesurer directement la quantité d'eau tombée.

Ils sont bien indiqués pour fournir l'intensité de précipitations sur un faible pas de temps (à partir de 10s).

III.2.7 Mesure de l'insolation :**a) Héliographe Campbell-stokes :**

Il est constitué par une sphère de verre de 10 cm de diamètre, qui concentre les rayons solaires sur une bande de carton disposée sur une monture concentrique. Suivant l'intensité du rayonnement solaire reçu, l'image du soleil qui se déplace sur le diagramme provoque une brûlure, un brunissement ou une décoloration. La longueur de la trace sur la bande de carton représente la durée d'insolation. L'énergie nécessaire pour le brûlage est de l'ordre de 120 W/m^2 . [7]

b) Héliographe à fibre optique :

Il se présente sous la forme d'un cylindre dont l'axe est parallèle à l'axe pôle nord- pôle sud. Une fenêtre de verre cylindrique laisse pénétrer le rayonnement solaire direct qui est intercepté par une fibre optique courbée à 90° et animée d'un mouvement de rotation continu autour de l'axe du capteur. Lorsque, lors de sa rotation, la partie libre de fibre optique munie du diaphragme est orientée vers le disque solaire, elle conduit le rayonnement solaire direct intercepté sur un détecteur fixe aligné avec l'autre extrémité de la fibre. [7]

III.3 Capteurs utilisés :

Nous avons utilisé une station météorologique OREGON Scientific. Elle mesure la température extérieure et intérieure, l'humidité relative extérieure et intérieure, la pression atmosphérique, la pluviométrie ainsi que la vitesse et la direction du vent. Couplée à un data logger, elle peut enregistrer ces données sur plusieurs années. Chaque capteur est muni d'une alimentation solaire autonome et d'une antenne pour la transmission des données à la centrale réceptrice.



Figure (III.8) : Station météorologique OREGON Scientific.

Les capteurs utilisés par la station sont les suivants [21]:

- Capteur de température à semi conducteur type LM335 avec une résolution de 0.1 °C.
- Capteur d'humidité capacitif H 100131 avec une résolution de 0.1 %.
- Capteur de pression piézorésistif MPX2200 AP avec une résolution de 1 mbar ou 1 hPa.
- Pluviomètre à augets basculeurs avec comptage photoélectrique indiquant une résolution de 0.1 mm.
- Anémomètre à coupelles pour la vitesse du vent avec une résolution de 0.1 m/s.
- Girouette pour la direction du vent avec une résolution de 1 degré.

III.4 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les principaux capteurs des grandeurs météorologiques pouvant avoir un lien avec l'ensoleillement. Il s'agit de la température, la pression, l'humidité, le vent, la pluviométrie et la durée d'insolation. Les principes de fonctionnement et les caractéristiques des capteurs utilisés dans la station météorologique ont été un peu plus détaillés.

Nous avons exploité la station et son data logger pour enregistrer les paramètres météorologiques toutes les 8 minutes depuis avril 2009 à ce jour. La base de données obtenue sera utilisée dans le chapitre qui suit pour étudier les corrélations avec l'ensoleillement.

Chapitre IV

*Rayonnement solaire et
facteurs météorologiques*

IV.1 Introduction :

La connaissance du rayonnement solaire global est d'une importance fondamentale pour tous les systèmes de conversion de l'énergie solaire. La valeur du rayonnement solaire n'est pas disponible pour de nombreux pays qui ne disposent pas d'équipement de mesure et de techniques intervenant. Par conséquent, il est plutôt important de développer des méthodes pour estimer le rayonnement solaire global en utilisant les paramètres météorologiques disponibles.

IV.2 Base de données utilisée:

Les données de base utilisées dans notre étude sont issues de la station météorologique Oregon Scientific pour les paramètres météorologiques (température ambiante, humidité relative, pression atmosphérique et pluviométrie) et du Data logger TARCOM pour l'éclairement.

Les enregistrements se font toutes les 8 minutes durant toute l'année 2010. Après la suppression des données de la nuit, près de 26000 données sont exploitables.

La durée d'insolation est le temps pendant lequel l'éclairement est supérieur à 120 W/m^2 . Pour la calculer, nous ajoutons 8 minutes à chaque fois que l'éclairement est supérieur à 120 W/m^2 en supposant qu'il garde cette valeur durant tout l'intervalle de 8 minutes.

Ces données ont été converties en valeurs moyennes journalières exprimées en $\text{Wh/m}^2/\text{j}$ pour le rayonnement global, en hPa pour la pression atmosphérique, en $^{\circ}\text{C}$ pour la température ambiante et en % pour l'humidité relative. La pluviométrie en mm est obtenue par la sommation des valeurs de la journée.

Nous avons divisé cette base de données en deux intervalles :

Le premier intervalle contient les valeurs journalières des mois de février, mars, mai, juin, août, septembre, novembre et décembre. Cet intervalle est utilisé pour développer des modèles.

Le deuxième intervalle contient les valeurs journalières des mois de janvier, avril, juillet et octobre, afin d'évaluer les performances des modèles obtenus.

IV.3 Evolutions des données météorologiques :

Sur les figures IV.1, IV.2, IV.3, IV.6 et IV.7 sont représentées les évolutions des moyennes mensuelles de l'irradiation et des paramètres météorologiques (température ambiante, humidité relative, pression atmosphérique et l'insolation) durant l'année 2010.

L'irradiation globale :

La figure (VI. 1) montre que la moyenne mensuelle de l'irradiation globale varie de 2KWh/m²/j pendant le mois décembre à 6,640 kWh/m²/j environ pendant le mois juillet. L'énergie solaire est donc disponible à Bejaïa et durant toute l'année, mais avec des quantités qui dépendent essentiellement de la saison. La moyenne annuelle du rayonnement global durant l'année 2010 est 4,410 kWh/m²/j.

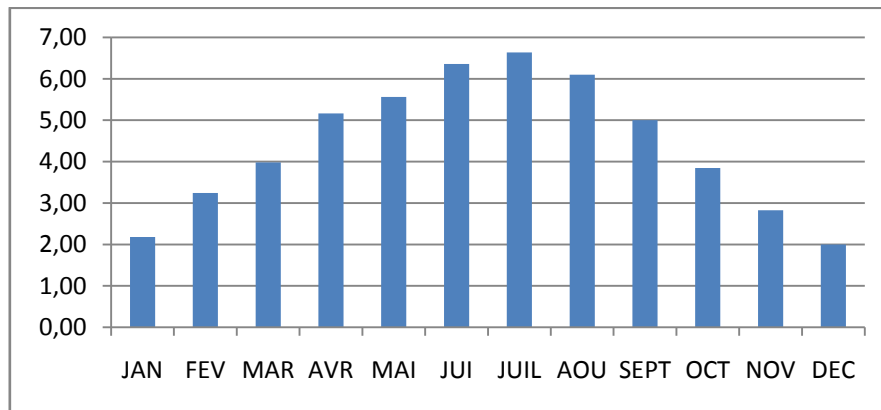


Figure (IV.1) : L'irradiation (kWh/m²/j) durant l'année 2010 à béjaïa.

L'insolation :

L'insolation varie également dans le même sens que l'irradiation globale (figure IV.2). Elle est plus élevée en saison sèche que pendant les autres saisons. En été, le ciel est relativement clair et pendant les autres saisons (automne, hiver et printemps), le ciel devient plus couvert. La moyenne annuelle de l'insolation durant l'année 2010 est 7,84 h (7h et 50min et 4s).

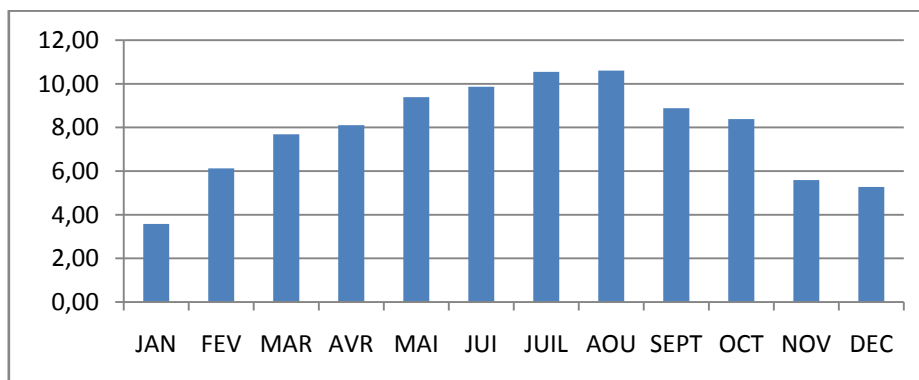


Figure (IV.2) : L'insolation (heures) durant l'année 2010 à béjaïa.

La pression :

La valeur maximale de la pression apparaît en mars, alors que la valeur minimale est en février. Sa moyenne annuelle durant l'année 2010 est 1005,31 hPa. (Figure IV.3)

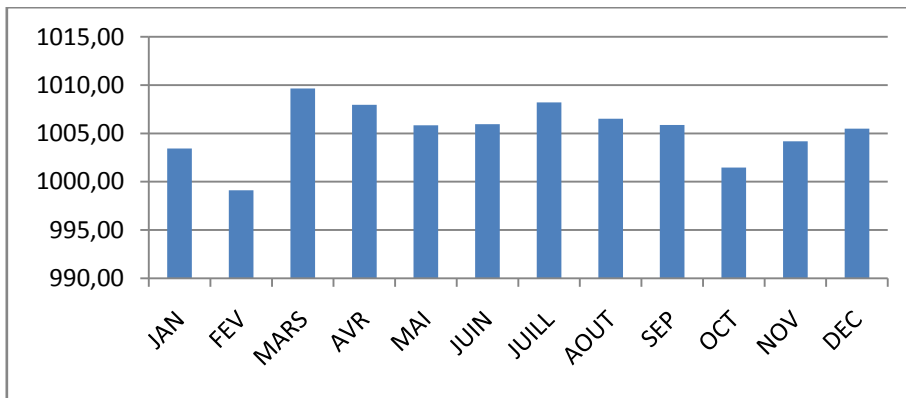


Figure (IV.3) : La pression atmosphérique (hPa) durant l'année 2010 à béjaia.

La figure (IV.4) montre l'évolution de la pression durant le mois de mars 2010. Nous remarquons les périodes de fortes pressions qui correspondent au beau temps et celles de faibles pressions qui annoncent le mauvais temps. Ceci est confirmé par l'évolution de la température et de l'humidité durant ce même mois de mars représentée sur la figure IV.5.

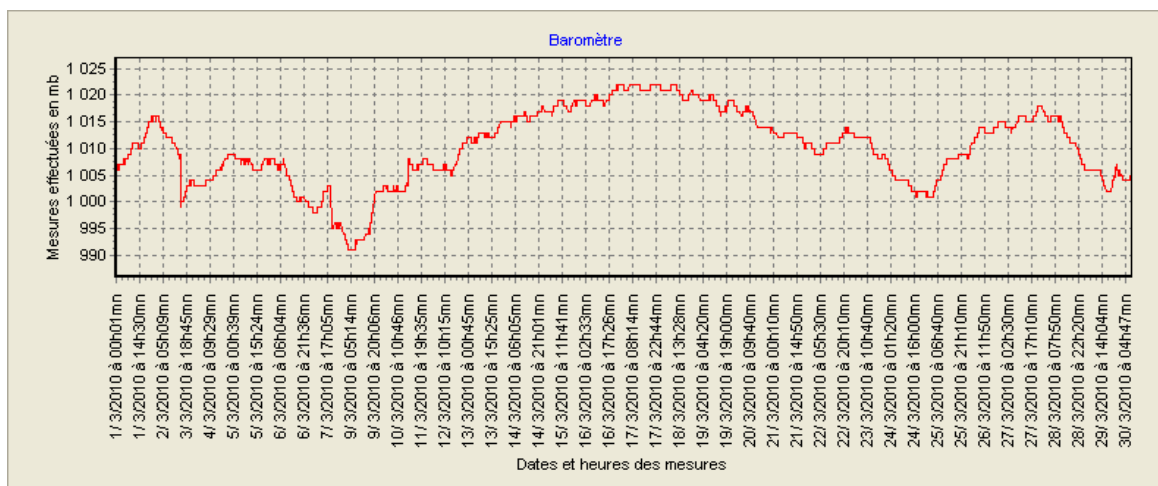


Figure (IV.4) : La pression atmosphérique en mars 2010 .

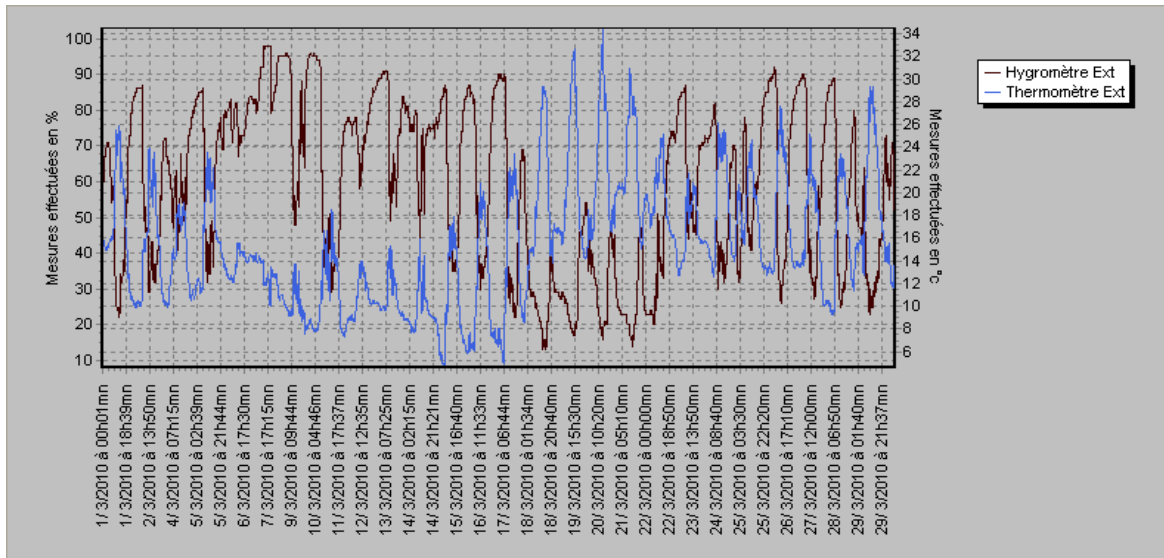


Figure (IV.5) : Variation de la température et de l’humidité relative durant le mois de mars 2010 à béjaïa.

La température :

En 2010, la température a varié de 3 à 44 °C. La valeur maximale des moyennes mensuelles de température apparait en juillet (26,79 °C), pendant que la valeur minimale est en janvier (13.9 °C). La moyenne annuelle de la température durant l’année 2010 est 19,52°C. (Figure IV.6)

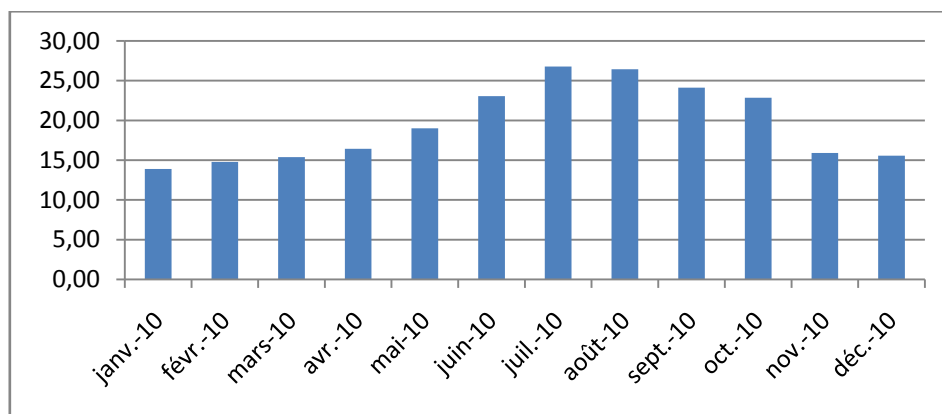


Figure (IV.6): Moyennes mensuelles de la température ambiante (°C) durant l’année 2010 à béjaïa.

L'humidité relative RH (%):

Puisque la ville de Bejaia s'allonge sur la méditerranée, elle est très humide. La moyenne mensuelle la plus faible dépasse 40 % (figure IV.7). Sa moyenne annuelle durant l'année 2010 est 58,57 %. Nous remarquons que l'allure de l'évolution de l'humidité est l'inverse de celle de la température. Ceci est encore plus visible avec les pics des variations journalières sur la figure (IV.5) .

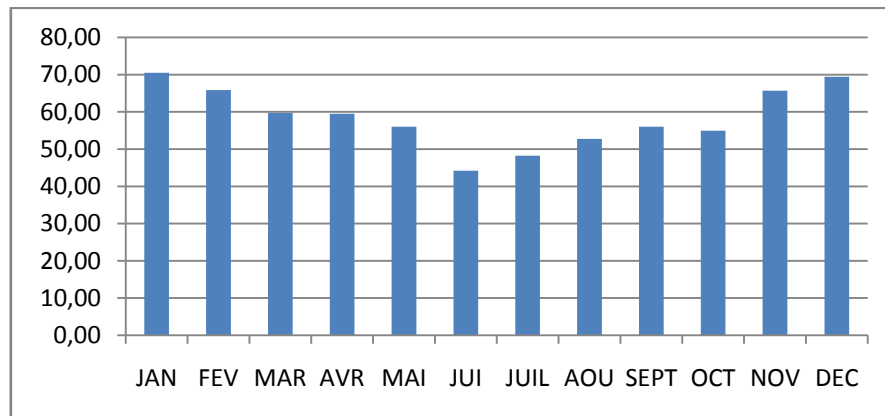


Figure (IV.7) : L'humidité relative (%) durant l'année 2010 à béjaia.

IV.4 Modèle de l'irradiation solaire globale :

Plusieurs modèles empiriques ont été développées par des scientifiques pour calculer le rayonnement solaire global en utilisant divers paramètres. Angstrom [22] a développé le premier modèle qui a été modifié par Prescott [23] en 1940 en utilisant uniquement la durée relative d'ensoleillement et le rayonnement extraterrestre. De nombreux chercheurs [24-25] ont utilisé ce modèle pour établir des corrélations empiriques. D'autres [26-27] ont constaté que les coefficients de régression du modèle sont dépendants du site et ont proposé des coefficients de régression en fonction de certains facteurs géographiques, telles que la latitude, altitude, etc...

En outre, d'autres modèles empiriques ont été développées pour calculer le rayonnement solaire en utilisant non seulement la durée d'ensoleillement, le rayonnement extraterrestre et des paramètres géographiques, mais aussi en utilisant les paramètres météorologiques tels que : modèle de Bristow-Campbell [28], Hargreaves et Al [29] qui ont suggéré des relations en fonction du rayonnement extraterrestre et la différence entre les températures maximales et minimales et le modèle de Maghrabi [30] qui fait intervenir cinq paramètres dont la vapeur d'eau perceptible calculée à partir de la température de rosée.

Des modèles tenant compte des facteurs météorologiques ont été proposés par Bahel [31] et Abdalla [32].

Afin de trouver le modèle adéquat pour le site de Bejaïa, nous avons essayé des modèles à 2, 3, 4 et 5 paramètres.

L'analyse de la régression linéaire multiple des paramètres (S/S₀, T, P, RH, W) utilisés dans les différentes combinaisons, a donné plusieurs relations pour estimer l'irradiation solaire globale. Celles ci ont été traitées et analysées en utilisant un programme Matlab pour obtenir les corrélations et les coefficients de régressions par la méthode des moindres carrés. Les relations ayant le coefficient de corrélation le plus élevé ont été sélectionnés.

Dans le cas d'une seule variable, le coefficient de corrélation le plus élevé a été obtenu pour la relation contenant S/S₀.

$$\frac{H}{H_0} = 8,01589 \cdot 10^{-2} + 0,7092 \frac{S}{S_0} \quad (4.1)$$

$$R = 0,8116$$

H₀ est calculé par la relation 1.4.

L'insolation hors atmosphère S₀ est calculée par la relation 4.2.

$$S_0 = \frac{2 \times \omega_s}{15} \quad (4.2)$$

Avec ω_s donné par l'équation 1.3.

Le coefficient de corrélation R est calculé par l'équation 4.3 [33].

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (H_{i,m} - \overline{H_m})(H_{i,c} - \overline{H_c})}{\{[\sum_{i=1}^N (H_{i,m} - \overline{H_m})^2] [(H_{i,c} - \overline{H_c})^2]\}} \quad (4.3)$$

H_{i, m} est l'irradiation mesurée au jour i ;

H_{i, c} est l'irradiation globale calculé au jour i ;

N : nombre de points de mesure.

Pour les relations avec deux variables le coefficient de corrélation le plus élevé a été obtenu pour la relation contenant S/S₀, RH :

$$\frac{H}{H_0} = 0,558 + 0,5417 \frac{S}{S_0} - 6,546 \cdot 10^{-3} RH \quad (4.4)$$

$$R = 0,8589$$

Pour les relations avec trois variables le coefficient de corrélation le plus élevé a été obtenu pour la relation contenant S/S_0 , RH et T:

$$\frac{H}{H_0} = 0,5289 + 0,459 \frac{S}{S_0} + 4,073 \cdot 10^{-3} T - 6,481 \cdot 10^{-3} RH \quad (4.5)$$

$$R = 0,8942$$

Pour les relations avec quatre variables, le coefficient de corrélation le plus élevé a été obtenu pour la relation contenant S/S_0 , RH, T et P :

$$\frac{H}{H_0} = -0,60835 + 0,44315 \frac{S}{S_0} + 4,081591 \cdot 10^{-3} T - 6,56658 \cdot 10^{-3} RH + 1,1461 \cdot 10^{(-3)} P \quad (4.6)$$

$$R = 0,9042$$

Pour estimer l'irradiation globale à Bejaïa, nous avons élaboré la relation contenant cinq variables (S/S_0 , T, RH, P, W) et constaté que le coefficient de corrélation est le plus élevé

$$\frac{H}{H_0} = -0,6234146 + 0,42067718 \frac{S}{S_0} + 3,84639 \cdot 10^{-3} T - 6,38017 \cdot 10^{-3} RH + 1,1367 \cdot 10^{(-3)} P - 0,74317 W \quad (4.7)$$

$$R = 0,9644$$

Ce dernier modèle à cinq paramètres a été retenu. Nous allons comparer ses performances à quatre modèles de la littérature : Angstrom-Prescott, Bahel, Newland et Abdalla

Le modèle d'Angstrom-Prescott :

C'est le modèle le plus ancien qui est donné comme suit [22-23]:

$$\frac{H}{H_0} = a + b \frac{S}{S_0} \quad (4.8)$$

Avec $a = 8,01589 \cdot 10^{-2}$; $b = 0,7092$

Le modèle de Bahel :

Bahel a développé une corrélation en fonction de l'insolation et de données de rayonnement global de 48 stations à travers le monde, avec diverses conditions météorologiques et une large distribution des cites géographiques :

$$\frac{H}{H_0} = a + b \frac{S}{S_0} + c \left(\frac{S}{S_0} \right)^2 + d \left(\frac{S}{S_0} \right)^3 \quad (4.9)$$

Avec $a = 0,16$; $b = 0,87$; $c = -0,16$; $d = 0,34$.

Le modèle de Newland :

Newland a suggéré une équation qui comprend un terme logarithmique.

$$\frac{H}{H_0} = a + b \frac{S}{S_0} + c \log_{10} \left(\frac{S}{S_0} \right) \quad (4.10)$$

Avec $a = 0,34$; $b = -0,4$; $c = 0,17$

Le modèle d'Abdalla:

Abdalla a modifié le modèle de Gopinathan pour Bahreïn et obtient :

$$\frac{H}{H_0} = a + b \frac{S}{S_0} + cT + dRH \quad (4.11)$$

Avec $a = 0,5289$; $b = 0,459$; $c = 4,073 \cdot 10^{-3}$; $d = -6,481 \cdot 10^{-3}$

IV.5 Les critères de performance :

Une simple analyse visuelle des résultats d'une simulation n'est pas une évaluation objective du modèle. En effet, l'œil humain n'est pas capable de voir toutes les différences qui peuvent exister entre deux courbes d'allure générale similaire. Ainsi nous avons besoin de nous doter de critères objectifs pour comparer les simulations aux observations.

Plusieurs critères objectifs mathématiques existent pour quantifier les écarts entre les observations et la simulation.

RMSE : Root Mean Square Error

La mesure de la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) est un critère souvent utilisé pour mesurer l'écart entre l'observation et la simulation en donnant notamment une idée de la dispersion entre les deux. Plus elle sera faible et plus l'écart entre les observations et la simulation sera faible [34].

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (H_{i,m} - H_{i,c})^2}{N}} \quad (4.12)$$

Tel que : $H_{i,m}$ est l'irradiation mesuré au jour i ;

$H_{i,c}$ est l'irradiation globale calculé au jour i ;

N : nombre de points de mesure.

MBE : Mean Bias Error

L'erreur de tendance moyenne (MBE) permet de mesurer la tendance du modèle à sous-estimer ou surestimer les observations. [31].

$$\text{MBE} = \left(\frac{\sum_{i=1}^N H_{i,m} - H_{i,c}}{N} \right) \quad (4.13)$$

Un MBE positif représente une sous estimation, alors qu'un MBE négatif montre une surestimation.

MPE : Mean Percentage Error [30] :

C'est l'écart relatif en pourcent entre les grandeurs calculées et mesurées.

$$\text{MPE} = \frac{\left[\sum_{i=1}^N \left(\frac{H_{i,m} - H_{i,c}}{H_{i,m}} \times 100 \right) \right]}{N} \quad (4.14)$$

IV.6 Résultats et discussion :

Le tableau (IV.1) résume les indicateurs statistiques de précision MBE, RMSE, MPE et les coefficients de corrélations pour chaque modèle:

Tableau (IV.1) : Valeurs des critères de performances MBE, RMSE, MPE et R pour les différents modèles

Modèles	MBE (MJ/m ² /j)	RMSE (MJ/m ² /j)	MPE (%)	R
d'Angstrom-Prescott	15.6175	16.5420	96.0632	0.8116
Bahel	-6.5103	7.6889	-53.2415	0.8556
Newland	16,7160	18,5387	88,8711	-0,5007
Abdalla	-14.3993	15.4016	-93.1935	0,8942
Modèle proposé	0,1722	2,0317	2,1198	0,9644

Le tableau (IV.1), montre que les valeurs des coefficients de corrélations augmentent avec le nombre de paramètres qui sont pris en compte dans les modèles, tandis que les valeurs du MBE, RMSE et MPE diminuent.

Le modèle que nous avons élaboré et donné à l'équation (4.7) présente les meilleurs résultats par rapport aux autres modèles de littératures.

Le modèle proposé possède une erreur relative en valeur absolue de 2,1198 %, ce qui indique un très bon accord entre les données mesurées et celles calculées. Cette erreur est acceptable du point de vue technique.

Les figures IV.8 à IV.12 représentent les comparaisons entre les irradiances globales mesurées et celles calculées pour les différents modèles.

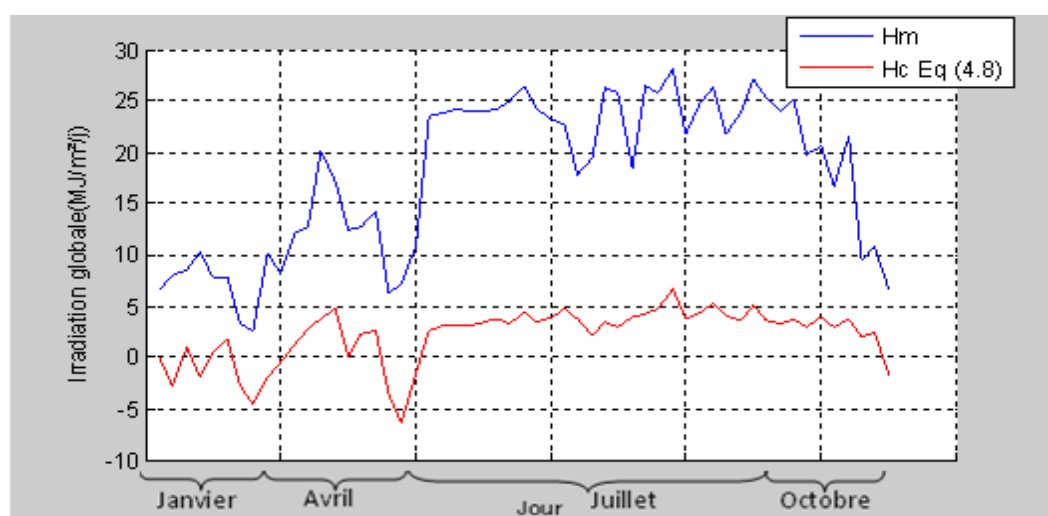


Figure (IV.8) : Comparaison de l'irradiation mesurée et estimée par le modèle d'Angstrom-Prescott.

D'après la figure (IV.8), on constate que le modèle d'Angstrom-Prescott sous-estime l'irradiation globale durant tout les mois (janvier, avril, juillet et octobre), dont l'erreur atteint 96.0632 %.

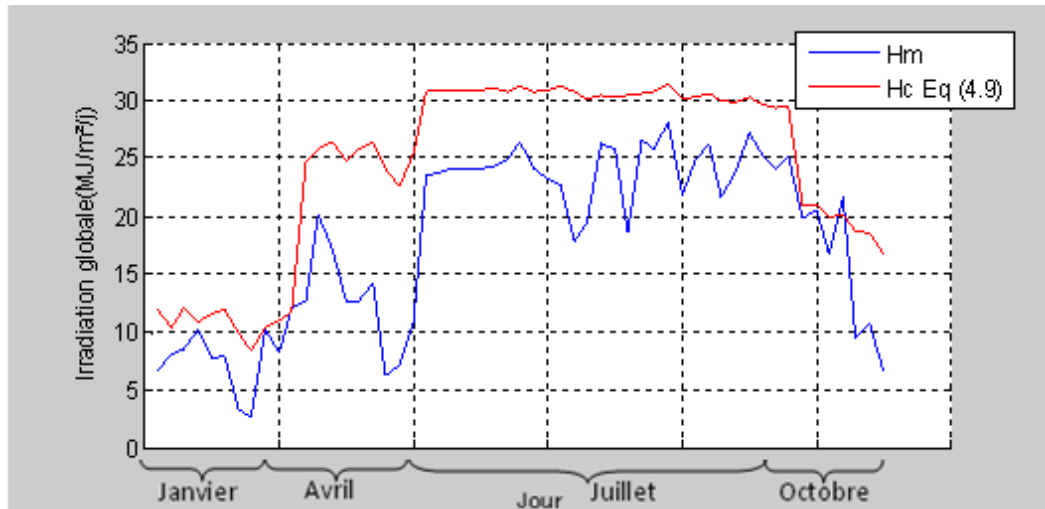


Figure (IV.9) : Comparaison d'irradiations mesurée et estimée par le modèle de Bahel.

D'après la figure (IV.9), on remarque que le modèle de Bahel surestime l'irradiation globale.

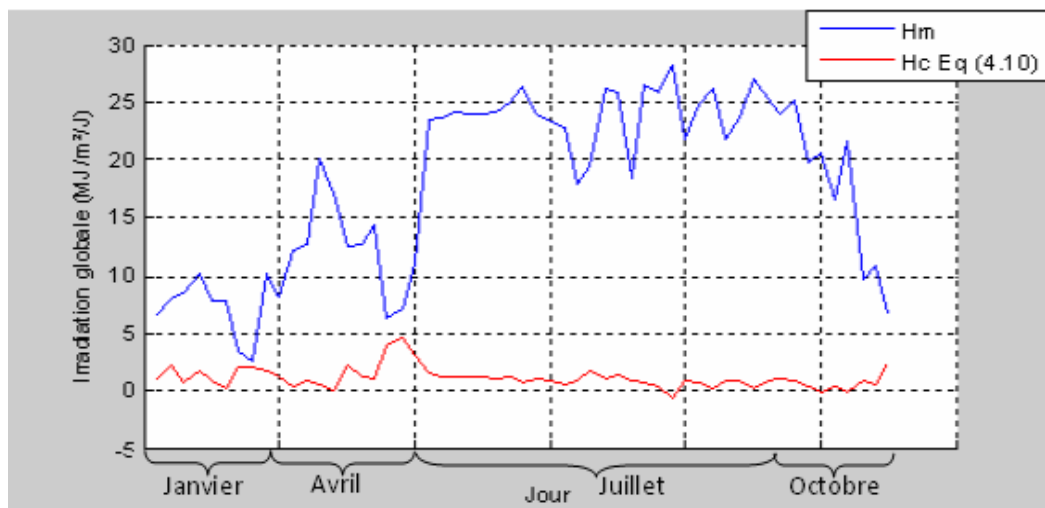


Figure (IV.10) : Comparaison d'irradiations mesurée et estimée par le modèle de Newland.

D'après la figure (IV.10) nous constatons que le modèle de Newland sous-estime l'irradiation globale durant tout les mois (janvier, avril, juillet et octobre), dont l'erreur atteint 88,8711%.

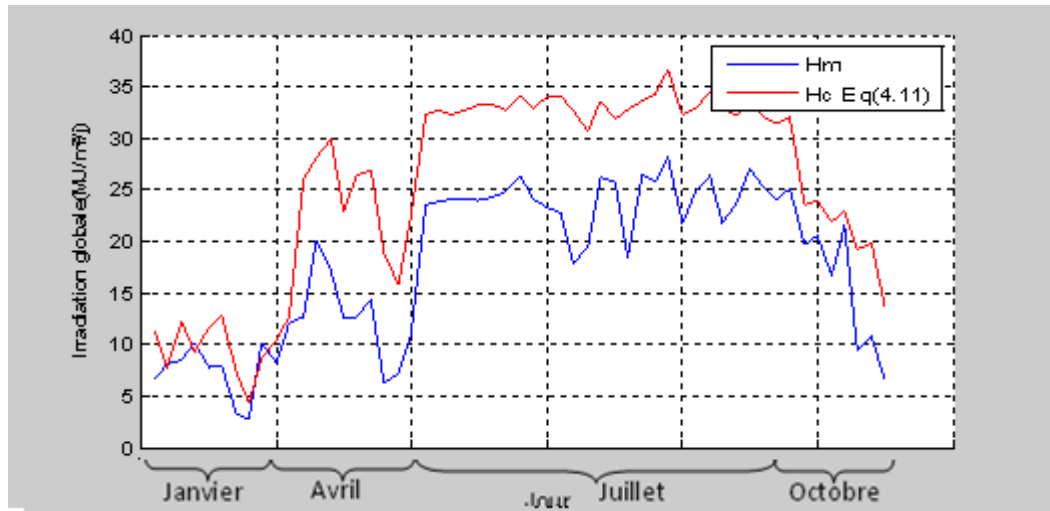


Figure (IV.11) : Comparaison d’irradiations mesurée et estimée par le modèle d’Abdalla.

Nous constatons d’après la figure (IV.11) que ce modèle surestime l’irradiation globale au moins juillet et avril et il est en bonne concordance avec les valeurs mesurées aux autres mois. Ce modèle utilise comme paramètres d’entrées, la température, l’humidité relative et l’insolation.

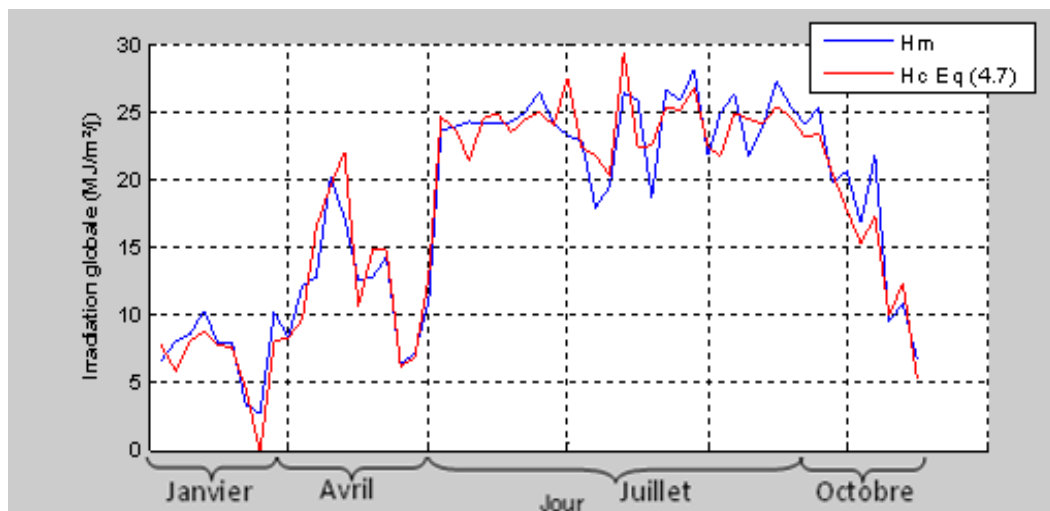


Figure (IV.12) : Comparaison d’irradiations mesurée et estimée par notre modèle proposé.

Nous constatons que ce modèle est en très bonne concordance avec les valeurs réellement mesurées, durant tous les mois. L’écart maximal est assez réduit, il est de -2,1198 %.

IV.7 Conclusion :

Après avoir confronté les valeurs mesurées et celles estimées par les modèles de la littérature et celui proposé, nous avons constaté que ce dernier, conduit à des résultats meilleurs. Ceci s'explique par le fait, que ce modèle tient compte de cinq paramètres météorologiques (humidité relative, température ambiante, durée d'insolation, pression atmosphérique et pluviométrie).

Les résultats ont montré que nous pouvons estimer de façon relativement précise le rayonnement global à Bejaia avec ce modèle.

Conclusion

générale

Conclusion générale

L'objectif de ce travail était l'étude de l'influence des paramètres météorologique sur le l'irradiation solaire à Bejaia.

Quelques notions sur le rayonnement solaire et les différents paramètres intervenant dans les calculs ont été passés en revue. Le principe de fonctionnement d'une cellule PV, les technologies de fabrication utilisées ainsi que la constitution du générateur photovoltaïque ont été abordés.

Un modèle électrique du panneau photovoltaïque Tenesol TE 1300 a été élaboré. Ses caractéristiques courant-tension et puissance-tension ont été simulées dans l'environnement Matlab/Simulink. La comparaison de ces résultats aux mesures effectuées au laboratoire de Génie Electrique a montré une parfaite similitude ce qui a permis la validation du modèle à une diode. L'influence de la température et de l'éclairement sur le rendement du panneau solaire a été mise en évidence expérimentalement et par simulation.

Une station météorologique Oregon scientific munie d'un data logger a été utilisée pour enregistrer les paramètres météorologiques toutes les 8 minutes depuis avril 2009. Les principes et les caractéristiques des capteurs utilisés ont été présentés.

La base de données obtenue est complétée par l'enregistrement, aux mêmes instants, de l'ensoleillement à l'aide d'un capteur solaire connecté à un deuxième data logger.

Par des corrélations régressions multiples, les données ont été exploitées pour développer plusieurs relations calculant l'irradiation solaire globale en fonction des paramètres météorologiques. La performance de chaque modèle est estimée par le coefficient de corrélation.

Le modèle qui prend en compte cinq paramètres météorologiques (température ambiante, humidité relative, pression atmosphérique, pluviométrie et insolation) conduit à de meilleurs résultats. Le coefficient de corrélation est proche de 1 ($R=0,9644$). La comparaison avec les résultats de mesures donne des écarts assez faibles ($MBE = 0,1722 \text{ MJ/m}^2/\text{j}$, $RMSE = 2,0317 \text{ MJ/m}^2/\text{j}$ et erreur relative de $2,1198\%$). En comparaison avec d'autres modèles de la littérature, le modèle proposé donne des écarts minimaux et un coefficient de corrélation maximal, ce qui démontre les performances de ce modèle.

L'irradiation solaire globale estimée peut être utilisée dans la conception et l'estimation des performances des applications solaires à Bejaia ainsi que dans l'optimisation des dimensionnements d'installations solaires.

En perspective, il serait intéressant d'utiliser les techniques d'intelligence artificielle (réseaux de neurones ou algorithmes génétiques) pour mieux optimiser le modèle de variation de l'irradiation solaire globale en fonction des paramètres météorologiques et d'autres paramètres comme le dépôt de pollution.

Bibliographie

- [1] C.P.de Brichaumbaut & C. Vauge, « Le gisement solaire », Lavoisier, Tech. & Doc, Paris, 1982.
- [2] J. Bernard, «Energie solaire : Calculs et optimisation», Edition ellipses, 2004.
- [3] A. Duffie & JW.Beckman, « Solar Engineering of Thermal Processes», Inc, 1991.
- [4] M. Khaled, « Conception et réalisation d'un concentrateur sphérique », mémoire de magister, université de Constantine, 2008.
- [5] R.P. Mukund, « Wind and solar Power Systems », Ph.D,P.E .U.S Merchant Marine Academy, Kings Point, New York, CRC Press LLC 1999.
- [6] MTY .Tadros, « Uses of sunshine duration to estimate the global solar radiation over eight meteorological stations in Egypt», Renew. Energy, vol. 21, Octobre 2000, pp. 231-246.
- [7] M. LEROY & P. Grégoire, « Mesure en météorologie », Technique de l'ingénieur, traité Mesure et Contrôle, Septembre 2005, R 3050.
- [8] M. Dahbi, « Etude et optimisation d'une installation Hybride PV-Eolienne Autonome», mémoire de magister, option physique énergétique ,2007.
- [9] F. Lasnier & T.G. Ang, «Photovoltaic Engineering Handbook», IOP Publishing Ltd. 1980.
- [10] O. Nichiporuk, « Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités », thèse de doctorat, institut national des sciences appliquées de Lyon, 2005.
- [11] Y. Pankow, « Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau Basse Tension. Application au générateur photovoltaïque », thèse de doctorat, Ecole nationale supérieur des arts et métiers, France, Décembre 2004.
- [12] H. Mathieu, « Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques », 5eme édition, Dunod, 2001.
- [13] S. Berrah, « Etude des propriétés structurales, électroniques et optiques des alliages quaternaires AlGaInN et InGaAsN », thèse de doctorat, université de sidi bel Abbes, 2006.
- [14] O. Gergaud, B. Multon & H. Ben Ahmed, «Analysis and experimental validation of various photovoltaic system models», 7th International ELECTRIMACS Congress, Montréal, 2002.

- [15] B. Hamza, « Etude et modélisation d'un système photovoltaïque », mémoire de magister, université de Sidi bel Abbes, 2009.
- [16] J. Wilson, « Pressure Measurement: Principles and Practice », <http://www.sensormag.com/articles/0103/19/main.shtml> , 2010.
- [17] N.T.T. Ha, D.K. An, P.V. Phong, P.T.M. Hoa, L.H. Mai, «Study and performance of humidity sensor based on the mechanical-optoelectronic principle for the measurement and control of humidity in storehouses», Sensors and actuators B, Vol. 66, Iss, 2000,pp.1-3, 200-202.
- [18] R. Forke, D. Scheibner, K. Hiller, T. Gessner, W. Dötzel & J. Mehner , «Fabrication and characterization of a force coupled sensor–actuator system for adjustable resonant low frequency vibration detection», Vol. 145-146, pp . 245-256. 2008.
- [19] Z. Zhao, M. Knight, S. Kumar, E. T. Eisenbraun & M. A. Carpenter, «Humidity effects on Pd/Au-based all-optical hydrogen sensors» , Sensors and Actuators B, Vol. 129, Iss. 2, pp.726-733. 2008.
- [20] Asch Georges, « les capteurs en instrumentation industrielle », 5ème édition Dunod, 1999.
- [21] R. Alkama, B. Metidji, R. Zeblah & W. Tahi, « Performances d'une mini station météorologique embarquée ». Embeded Syst. Conf ESC09, EMP Alger, mai 2009.
- [22] A. Angstrom, « Solar and terrestrial radiation », Quart J Roy Meteor.Soc, 1924, pp.121–126.
- [23] JA. Prescott, « Evaporation from a water surface in relation to solar radiation », Trans Roy Soc Austr, Vol. 64, 1940, pp.114–118.
- [24] H. Bulut, O. Bu`yu` kalaca, «Simple model for the generation of daily global solar-radiation data in Turkey», Applied Energy 84 (2007) 477–491.
- [25] MR. Rietveld, « A new method for estimating the regression coefficients in the formula relating solar radiation to sunshine », Agric Meteorol, Vol. 19, 1978, pp.243.
- [26] M. Chegaar, A. Cibani, «Global solar radiation estimation in Algeria», Energy Conversion and Management 42 (2001), pp. 967-973.

- [27] K. Skeiker «Correlation of global solar radiation with common geographical meteorological parameters for Damascus province, Syria», *Energy Conversion and Management* 47 (2006) pp. 331–345.
- [28] K .Bristow & G .Campbell, « On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature », *Agric Forest Meteorol*, Vol. 31,1984; pp. 159–166.
- [29] GL. Hargreaves, GH .Hargreaves & P .Riley, « Irrigation water requirement for the Senegal River Basin », *J Irrigat Drain Eng ASCE*111, 1985, pp.111-124.
- [30] A.H. Maghrabi, « Parameterization of a simple model to estimate monthly global solar radiation based on meteorological variables, and evaluation of existing solar radiation models for Tabouk, Saudi Arabia », *Energy Conversion and Management*,Vol. 50, 2009, pp. 2754–2760.
- [31] V .Bahel, H .Bakhsh & R. Srinivasan, « A correlation for estimation of global solar radiation », *Energy*, Vol. 12, 1987, pp.131–135.
- [32] YAG. Abdalla, « New correlation of global solar radiation with meteorological parameters for Bahrain », *Int. J .Solar Energy* Vol.16, 1994; pp.111–120.
- [33] A.A. El-Sebaia & A.A. Trabea, « Estimation of horizontal diffuse solar radiation in Egypt », *Energy Conversion and Management*, Vol. 44, 2003, pp. 2471–2482.
- [34] J.A.Duffie & W.A.Beckman, « Solar engineering of thermal processes », 2nd edition, John Wiley & Sons, Inc, N

Résumé : Toute étude ou application de l'énergie solaire sur un site donné nécessite une connaissance complète de l'ensoleillement du site.

Dans le présent travail, nous avons modélisé, dans le l'environnement Matlab/Simulink, un panneau photovoltaïque (Tenesol TE 1300, 125 W, 12 V). Nous avons comparé les résultats obtenus par simulation aux mesures effectuées au laboratoire de génie électrique et remarqué une parfaite similitude, ce qui a permis la validation du modèle. Nous avons analysé le fonctionnement du module photovoltaïque et ses caractéristiques électriques (tension, courant, puissance) en fonction de l'éclairement et de la température ambiante. Les résultats expérimentaux sont analogues à ceux obtenus par simulation.

Dans le but de modéliser l'irradiation solaire globale en fonction des paramètres météorologiques pour le site de Bejaïa, nous avons constitué une base de données dépassant 26000 points obtenus par des enregistrements toutes les huit minutes de l'éclairement et des paramètres météorologiques (température, pression, humidité relative de l'air et pluviométrie). Les moyennes journalières ont été utilisées pour essayer des modèles à 2, 3, 4 et 5 paramètres et la relation ayant le coefficient de corrélation le plus élevé a été retenue. Deux tiers ont été utilisés pour l'établissement du modèle et un tiers pour sa validation. Nous avons ensuite comparé ses performances à quatre modèles de la littérature par le calcul des différents écarts usuels.

Abstract: Any study or application of solar energy at a given site requires a complete knowledge of the solar site.

In this work, we have modeled in the Matlab / Simulink, a photovoltaic panel (TM Tenesol 1300, 125 W, 12 V). We compared the simulation results with measurements made in electrical engineering laboratory and noticed a perfect likeness, which validate the model. We analyzed the operation of the photovoltaic module and its electrical characteristics (voltage, current, power) as a function of illumination and ambient temperature. The experimental results are similar to those obtained by simulation.

In order to model the global solar radiation based on meteorological parameters for the Bejaia site, we established a database of more than 26,000 points obtained by recording every eight minutes of illumination and meteorological parameters (temperature, pressure, relative humidity and rainfall). The daily averages were used to test models with 2, 3, 4 and 5 parameters and the relationship with the coefficient of the highest correlation was chosen. Two thirds were used to establish the model and one third for validation. We compared its performance with four models in the literature by calculating the various usual errors.