

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA - BOUMERDES
FACULTE DES HYDROCARBURES ET DE LA CHIMIE



Département : Automatisation et Electrification des Procédés Industriels
LABORATOIRE D'AUTOMATIQUE APPLIQUEE ET DE TRAITEMENT DU SIGNAL

MEMOIRE

Présenté par :

M^{me}. MILOUDI Lalia

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE

MAGISTER EN GENIE ELECTRIQUE

Option : *Automatique Appliquée et Traitement du Signal*

THEME

**ETUDE ET SIMULATION DE LA POURSUITE DE LA TRAJECTOIRE
DU SOLEIL PAR UN PANNEAU SOLAIRE PHOTOVOLTAIQUE**

Soutenu publiquement le 11/Janvier/2012 devant le jury :

Pr MOHAMMEDI Kamal	Professeur (UMBB)	Président
Dr ACHELI Dalila	Maître de Conférences A (UMBB)	Rapporteur
Dr BENATILLAH Ali	Maître de Conférences A (U.ADRAR)	Examineur
Dr RAHMOUNE Fayçal	Maître de Conférences A (UMBB)	Examineur
Dr KIDOUCHE Madjid	Maître de Conférences A (UMBB)	Examineur
Dr KESRAOUI Mohamed	Maître de Conférences B (UMBB)	Examineur

Boumerdès 2011

REMERCIEMENTS

Je commence tout d'abord par remercier **ALLAH** tout puissant pour l'accomplissement de ce mémoire de Magister.

Je tiens à présenter ma profonde gratitude à Mme Acheli Dalila Maître de conférences A à l'UMBB, d'avoir proposé un sujet de recherche d'actualité très intéressant, pour sa patience et son soutien. Sans oublier M. Chaib Ahmed Maître de conférences B à l'UMBB pour son suivi et sa disponibilité. Je voudrais également remercier M. Kesraoui Mohamed Maître de conférences B à l'UMBB pour ses précieux conseils.

Je souhaite également remercier mon mari M. Benbrik Abderrahmane Professeur à l'UMBB pour m'avoir procuré la documentation nécessaire à cette étude.

Je désire remercier tous mes enseignants du département automatisation et en particulier M. Zelmat Mimoun Professeur à l'UMBB et responsable de la post-graduation.

Je tiens à remercier Mr Mekkara Amar.

J'adresse ma vive reconnaissance à tous les membres du jury. Le jury présidé par M Mohammedi Kamal Professeur à l'UMBB qui n'a jamais hésité à répondre présent à chaque fois que nous avons sollicité son aide.

Mes profonds remerciements vont à toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce mémoire de Magister.

ملخص

استغلال الطاقات المتجددة في الجزائر تعرف تطورات هامّة بحيث نوجه هذه الدراسة في تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية بواسطة الصفيحة كهروضوئية، بحيث هذه الأخيرة يكون إنتاجها أقصى وهي أن تبقى عمودية بالنسبة إلى الأشعة الشمسية.

هذه الصفيحة تركز على محورين للدوران لهذا أنجزنا برنامج متابعة مسار الشمس على طول اليوم و الهدف من هذه الدراسة:
في البداية:

تعريف مبدأ تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهروضوئية
ثانياً:

التأثير المناخي والموقع الجغرافي على الطاقة الشمسية
ثالثاً:

ننتقي كل الصيغ التي تمكننا من حساب برنامج المسار الشمسي و إنتاج الصفيحة

كلمات مفتاحية: الصفيحة ، كهروضوئية ، طاقة شمسية.

Résumé

L'exploitation des énergies renouvelables en Algérie est un grand axe de recherche qui connaît de considérables développements cette dernière décennie. Nous nous intéressons dans cette étude à la conversion de l'énergie solaire électromagnétique (rayonnement) en énergie électrique qui est la conversion photovoltaïque. Nous désirons au moyen d'un module PV obtenir un rendement maximal et ce de le maintenir perpendiculaire aux rayons solaires, mobile suivant deux axes de rotation (l'azimut et l'inclinaison) :

Pour ce faire nous avons réalisé un programme de poursuite de la trajectoire du soleil le long de la journée sous le logiciel Matlab. Dans l'objectif de cette étude nous avons :

- En premier lieu défini le principe de la conversion photovoltaïque
- En deuxième étape l'influence des conditions géographiques et météorologiques sur le rayonnement solaire
- En dernier nous avons sélectionné l'ensemble des formules qui nous permettent de réaliser le programme de calcul de la trajectoire solaire et de repérer la hauteur et l'azimut du soleil, le flux solaire et ses différents composants ainsi que la caractéristique courant –tension et le rendement du module photovoltaïque.

Mots clé : Azimut, photovoltaïque, irradiation, rendement.

Abstract

The exploitation of renewable energies in Algeria is a large research orientation of considerable developments this last decade. We are interested in this study in the electromagnetic solar energy transformation (radiation) into electric power which is photovoltaic conversion. We wish by means of statement pannel to obtain an output maximum and to maintain it perpendicular to the solar rays.

The pannel solar is mobile along two axes of rotation (the azimuth and the tilt angle), for that we carried the programme of tracking the trajectory of the sun along the day. In the objective of this study we have:

- Initially define the principle of photovoltaic conversion
- In second stage the influence of the geographical and weather conditions on the solar radiation are presented
- Finally, we selected formulas which enable us to carry out the calculation programme of the solar trajectory and the photovoltaic pannel efficiency.

Key words: Azimuth, photovoltaic, radiation.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	3
-----------------------------------	----------

CHAPITRE I. PRESENTATION DES SYSTEMES PHOTOVOLTAIQUES ET ETAT DE L'ART

Introduction.....	7
I.1 Généralités.....	8
I.2 Principe de fonctionnement.....	10
I.3 Etat de l'art des travaux de recherches antérieurs.....	11
1.3.1 Les cellules	11
1.3.2 Les batteries	13
1.3.3 Les régulateurs.....	14
I.4 Synthèse des travaux de recherches.....	15
I.5 Objectif des études.....	17
Conclusion.....	17

CHAPITRE II. LA CONVERSION PHOTOVOLTAIQUE

Introduction.....	19
II.1 Le matériau.....	19
II.2 La Photopile.....	20
II.3 l'Effet Photovoltaïque	20
II.3.1 La collecte du courant.....	20
II.4 Schéma Equivalent d'une cellule Photovoltaïque.....	21
II.4.1 La caractéristique Courant-Tension d'une cellule Photovoltaïque	22
II.4.2 Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique (I, V).....	25
II.4.3 Influence de la température sur la caractéristique (I, V).....	27
II.5 Branchements des cellules Photovoltaïques.....	29
II.5.1 Branchement série des cellules.....	29
II.5.2 Branchement parallèle des cellules.....	29
II.5.3 Branchement série –parallèle des cellules.....	31
II.6 Configuration Générale d'un système Photovoltaïque.....	32
II.7 Applications des Systèmes Solaires Photovoltaïques.....	35
Conclusion.....	39

CHAPITRE III. ENSOLEILLEMENT ET METEOROLOGIE

Introduction.....	41
III.1 Référentiels Spatiaux.....	42
III.2 Caractéristiques du rayonnement solaire.....	44
III.3 Différentes Composantes du Rayonnement Solaire.....	45
III.4 Les instruments de mesure du Rayonnement Solaire.....	48
III.5 Spectre Solaire.....	50

Conclusion.....	52
CHAPITRE IV. SIMULATION DE LA TRAJECTOIRE DU SOLEIL	
Introduction.....	54
IV.1 Mouvement apparent du Soleil.....	54
IV.1.1 Heures et temps.....	56
IV.2 Repérage de la position du Soleil.....	57
IV.3 Calcul du Rayonnement Solaire.....	60
IV.3.1 Calcul du Rayonnement Direct	60
IV.3.2 Calcul du Rayonnement Diffus.....	62
IV.3.3 Calcul du Rayonnement Global	63
IV.3.4 Calcul de la Puissance et du Rendement.....	63
IV.4 Algorithme de Calcul de la Puissance d'un module PV	65
IV.5 Tableaux et courbes des résultats de calculs	68
IV.5.1 Résultats obtenus pour le 21 Mars.....	69
IV.5.2 Résultats obtenus pour le 21 Juin.....	74
IV.5.3 Résultats obtenus pour le 1 Août.....	79
IV.5.4 Résultats obtenus pour le 21 Septembre.....	84
IV.5.5 Résultats obtenus pour le 21 Décembre.....	89
IV.6 Résultats et discussions.....	94
CONCLUSION ET GENERALE.....	95
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	98

NOMENCLATURE

a	Azimet, (degré)
h	Hauteur, (degré)
I	Courant (Ampère), [A]
I_{cc}	Courant de court circuit, [A]
I_{co}	Courant de circuit ouvert, [A]
L	Latitude, (degré)
l	longitude, (degré)
V	Tension (Volt), [V]
V_{co}	Tension courant ouvert, [V]
V_{cc}	Tension court circuit, [V]
P_C	Puissance crête (Watt), [W]
P_{max}	Puissance maximale, [W]
FF	Facteur de forme
T	Température, (°C)
F	Flux incident, [W/m ²]
S	Flux direct, [W/m ²]
D	Flux diffus, [W/m ²]
G	Flux global, [W/m ²]

Symboles grecs

β	Inclinaison du module photovoltaïque, (degré)
δ	Déclinaison, (degré)
η	Rendement, (%)
ω	Angle horaire ou (Ω) (degré)

Abréviations

AM	Air Masse
ER	Energies renouvelables
ET	Equation du temps, (minutes)
PV	Photovoltaïque
TL	Constante de trouble de Linke
TS	Temps solaire vrai
IASKS	International Association for Sharing Knowledge and Sustainability

Constantes

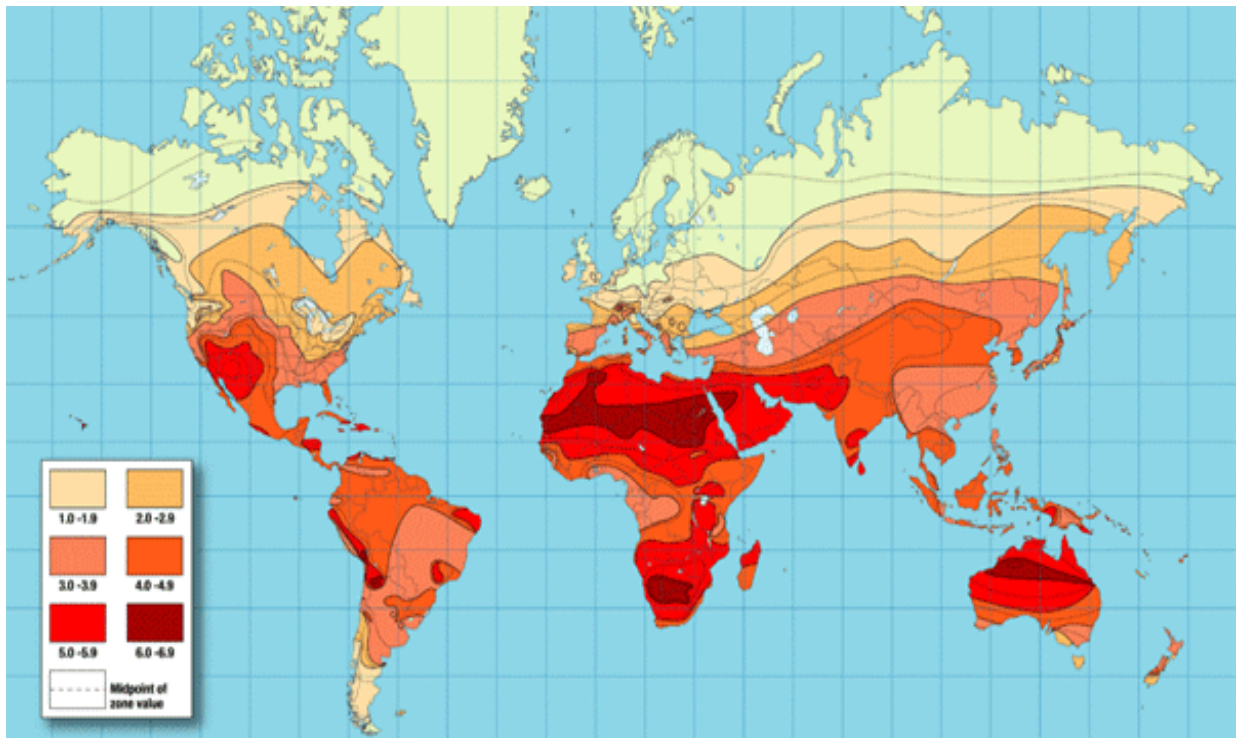
$C = 3 \cdot 10^8$ m/s	Vitesse de propagation de la lumière
$H = 6,62 \cdot 10^{-34}$	Constante de Planck
$K = 1,38 \cdot 10^{-23}$ JK ⁻¹	Constante de Boltzmann
$q = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C	Charge élémentaire

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'Algérie, riche par le pétrole et le gaz sources d'énergie considérables mais aussi un pays très ensoleillé, 3500 heures d'ensoleillement par an, encourage le développement des énergies renouvelables. En effet le 14 juillet 2011 a été inaugurée la première centrale électrique de type hybride, gaz et solaire, à Hassi R'mel avec une puissance de 150 MW, permettant d'économiser 7 millions de mètres cubes de gaz pour d'autres applications et de réduire la quantité des gaz brûlés soit environ 33000 tonnes de CO₂ émis par an. L'Algérie, puissance en matière d'énergie solaire, le potentiel équivaut à huit fois les réserves de gaz [47].

Les lieux privilégiés sur la terre où le rayonnement solaire est important sont l'Afrique du Nord, l'Arabie Saoudite, L'Australie, la côte ouest des Etats –Unis et le Nord du Pérou [15].



Carte Illustrant le Rayonnement Solaire sur la Terre [41]

De nombreux scientifiques et chercheurs ne cessent de développer la technologie pour exploiter d'une façon optimale le rayonnement solaire et le mettre au service de l'être humain. En effet le soleil émet une énergie de 175 milliards de KW par heure [7].

Les objectifs des différentes recherches scientifiques sont de capter les rayons solaires et de les transformer en énergie électrique dont la demande ne cesse de croître dans tous les pays du monde. Et de rendre cette énergie électrique disponible en particulier pour les zones rurales où le réseau de distribution d'énergie électrique ne peut à lui seul couvrir la totalité de la demande des habitants.

Les centres de recherches et de développement des énergies renouvelables et en premier lieu le centre de Bouzaréah et les différentes équipes de recherches dans le monde, ont réalisé de nombreux travaux de recherches. Nous présenterons quelques résumés dans l'état de l'art du premier chapitre.

L'objectif de notre travail est d'étudier l'influence de l'orientation d'un panneau solaire photovoltaïque sur la puissance extraite.

Dans ce mémoire nous présentons les chapitres suivants :

- Dans le premier chapitre nous évoquons l'historique des systèmes photovoltaïques, les descriptions des différents composants et une synthèse des travaux de recherches antérieurs.
- Au deuxième chapitre nous introduisons les principes de la conversion photovoltaïque et les diverses applications développées jusqu'à aujourd'hui.
- Dans le troisième chapitre nous exposons les notions de météorologie et d'ensoleillement et en particulier les différents composants du rayonnement solaire.

- Dans le quatrième chapitre nous sélectionnons les équations théoriques décrivant le mouvement apparent du soleil, et nous présentons l'algorithme permettant de définir la position du soleil (angles : azimut et altitude) à des heures choisies de la journée pour pouvoir déterminer le rayonnement solaire, les caractéristiques courant-tension et la puissance du panneau photovoltaïque pour chaque cas étudié. Nous proposons d'étudier trois positions du panneau :
 - Panneau perpendiculaire (position normal)
 - Panneau incliné (position fixe)
 - Panneau horizontal

Nous enchaînons notre étude par la présentation des résultats et courbes obtenus ainsi que leur interprétation.

Nous achevons ce mémoire par une conclusion générale sur l'étude réalisée et nous présentons des perspectives à notre travail.

CHAPITRE I

PRESENTATION DES SYSTEMES PHOTOVOLTAIQUES ET ETAT DE L'ART

CHAPITRE I

PRESENTATION DES SYSTEMES PHOTOVOLTAIQUES ET ETAT DE L'ART

L'être humain a pu exploiter de nombreuses richesses terrestres tels que le pétrole, le gaz, le fer, l'or, mais n'a pu jusqu'à aujourd'hui exploiter l'énergie de la plus grande étoile de l'univers qui est le soleil. Cet énorme gisement émet une énergie de 175 milliards de kw/h. Depuis les siècles derniers des recherches ont été entamées pour transformer les rayons solaires en énergie électrique de type continu directement utilisable. Cette opération est appelée la **conversion photovoltaïque**, elle a été découverte en 1839 par le physicien français Antoine Henri Becquerel [42].



Fig.I.1 : Conversion Photovoltaïque

I.1 Généralités

Le processus de conversion photovoltaïque est assuré par une cellule photovoltaïque ou cellule solaire ou photopile qui est l'élément de base de la conversion photovoltaïque. La première cellule photovoltaïque (ou photopile) a été développée aux Etats-Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell.

Malgré l'intérêt des scientifiques au cours des années, ce n'est que lors de la course vers l'espace que les cellules ont quitté les laboratoires. En effet, les photopiles représentent la solution idéale pour satisfaire les besoins en électricité à bord des satellites. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace en 1958. Ce n'est qu'à partir des années 1970 qu'ont eu lieu les premières utilisations terrestres.

Les cellules photovoltaïques connectées ensemble et encapsulées sous du verre forment un module solaire qui peut fournir une quantité d'électricité suffisante pour certains appareils de faible consommation (lampe, radio, télévision).



Fig.I.2 : Cellule photovoltaïque [43]



Fig.I.3 : Module photovoltaïque [44]

Plusieurs modules solaires peuvent être groupés pour former un panneau solaire. Plus le panneau est grand, plus la quantité d'électricité qu'il produit est grande. Ces panneaux eux-mêmes sont associés pour former le champ photovoltaïque. Le terme générateur photovoltaïque est réservé à l'ensemble producteur d'énergie qui comprend donc le champ photovoltaïque, le stockage d'énergie, l'électronique de gestion (ou contrôle) et l'élément de conversion en alternatif [15].



Fig.I.4: Panneau Solaire [45]

Tous les modules sont testés en usine sous simulateur de rayonnement, permettant de leur attribuer une norme de qualité. Cette température effective de fonctionnement teste la sensibilité du module pour des élévations dangereuses de température pouvant induire des occultations accidentelles à l'encapsulation.

L'usine de la SARL 'Algerian PV Company', basée à Tlemcen, c'est la première entreprise de production commerciale des panneaux solaires photovoltaïques en Algérie et la deuxième en Afrique dont le premier module sorti en juillet 2011 a été testé et caractérisé au niveau du CDER [47].

I.2 Principe de fonctionnement

Les systèmes les plus simples sont composés d'un module solaire, d'une batterie et d'un régulateur. Le module capte l'énergie solaire et la transforme en électricité (courant continu). La batterie accumule l'énergie pendant la journée et la rend aux utilisateurs la nuit. Le régulateur est un appareil électronique qui contrôle la charge et la décharge de la batterie, l'onduleur transforme le courant continu en courant alternatif et alimente les diverses charges.

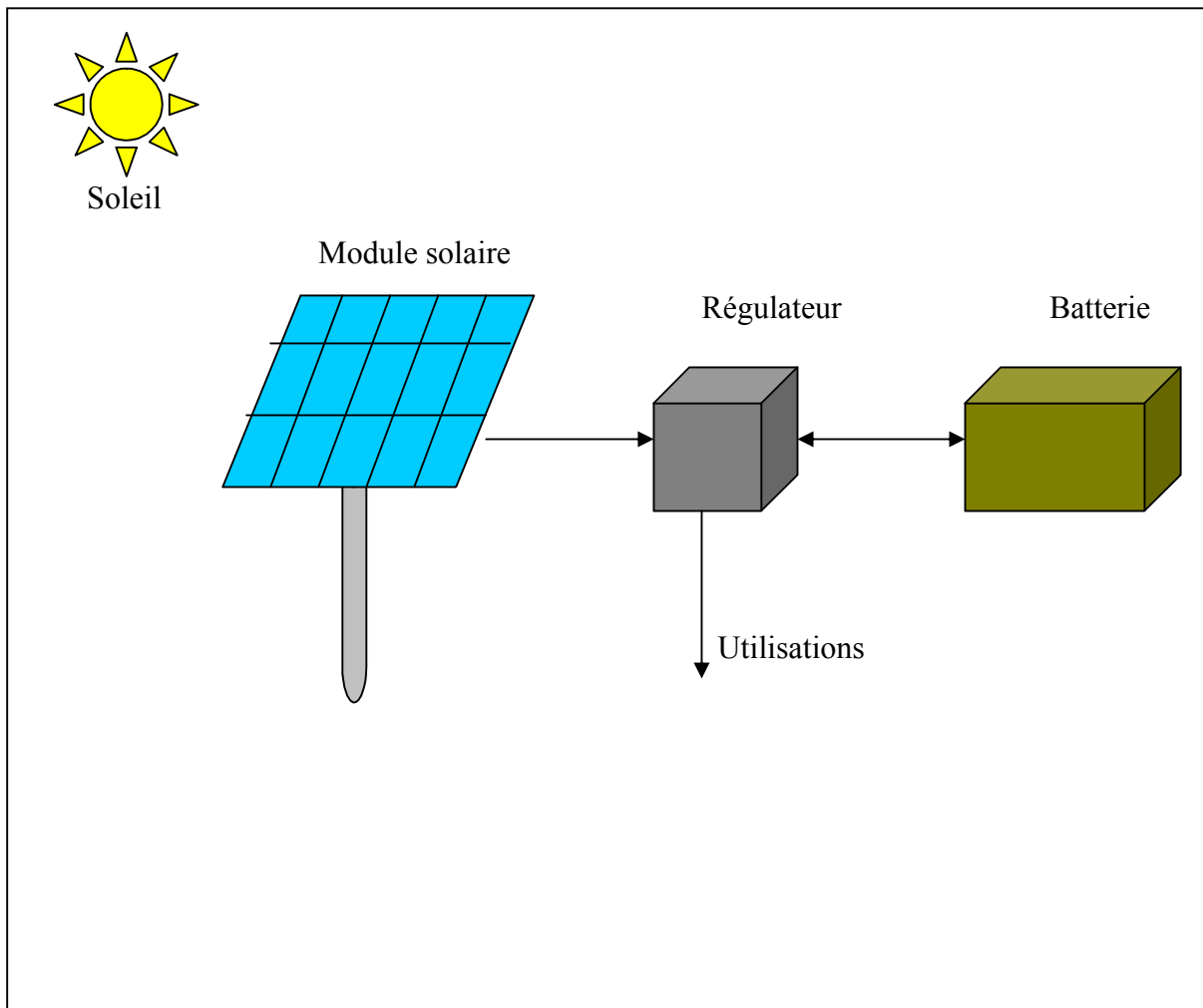


Fig.I.5 : les composants essentiels d'un système photovoltaïque

De nombreuses recherches ont été faites pour exploiter au maximum l'énergie solaire, ces recherches peuvent être classées en trois grands axes.

-le premier axe : les cellules photovoltaïques toute une technologie pour capter les rayons solaires et les transformer en courant continu.

-le second axe : le stockage du courant dans des batteries.

-le troisième axe : est la régulation et le contrôle pour gérer la charge stockée et la distribution vers diverses utilisations.

I.3 Etat de l'Art

I.3.1 Les Cellules Photovoltaïques

Nous citons dans cette recherche bibliographique :

La filière silicium S. Martiuzzi [25] encourage l'utilisation du silicium pour l'industrie photovoltaïque malgré le progrès des photopiles réalisées avec d'autres matériaux. Depuis 1998 plus de 85% des installations utilisent des plaquettes monocristallines et multicristallines, leur principale propriété électrique pour la conversion photovoltaïque est : d'avoir les rayons solaires perpendiculaires à la surface de la cellule photovoltaïque.

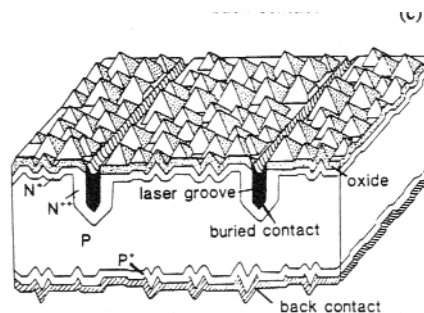


Fig.I.6 : Schéma illustrant la cellule monocristalline [25]

Certains laboratoires [35] privilégient l'arséniure de gallium à la filière silicium, c'est le cas des cellules photovoltaïques réalisées par BOEING et dont le rendement est contrôlé par la NASA.

Les cellules photovoltaïques les plus utilisées sont :

- Cellules en silicium monocristallin
- Cellules en silicium multicristallin
- Cellules en silicium amorphe.

La production des cellules et des modules PV en fonction des années est représentée par la figure 1.7, où Mw_c est la production de puissance en Méga Watt-crête.

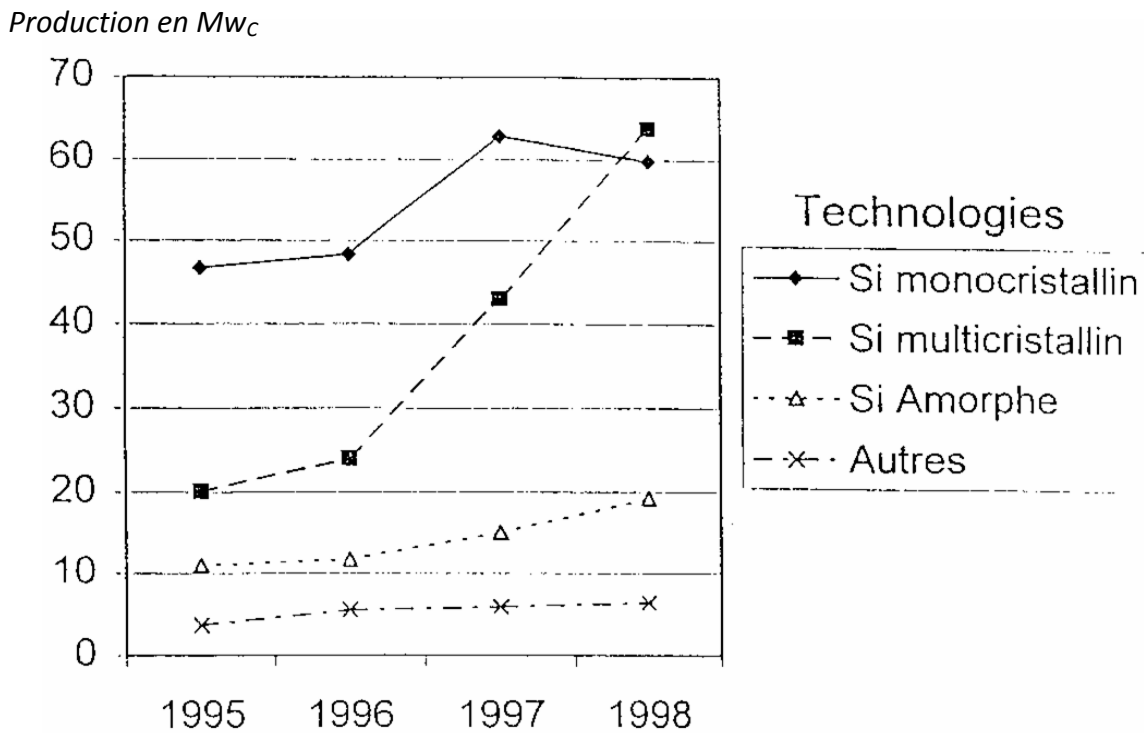


Fig.I.7 : Courbes de production des différentes cellules Photovoltaïques par technologie de fabrication [25]

Les cellules photovoltaïques possèdent différents rendements [8] :

- Cellules en Silicium monocristallin : le rendement varie de 12 à 14%
- Cellules en Silicium multicristallin : le rendement varie de 9 à 10%
- Cellules en Silicium amorphe : le rendement varie de 5%.

Les systèmes PV basés sur la conversion de l'énergie solaire en énergie électriques nécessitent l'utilisation d'un système de stockage le plus souvent de type électrochimique au plomb et au nickel cadmium. L'accumulateur au plomb est le plus répandu en raison de son coût relativement faible et de sa large disponibilité [11].

1.3.2 Les Batteries

Une batterie est constituée d'un ensemble de plaques de plomb interconnectées qui baignent dans un bain d'électrolyte (eau distillée + acide sulfurique). L'ensemble est contenu dans un bac plastique rigide [7].

Comme pour les cellules PV, il existe différentes sortes de batteries

Les alliages les plus utilisés sont [11]:

- Plomb-calcium
- Plomb-antimoine (6%)
- Plomb-antimoine (<2%)
- Nickel-cadmium

Les batteries (au plomb) stationnaires à usage solaire se déchargent naturellement lorsqu'elles sont laissées en circuit ouvert c'est-à-dire au repos.

Les facteurs qui augmentent l'autodécharge sont :

- la température qui double le taux d'autodécharge des batteries
- le vieillissement de la batterie
- le complément avec l'eau non déminéralisée contenant des impuretés
- le mauvais entretien.

La figure suivante représente le taux d'autodécharge en fonction des alliages [11] :

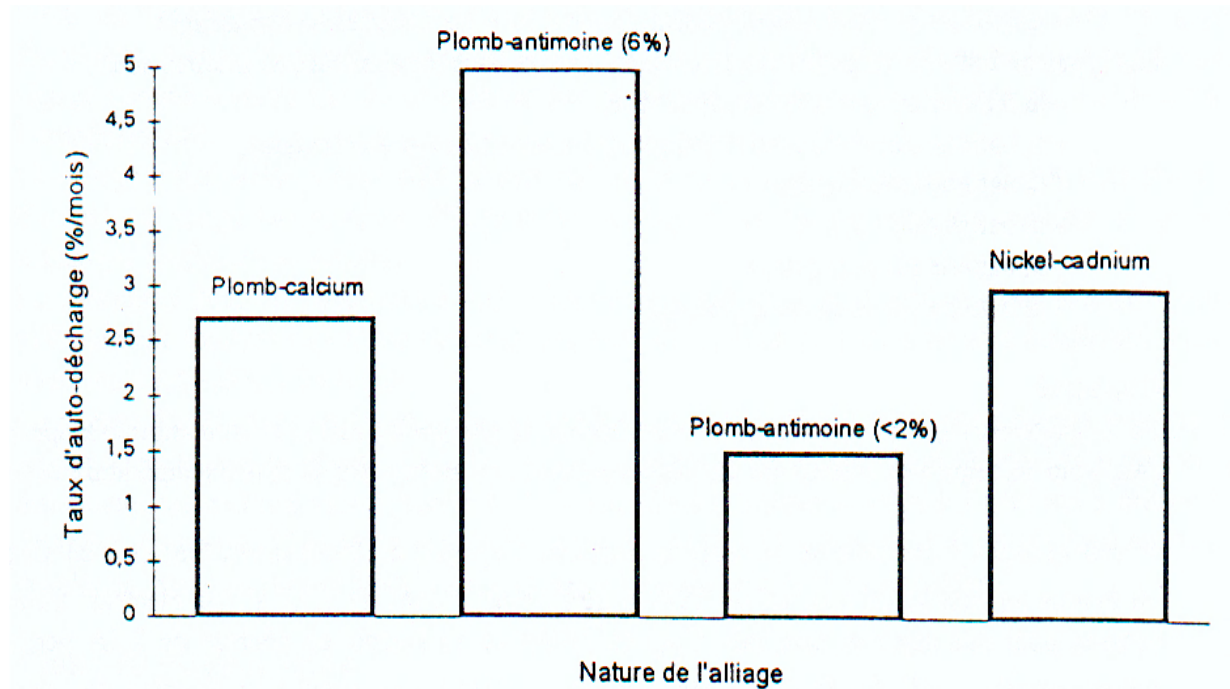


Fig.I.8 : Taux d'autodécharge en fonction des alliages [11]

I.3.3 Les Régulateurs

Les régulateurs sont des dispositifs électroniques conçus de manière à être intégrés dans un système PV pour régler la charge et la décharge de l'accumulateur (batterie) [8].

Les fonctions générales des régulateurs sont :

- Une fonction de régulation de charge de la batterie
- Une fonction de limitation de décharge de la batterie

La tâche principale d'un régulateur est d'une part protéger l'accumulateur contre la décharge profonde, la surcharge, le court circuit et les surtensions. D'autre part protéger les autres composants et l'installation du système. Les circuits d'un régulateur sont composés d'une partie de puissance, d'une partie de commande, la signalisation et une partie protection.

* La partie de commande englobe des circuits intégrés, des résistances et des transistors. Cette partie sert pour la commande des interrupteurs électroniques reliant la batterie au panneau pour la phase de charge.

* la partie de puissance est généralement composée par de transistors avec leurs radiateurs, de triacs, de relais et des diodes anti-retour pour contrôler la décharge de la batterie.

I.4 Synthèse des recherches effectuées sur les régulateurs :

- Depuis 1990 à l'an 2000 la majorité des régulateurs sont des circuits optoélectroniques {[7], [8], [15]}.
- Depuis l'an 2000 à 2011 la majorité des recherches effectuées sont basées sur les contrôleurs flous, les microcontrôleurs et les algorithmes génétiques {[3], [14], [17], [22], [31]}.

Nous présentons quelques résumés des travaux de recherche récents sur l'amélioration du rendement des systèmes photovoltaïque en Algérie et à l'étranger. Les méthodes de calcul varient mais l'objectif reste le même.

Dans l'étude de M.S. Ait Cheik et C. Larbes [3], ils proposent la conception et la simulation d'un contrôleur flou dans le but de rechercher le maximum de puissance d'un système PV. Les résultats de suivi du contrôleur flou sont nettement meilleurs que ceux d'un contrôleur classique.

M.Hatti du centre de recherche de Ain Oussera (Wilaya de Djelfa) présente dans son article une approche intelligente pour l'optimisation des performances d'un système PV par la méthode de poursuite du point de puissance maximum. Le choix des approches de calcul intelligentes est justifié par les caractéristiques de tension de courant et de puissance non linéaires des systèmes PV [17].

Une étude effectuée par N. Mazouz et A. Midoun, dans laquelle ils proposent d'alimenter une pompe d'irrigation connectée à un convertisseur (DC/DC) alimenté par un système PV, contrôlé par un régulateur flou (PC) à travers un port série. Les mesures

exploitées pour les calculs ont été relevées sur un stand expérimental et ont permis d'aboutir à des réponses stables du système [22].

Ganesh Kumar Venayagamoorthy propose une commande adaptative optimale contrôlée par les réseaux de neurones pour assurer une distribution d'énergie stable [31].

Les systèmes solaires photovoltaïques sont souvent associées avec d'autres sources d'énergie renouvelable (hydroélectrique ou le vent) pour améliorer leur rendement. Ces systèmes hybrides présentent de nombreux avantages et des travaux de recherches très intéressants.

Rodolfo Dufo [14] encourage la combinaison des systèmes PV avec d'autres sources d'énergies telles que le vent (une éolienne) ou le diesel contrôlés par les Algorithmes génétiques. Bien que complexes par leur conception mais nettement plus fiables et rentables que les systèmes PV seuls.

Ashab MS [4], présente un système hybride pour chauffer l'eau. La circulation de l'eau est assurée par une pompe connectée au système PV. L'ensemble est contrôlé par un algorithme génétique adaptatif, les mesures de sortie du système sont prélevées régulièrement pour corriger les erreurs des paramètres prédictives des réseaux de neurones. Cette méthode a permis d'acquérir un meilleur rendement du système.

Pour obtenir un haut rendement certaines équipes de recherches proposent des systèmes PV à concentration. L'approche consiste à augmenter la puissance électrique produite par chaque cellule en concentrant la lumière par un matériau réfléchissant (miroirs), réfringent (lentilles) ou encore fluorescent [15].

L'étude effectuée par Ahmed Hamza H. Ali [1], permet de clarifier expérimentalement l'effet de la température sur le rendement de puissance d'un système PV. Trois arrangements des cellules PV sont proposés : en ligne (horizontal), en oblique (incliné) et une configuration excentrée.

Dans l'étude expérimentale effectuée par A.AI Tarabsheh, I.Etier [2], montre réellement que le rendement de puissance d'un système PV orienté en permanence vers les rayons solaire suivant deux axes donne un rendement supérieur qu'un système fixe.

I.5 Objectifs de l'étude

Après cette analyse bibliographique touchant un nombre de travaux scientifiques. Nous situons notre contribution de recherche dans ce qui suit :

- Dans une première étape une description des systèmes photovoltaïques
- Une seconde étape consiste à faire une synthèse des cours sur la conversion photovoltaïque
- Une troisième étape est de présenter des notions d'ensoleillement et de météorologie
- Une dernière étape permettra de sélectionner les équations théoriques qui décrivent la trajectoire du soleil et ceci dans le but de réaliser un programme de poursuite par un panneau PV mobile.

Conclusion

La synthèse des travaux de recherches passés en revue nous a permis d'orienter notre travail dans le but d'améliorer la puissance obtenue par un panneau solaire photovoltaïque et ce, en lui appliquant une orientation suivant le mouvement apparent du soleil.

Cette orientation donne au panneau deux degrés de liberté, le premier autour de l'axe vertical (mouvement en hauteur) et l'autre en horizontal (mouvement en azimut).

CHAPITRE II
LA CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE

CHAPITRE II

LA CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE

Le composant de base de la conversion photovoltaïque est la cellule photovoltaïque (PV) ou photopile. Elle fait appel aux propriétés des semi-conducteurs : c'est-à-dire des matériaux ayant des propriétés intermédiaires entre les isolants et conducteurs, ces matériaux présentent les particularités suivantes :

- leur conductivité dépend fortement de la présence d'impuretés
- Il est possible de créer au sein du matériau une jonction qui crée un champ électrique.

II.1 Le matériau

La photopile la plus courante utilise le silicium élément très répandu sous forme de silice (sable) mais doit être amenée à un très grand état de pureté. En effet, le fonctionnement de la photopile est basé sur les propriétés électroniques acquises par le silicium quand des atomes étrangers en petits nombre (des impuretés) sont substitués dans un réseau cristallin. Cette opération s'appelle le dopage **[15], [21]**.

Si l'atome d'impureté contient plus d'électrons que le silicium, le matériau contiendra des électrons libres en excès il sera dit de type N (exp. silicium dopé au phosphore). Si au contraire, l'atome d'impureté contient moins d'électrons que le silicium, le matériau sera déficitaire en électrons : il sera dit de type P (exp. silicium dopé au bore).

II.2 La Photopile

Une cellule solaire ou photopile sera obtenue en constituant une jonction de deux types opposés de silicium (jonction PN). Au voisinage de la jonction apparaît un champ électrique qui maintient la séparation des charges positives et négatives. L'épaisseur moyenne d'une photopile est de 300 micromètres [15].

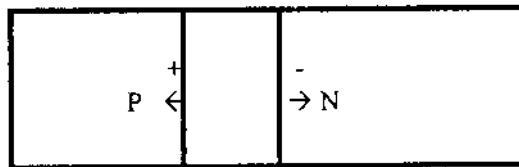


Fig.II.1 : Jonction PN

II.3 L'Effet Photovoltaïque

Le phénomène mis en œuvre est celui de l'interaction de la lumière composée de particules ' Les Photons ' avec un matériau semi-conducteur. Sous l'effet de la lumière, une tension électrique apparaît entre les deux côtés N et P de la photopile, les électrons du silicium se mettent en mouvement uniquement quand ils entrent en contact avec les photons contenus dans la lumière. Les plaques en silicium se polarisent sous l'effet de l'impact des nombreux photons des rayons du soleil, produisent ainsi un courant continu. Le dispositif devient générateur électrique. L'effet photovoltaïque réalisé permet de convertir l'énergie du rayonnement solaire (photons) en énergie électrique à condition de collecter les électrons produits et de canaliser le courant électrique dans un circuit extérieur.

II.3.1 La collecte du Courant

La récupération des charges électriques ayant traversées la jonction se fait en face avant et en face arrière de la cellule.

- la face avant est constituée d'une grille qui permet de récupérer les charges négatives tout en laissant passer la lumière (pôle négatif).

- la face arrière est entièrement recouverte d'un contact métallique collectant les charges positives (pôle positif).

Etant donné que la circulation du courant se fait toujours dans le même sens (+) vers (-), le courant produit par les cellules photovoltaïques est un courant continu {[6], [16]}.

II.4 Schéma Equivalent d'une Cellule Photovoltaïque

Le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque sous éclairage correspond à un générateur de courant I_{photons} (I_{ph}) en parallèle sur une diode de (courant I_D) comme présenté dans la figure suivante :

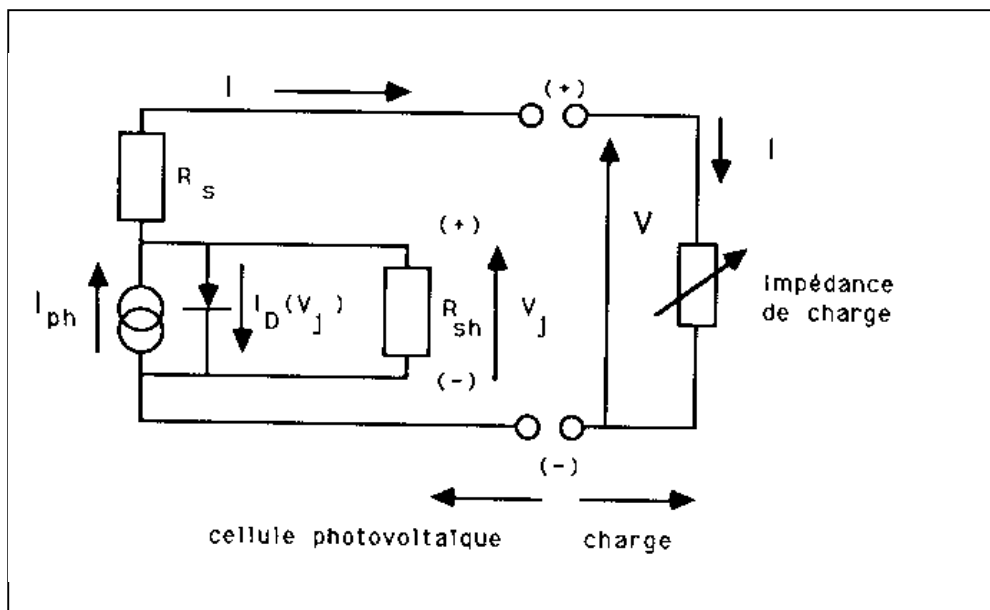


Fig.II.2 : Schéma équivalent d'une cellule Photovoltaïque [15]

Deux résistances parasites sont introduites dans ce schéma, elles vont influencer sur la caractéristique (I,V) de la cellule :

- R_s résistance série est liée à l'impédance des électrodes et du matériau.
- R_{sh} résistance de shunt, elle correspond à une résistance de fuite entre les deux zones N et P de la jonction.

II.4.1 La caractéristique « Courant – Tension » d'une cellule PV

L'aspect technique le plus intéressant d'une cellule PV est la courbe $I = f(V)$ {Courant-Tension}. La réponse d'une cellule éclairée par un rayonnement solaire constant est décrite par la figure suivante qui retrace la variation du courant aux bornes de la cellule en fonction de la tension.

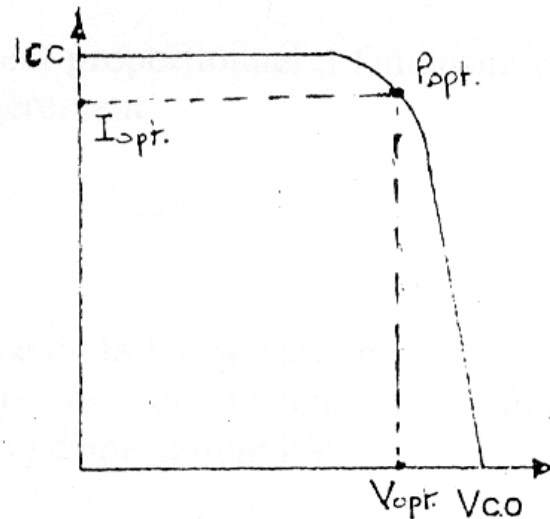


Fig.II.3: Courbe (I, V) [8]

Les propriétés particulières des cellules PV amènent à donner quelques définitions {[8], [15], [20], [21]} :

- **Puissance crête** : C'est la puissance (W_C) délivrée par la cellule pour un ensoleillement de 1000 W/m^2 et pour une température de jonction de 25°C .
- **Courant de court circuit** I_{cc} : C'est le courant maximum produit par la cellule sous des conditions de rayonnement et de température pour une tension aux bornes des cellules nulle (court-circuit).
- **Tension circuit ouvert** V_{co} : C'est la tension maximale délivrée par la cellule sous des conditions de rayonnement et de température définies lorsque le courant est nul (absence de charges sur le circuit extérieur).

- **Puissance optimale P_{opt}** : C'est la puissance maximale produite par la cellule sous des conditions de rayonnement et de température définies.
- **Courant optimum I_{opt}** : C'est le courant maximum produit par la cellule correspondant à la puissance optimale P_{opt} .
- **Tension optimale V_{opt}** : C'est la tension délivrée par la cellule correspondant à la puissance optimale.
- **Rendement de conversion** : C'est le rapport de la puissance électrique maximale pouvant être extraite, à la puissance du rayonnement solaire incident sur la surface S de la cellule.
- **Facteur de Forme** : On appelle facteur de forme (FF), (connu en anglais par Fill Factor) le rapport de la puissance électrique maximale au produit $I_{cc}V_{co}$, qui est calculé par :

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{cc} V_{co}} \quad (2.1)$$

- **Caractéristique d'une cellule en Si monocristallin :**

La caractéristique théorique pour une cellule en Si monocristallin de 100 mm de diamètre à 25°C et sous l'irradiation de référence 1 kW /m² est la suivante :

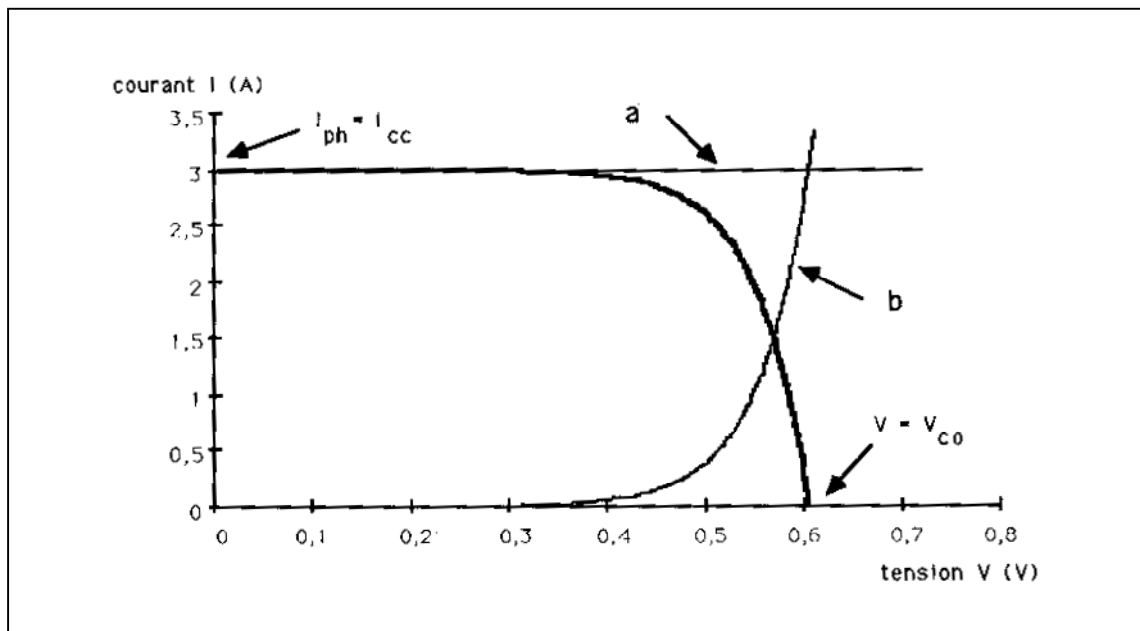


Fig.II.4 : La caractéristique $I=F(V)$ d'une cellule photovoltaïque [15]

Nous remarquons que la caractéristique (I, V) correspond à la soustraction de deux courbes ; la courbe (a)(I_{ph}) – courbe(b)($I_D(V)$) Figure II.4. Le courant I extrait de la cellule photovoltaïque est donc fonction de la tension de travail de la cellule Le photocourant I_{ph} généré par le rayonnement de la cellule photovoltaïque a pour équation :

$$I_{ph} = \alpha(T).G.S \quad (2.2)$$

Ce photocourant est donc proportionnel au rayonnement solaire G (W/m^2) à la surface de captation S(m^2) et $\alpha(T)$ est un coefficient dépendant faiblement de la température. Ce dernier est de l'ordre de $0,35 AW^{-1}$ pour les cellules en silicium mono ou multicristallin de 100mm de diamètre sous l'irradiation de référence de $1kWm^{-2}$ à un photocourant d'environ 2,8A. Si la cellule PV est en court-circuit $I_{ph} = I_{cc}$ aucune puissance ne peut être extraite puisque la tension est nulle. Si la cellule est en circuit ouvert le photocourant est nul, il est compensé par le courant de la diode à tension V_{co} : $I_D(V_{co})$, aucune puissance ne peut être extraite [15].

La partie intéressante de la caractéristique courant-tension est celle qui génère l'énergie, elle n'est ni au point de tension circuit ouvert, ni au point de court circuit. L'extraction de la puissance de la cellule se fait au point de puissance optimale (maximale) figure (II.3).

Le courant I_{cc} et la tension V_{co} aux bornes de la cellule peuvent être estimés par {[1], [27]}:

$$I_{cc2}(G_2, T_2) = I_{cc1}(G_1, T_1) \frac{G_2}{G_1} + \alpha(T_2 - T_1) \quad (2.3)$$

et

$$V_{co2}(G_2, T_2) = V_{co1}(G_1, T_1) + A \ln\left(\frac{G_2}{G_1}\right) + \beta(T_2 - T_1) \quad (2.4)$$

Avec : $A=0.026$ mV à 300 K [21], A est explicité dans (2.6),

(I_{cc1}, V_{co1}) le courant et la tension de la cellule à l'instant initial t_1 , à la température T_1 sous un éclairage G_1 , et (I_{cc2}, V_{co2}) le courant et la tension de la cellule à l'instant final t_2 , à la température T_2 sous un éclairage G_2 .

La caractéristique {courant – tension} de la cellule photovoltaïque se met alors sous la forme {[15], [21], [38]} :

$$I(V) = I_{ph} - I_D(V) \quad (2.5)$$

Soit :

$$I(V) = \alpha(T).G.S - \beta(T).S. \left[\exp[A.V] - 1 \right] \quad (2.6)$$

Le second terme dans (2.5) est l'équation classique du courant d'une diode de surface S polarisée à la tension V, $\alpha(T)$ et $\beta(T)$ sont des coefficients caractéristiques de la jonction PN (Fig.II.1).

Deux résistances R_S et R_{sh} sont introduites dans le schéma équivalent de la cellule PV, elles vont influencer sur la caractéristique (I, V) de la cellule.

- R_S (résistance série) est liée à l'impédance des électrodes du matériau, il en résulte que la tension V aux bornes de la cellule est différente de la tension V_J aux bornes de la jonction PN
- R_{sh} (résistance shunt) correspond à une résistance de fuite entre les deux zones de la jonction.

L'équation complète de la cellule photovoltaïque compte tenu des résistances parasites R_S et R_{sh} s'écrit donc :

$$I = \alpha(T)GS - \beta(T)S \left[\exp\left(\frac{q(V + R_S I)}{KT}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_S I}{R_{sh}} \quad (2.7)$$

La tension sur la diode V_J est en effet égale à $V + R_S I$. Si $R_S = 0$ et R_{sh} est infinie nous retrouvons l'équation (2.6). Dans l'équation ci-dessus A a été explicité et est égal à KT/q (q la charge de l'électron, K constante de Boltzmann et T la température en K de la jonction) [21].

II.4.2 Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique (I, V)

La caractéristique $I = f(V)$ d'une cellule est modifiée en fonction de l'intensité du rayonnement solaire comme l'indique la figure suivante :

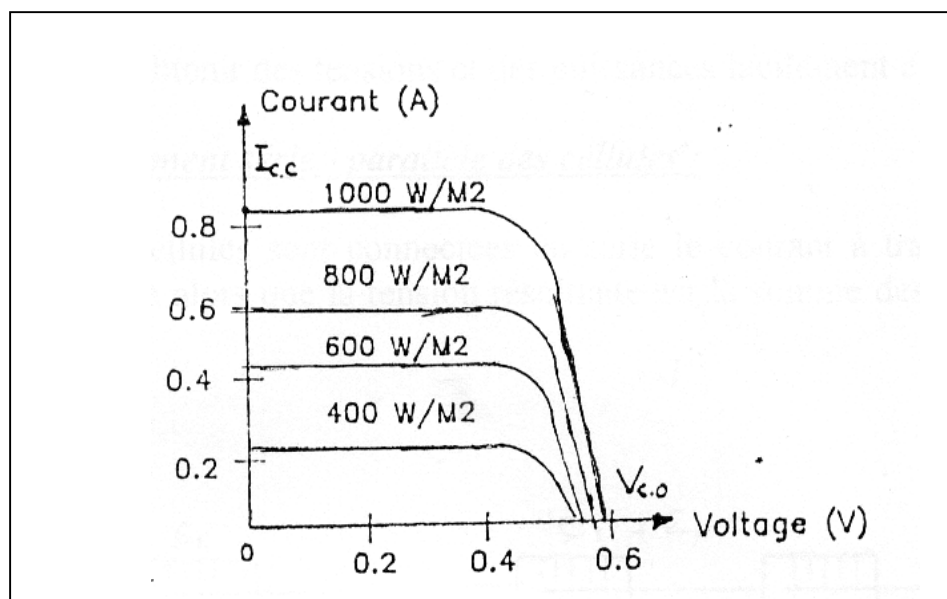


Fig.II.5 : Effet rayonnement solaire [8]

- Le courant I_{cc} est directement proportionnel à l'intensité du rayonnement solaire alors que V_{co} varie légèrement.
- La puissance optimale diminue lorsque l'éclairement diminue.

La figure II.5 nous montre l'effet du rayonnement solaire sur la caractéristique $I(V)$ d'une cellule PV, ces courbes sont obtenues à partir de valeurs expérimentales. Elles ont été simulées dans la figure II.6 à partir de l'équation (2.6). Les courbes obtenues nous montrent l'influence directe du rayonnement sur le courant de court circuit la variation du module PV, ces courbes reflètent les courbes théoriques disponibles dans la littérature.

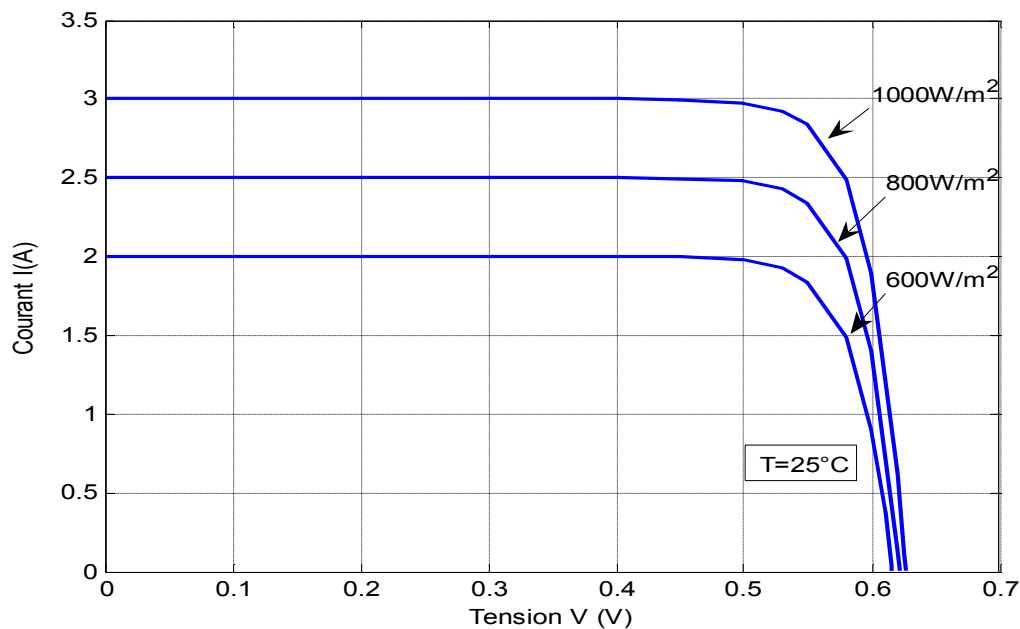


Fig. II.6 : Influence du rayonnement solaire sur la caractéristique $I=f(V)$ du module PV

Nous avons également reproduit en figure II.7 les courbes de variation de la puissance en fonction de la tension d'une cellule PV pour les différents rayonnements, ces courbes sont obtenues à partir de l'équation (4.20) dont la courbe théorique est représentée dans la figure IV.5. Les résultats obtenus reproduisent les résultats théoriques disponibles dans la littérature. L'extraction de puissance joue un rôle très important dans les systèmes photovoltaïques, ainsi que le stockage de cette énergie et sa distribution.

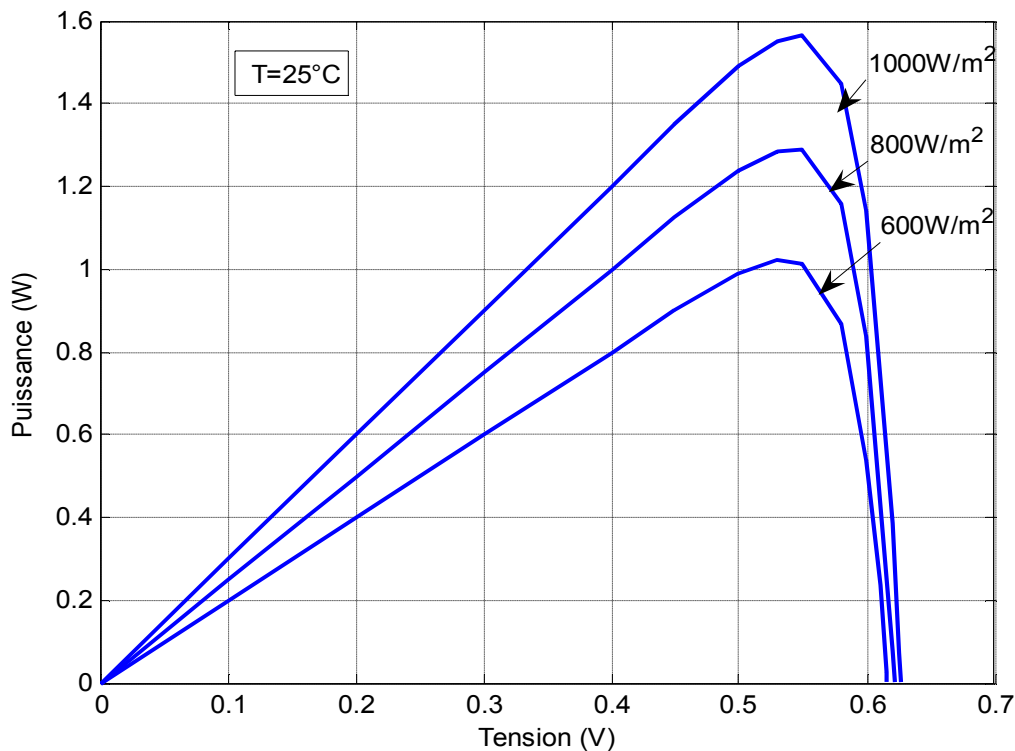


Fig. II.7 : Influence du rayonnement solaire sur la puissance $P=f(V)$ du module PV

II.4.3 Influence de la température sur la caractéristique (I, V)

La température est un facteur non négligeable au niveau de la caractéristique $I=f(V)$ d'une cellule PV comme l'indique la figure suivante :

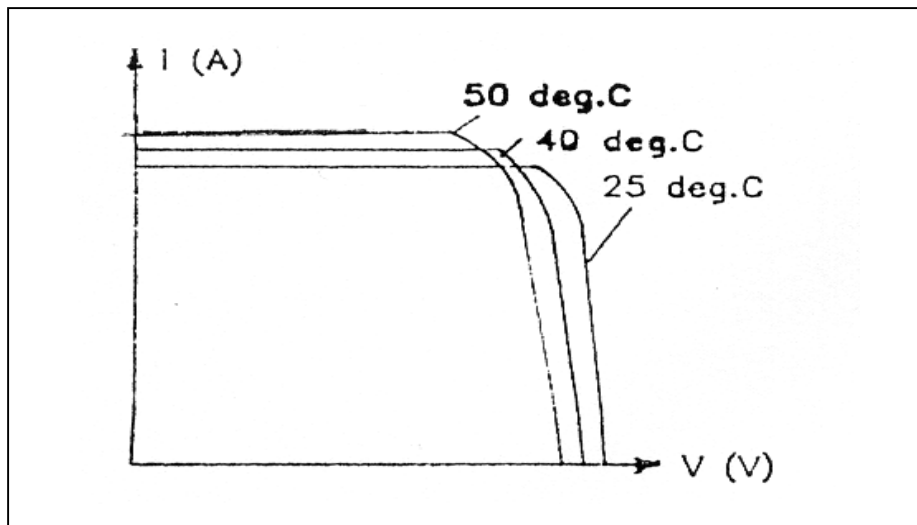


Fig. II.8 : Effet température [7]

L'augmentation de la température d'une cellule PV modifie ses performances. I_{cc} augmente légèrement et V_{co} diminue ce qui engendre une diminution de la puissance optimale. La figure II.9 représente l'influence de la température sur la caractéristique courant-tension obtenue par simulation de l'équation (2.6), les résultats obtenus reflètent les courbes disponibles dans la littérature. Les caractéristiques propres des cellules photovoltaïques essentiellement leur faible tension et leur fragilité exigent leur association sous forme de plusieurs modules pour obtenir des tensions et des puissances facilement exploitables.

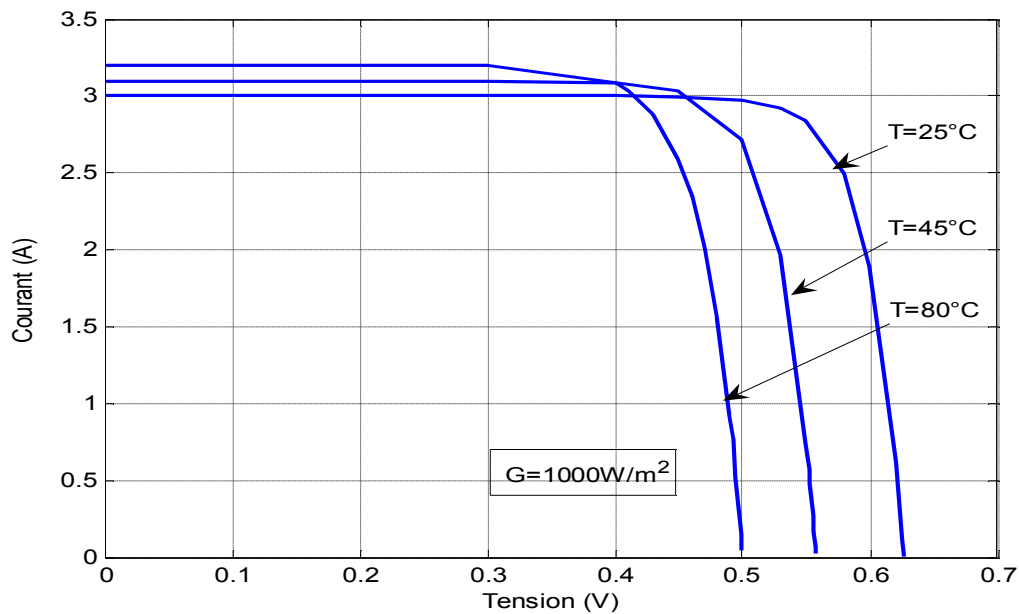


Fig. II.9 : Effet de la température sur la caractéristique $I=f(V)$ d'un module PV

II.5 Branchement des cellules Photovoltaïques

II.5.1 Branchement série des cellules

Lorsque les cellules sont connectées en série le courant I à travers chaque cellule est le même, ce dernier génère la tension V_i multiplié par le nombre de cellules en série N_S , fermé sur une impédance R' . Le groupement (G) des cellules délivrera le courant I sous la tension $N_S V_i$. L'impédance optimale pour le groupe série est N_S plus grande que l'impédance optimale pour une cellule de base. Il faudra dans la majorité des cas associer un certain nombre de cellules N_S en série pour obtenir des tensions compatibles avec des charges à alimenter. C'est ce qui est réalisé dans un module photovoltaïque, où les cellules sont positionnées dont les extrémités sont ramenées vers une boîte de connexion [15].

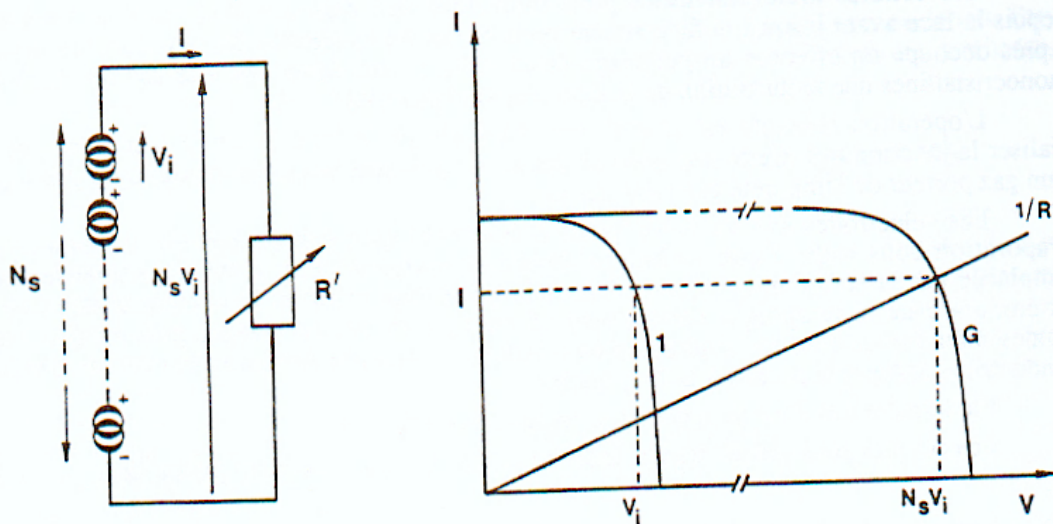


Fig. II.10 : Branchement série des cellules PV [15]

La courbe (1) est la caractéristique de l'une des cellules et la courbe (G) est la caractéristique du groupement séries des N_S cellules.

II.5.2 Branchement parallèle des cellules

Il est possible d'augmenter le courant fourni à une charge R'' en plaçant en parallèle plusieurs cellules ou modules photovoltaïques. Le groupement parallèle délivrera le courant $N_P I_i$ sous la tension V , où N_P est le nombre de cellules connectées en parallèle, I_i est le courant généré par chaque cellule et V est la tension à la sortie du groupement. L'impédance optimale pour le groupement est N_P fois plus faible que l'impédance optimale pour une cellule [15].

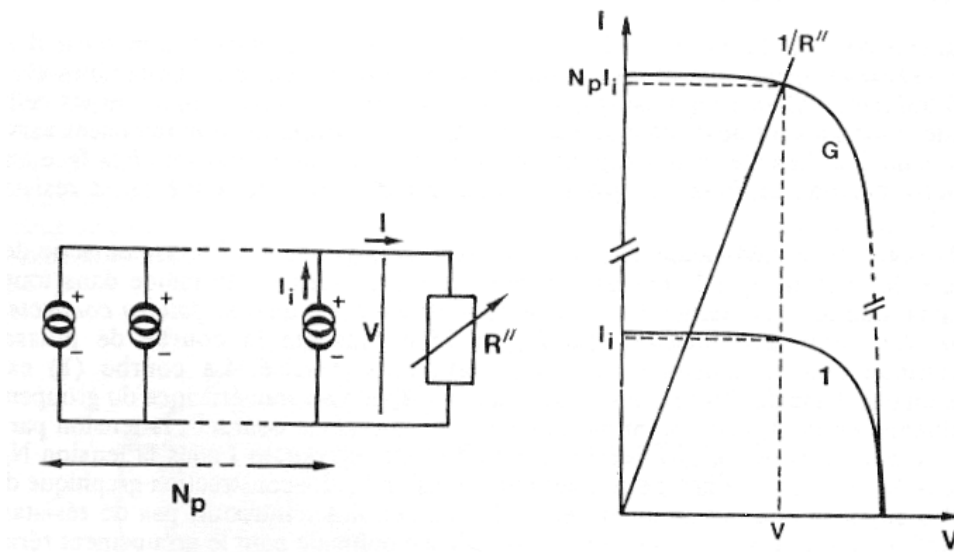


Fig. II.11 : Branchement parallèle des cellules PV [15]

II.5.3 Branchement série parallèle des cellules

La puissance des modules disponibles sur le marché étant limitée d'où l'association des cellules ou modules photovoltaïques en série – parallèle pour obtenir des caractéristiques {courant-tension} exploitables pour certaines applications : éclairage, pompage, ...

Nous ne pouvons associer que des cellules identiques pour obtenir un module fiable, et des modules identiques pour obtenir un champ photovoltaïque stable. Comme nous le montre la figure II.12 :

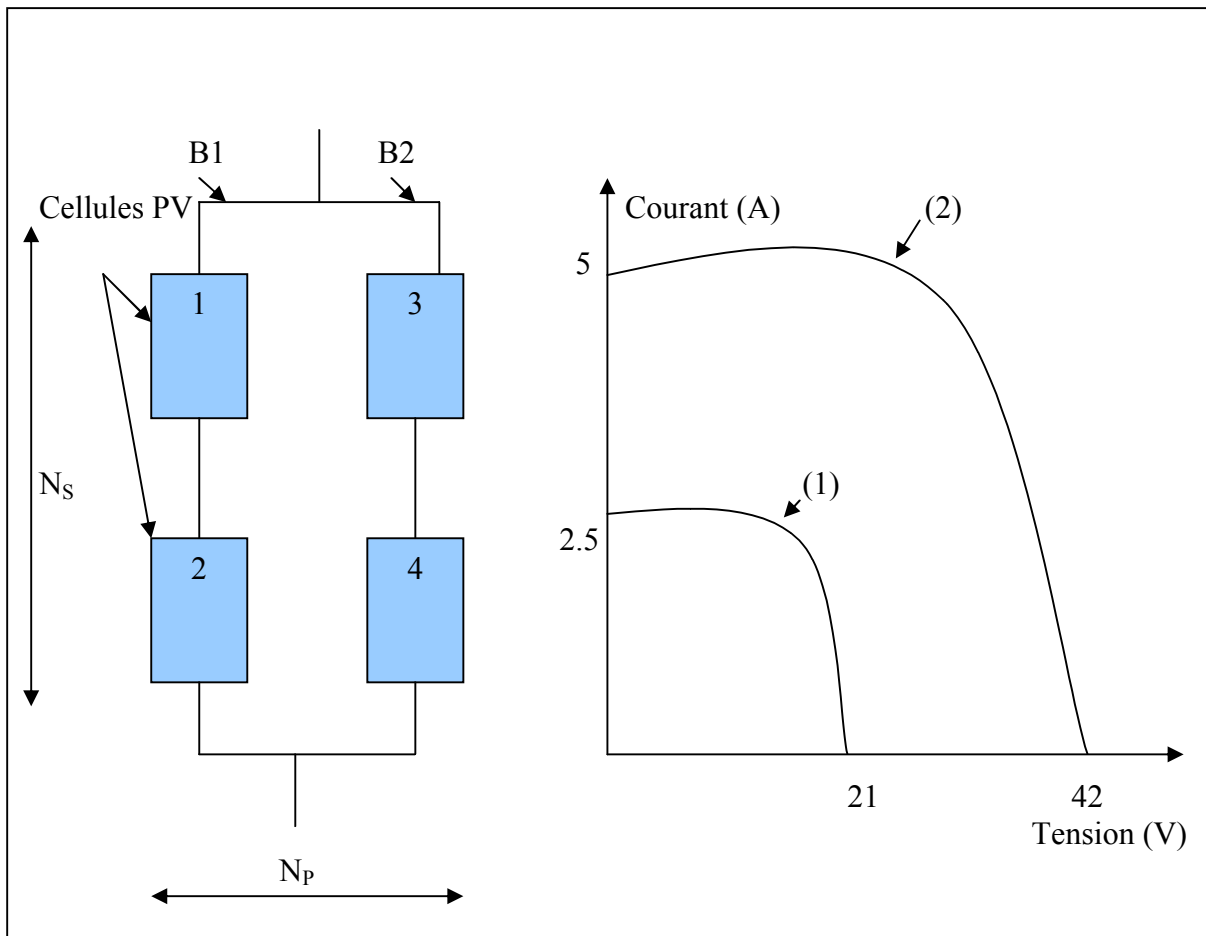


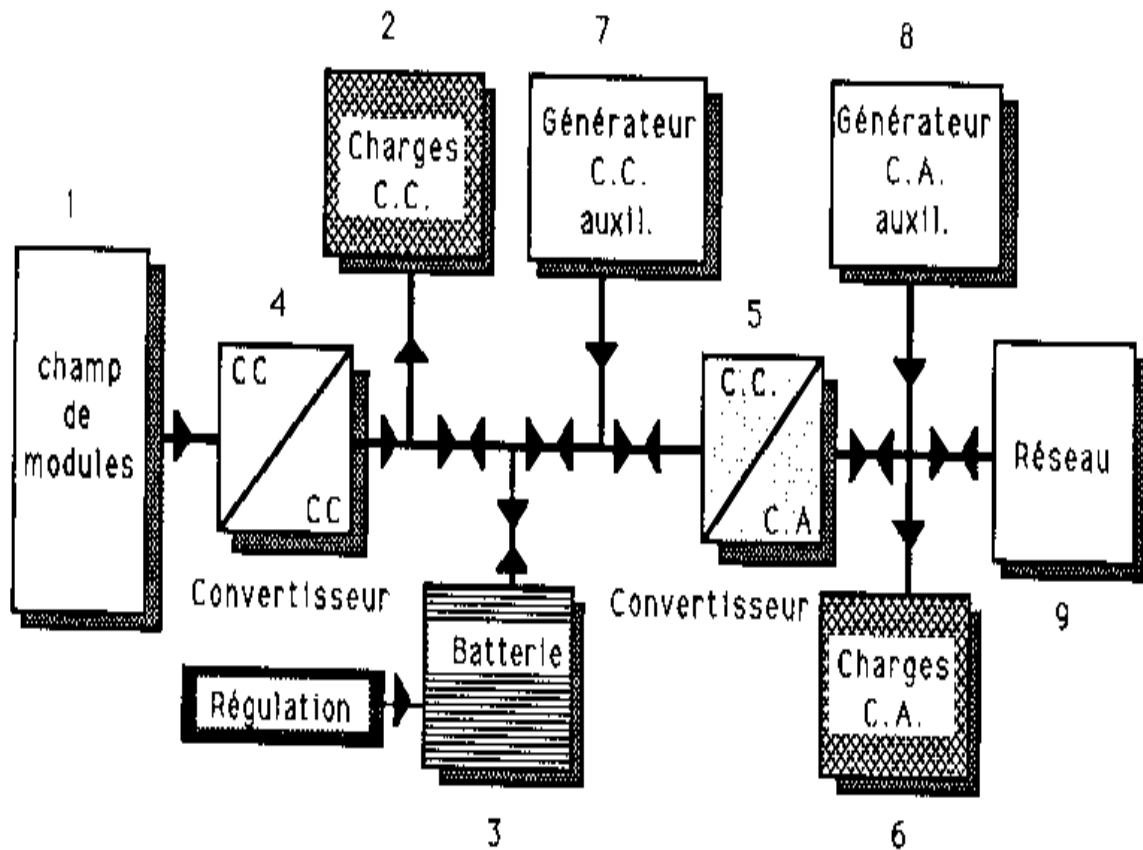
Fig. II.12 : Branchement série parallèle des cellules PV

N_s est le nombre de cellules associé en série et N_p le nombre de branches associées en parallèle. La courbe (1) représente la caractéristique courant –tension des cellules [1, 2] montées en série, la courbe (2) représente la caractéristique des deux branches {B1, B2} montées en parallèle.

Une association série parallèle de cellules aura la même caractéristique (I, V) théorique que celle de la courbe de la cellule de base. En modifiant les échelles sur les deux axes, dans le cas idéal où toutes les cellules (ou modules) ont des caractéristiques électriques rigoureusement identiques.

II.6 Configuration générale d'un système photovoltaïque

Les diverses composantes d'un système photovoltaïque sont représentées symboliquement sur la figure suivante, cette représentation synoptique recouvre à peu près tous les cas de figure que nous pouvons rencontrer dans un système PV. Mais il est bien certain qu'un système PV ne comporte en général qu'un nombre défini d'éléments [18].



Système autonome

Système raccordé au réseau

Fig. II.13 : Configuration générale d'un système PV [18]

Pour les systèmes suffisamment importants une connexion au réseau de distribution d'énergie électrique est envisageable.

Les capteurs photovoltaïques peuvent être fixes ou orientables. Une orientation manuelle des panneaux n'est envisageable que si elle est uniquement saisonnière (3 ou 4 fois par an) et une telle opération ne se justifie que pour les régions septentrionales. Un troisième cas peut être envisageable, c'est celui des panneaux mobiles.

Dans le cas d'une orientation automatique, ceci implique l'utilisation d'un circuit électronique de régulation. Deux cas peuvent se présenter :

- les systèmes photovoltaïques à modules plans sans concentration
- les systèmes photovoltaïques à concentration (ou avec concentrateur dont la forme du module peut être plane ou parabolique).



Fig. II.14 : Capteurs cylindro-paraboliques de la centrale Nevada Solar One [44]

L'idée de base des systèmes photovoltaïques à concentration est relativement simple. Puisque le capteur photovoltaïque (module) est l'élément le plus coûteux du système, l'approche consiste à augmenter la puissance électrique produite par chaque module en concentrant la lumière sur un nombre réduit de modules. Dans ce cas, la surface occupée précédemment par les modules est remplacée par une surface équivalente d'un matériau moins cher, réfléchissant (miroirs), réfringent (lentilles) ou encore fluorescent.

Le système aura donc un nombre de modules plus réduit, de ce fait, le coût des modules moins élevé, malgré le fait qu'il faut ajouter le prix du concentrateur et le système de poursuite automatique du soleil. Cette approche reste une solution optimale pour les pays où l'ensoleillement direct est important [15].

Voici quelques avantages liés à la l'utilisation de la concentration :

- l'amélioration du rendement théorique de la cellule solaire avec le niveau de concentration.
- l'obligation d'adjoindre au concentrateur un système de poursuite automatique du soleil procure, par rapport au panneau plan fixe, un gain de puissance qui compense généralement la perte de collecte du rayonnement diffus non- concentrable.

Exemple : Pour une cellule en Silicium monocristallin (c-Si) son rendement est de 22, 3% sans concentration et de 27,2% sous concentration, mesurés au laboratoire [34].

Une poursuite automatisée du flux solaire (F), précise et fiable devient nécessaire pour un meilleur rendement (un axe ou deux axes selon le cas).

Parmi les systèmes de poursuite à deux axes, on utilise principalement les montures suivantes correspondant aux deux systèmes de coordonnées utilisés habituellement pour repérer la position du soleil :

- La monture altazimutale (coordonnées horizontales) est mobile autour de deux axes : l'un vertical, l'autre en horizontal (hauteur et azimut).

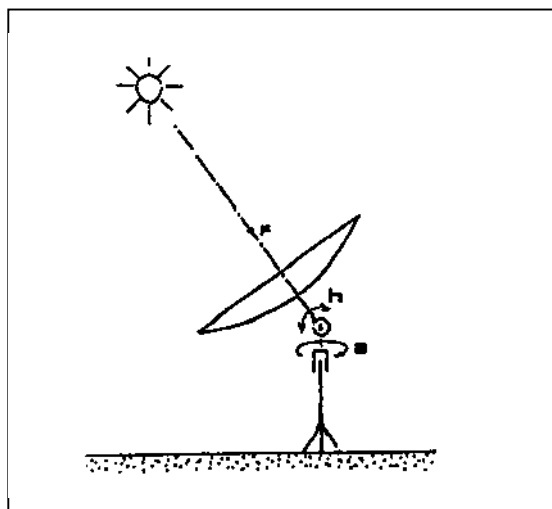


Fig. II.15: Monture altazimutale [15]

- La monture équatoriale (coordonnées équatoriales) met en jeu deux mouvements de rotation autour d'un axe parallèle à l'axe du mouvement en angle horaire (AH), et autour d'un axe perpendiculaire au précédent mouvement de déclinaison (δ) [15].

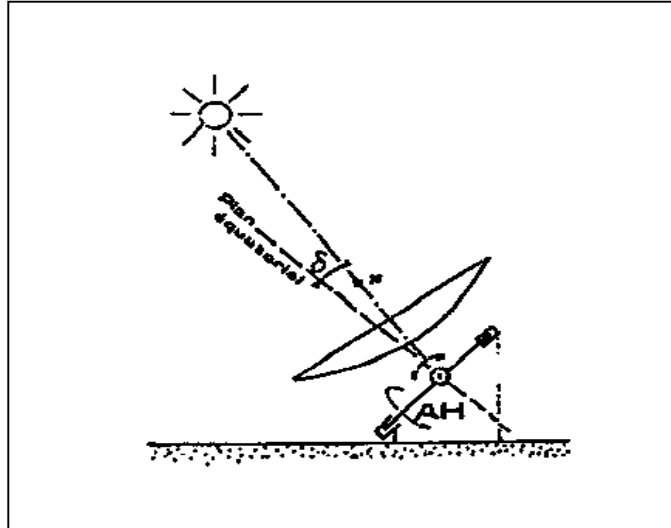


Fig. II.16 : La monture équatoriale [15]

Pour les systèmes de poursuite 1 axe, on utilisera cette deuxième rotation autour d'un axe parallèle à l'axe du mouvement en angle horaire en plus d'un ajustement saisonnier de l'inclinaison de cet axe.

II.7 Applications des Systèmes Photovoltaïques

Les applications de l'énergie solaire photovoltaïque sont multiples. En général on peut les classer comme suit :

- **Application au fil du soleil**

Ces applications ne nécessitent pas de système de stockage. L'énergie électrique produite par le ou les module(s) solaire est directement consommée par la charge (exemple : système de pompage).

Dans le cas d'une charge en courant alternatif, un appareil est introduit dans le système pour convertir le courant continu produit par le ou les module(s) en courant alternatif :

C'est l'onduleur.

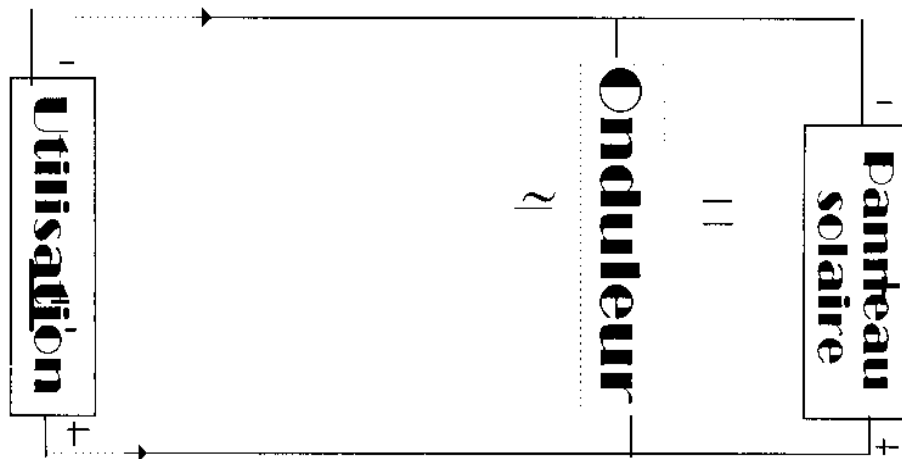


Fig. II.17 : Application Photovoltaïque au fil du soleil [7]

- **Application avec stockage**

Ces applications nécessitent un accumulateur pour emmagasiner l'énergie électrique produite par un ensemble de modules afin d'être consommée par la suite par de diverses charges (lampes, TV, radio,...).

L'emploi de l'accumulateur ou batterie oblige l'utilisation d'un appareil de régulation assurant les fonctions de charge et de décharge de la batterie, c'est le régulateur.

Dans le cas d'une charge en courant alternatif, un onduleur est introduit dans le système pour convertir le courant continu délivré par la batterie en courant alternatif.

L'application la plus connue pour ce type de système est l'éclairage domestique.

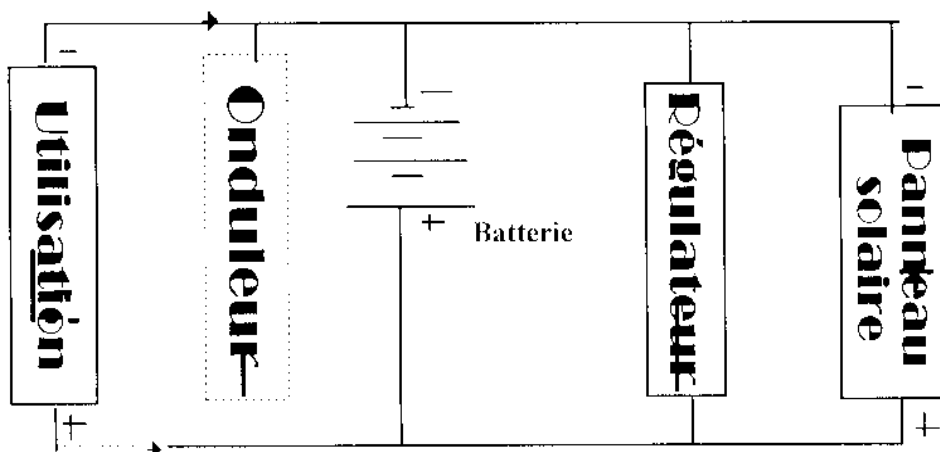


Fig. II.18 : Application photovoltaïque avec stockage d'énergie [7]

- **Les systèmes hybrides**

Dans l'objectif d'obtenir un rendement énergétique maximale, certaines études de recherches proposent d'associer quelques sources d'énergies renouvelables telles que l'hydroélectricité, l'électricité éolienne, bois énergétique, énergie des déchets urbains et énergie des déchets ruraux.

La première centrale de type hybride, gaz solaire, dans le monde, a été inaugurée jeudi 14 juillet 2011 à Hassi R'mel, d'une capacité de production de 150 méga Watts (mW), dont 120 produits à partir du gaz et 30 par l'énergie solaire. Cette centrale est connectée au réseau national depuis le 16 mai 2011, ce projet est le fruit d'une coopération entre l'Algérie et l'Espagne [47].

- **Les systèmes d'appoint**

Pendant les périodes de faible irradiation et pour satisfaire la demande énergétique, des générateurs auxiliaires peuvent être associés au système photovoltaïque. Ces derniers sont activés par le régulateur pour charger les batteries [15].

L'ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE ET SES APPLICATIONS

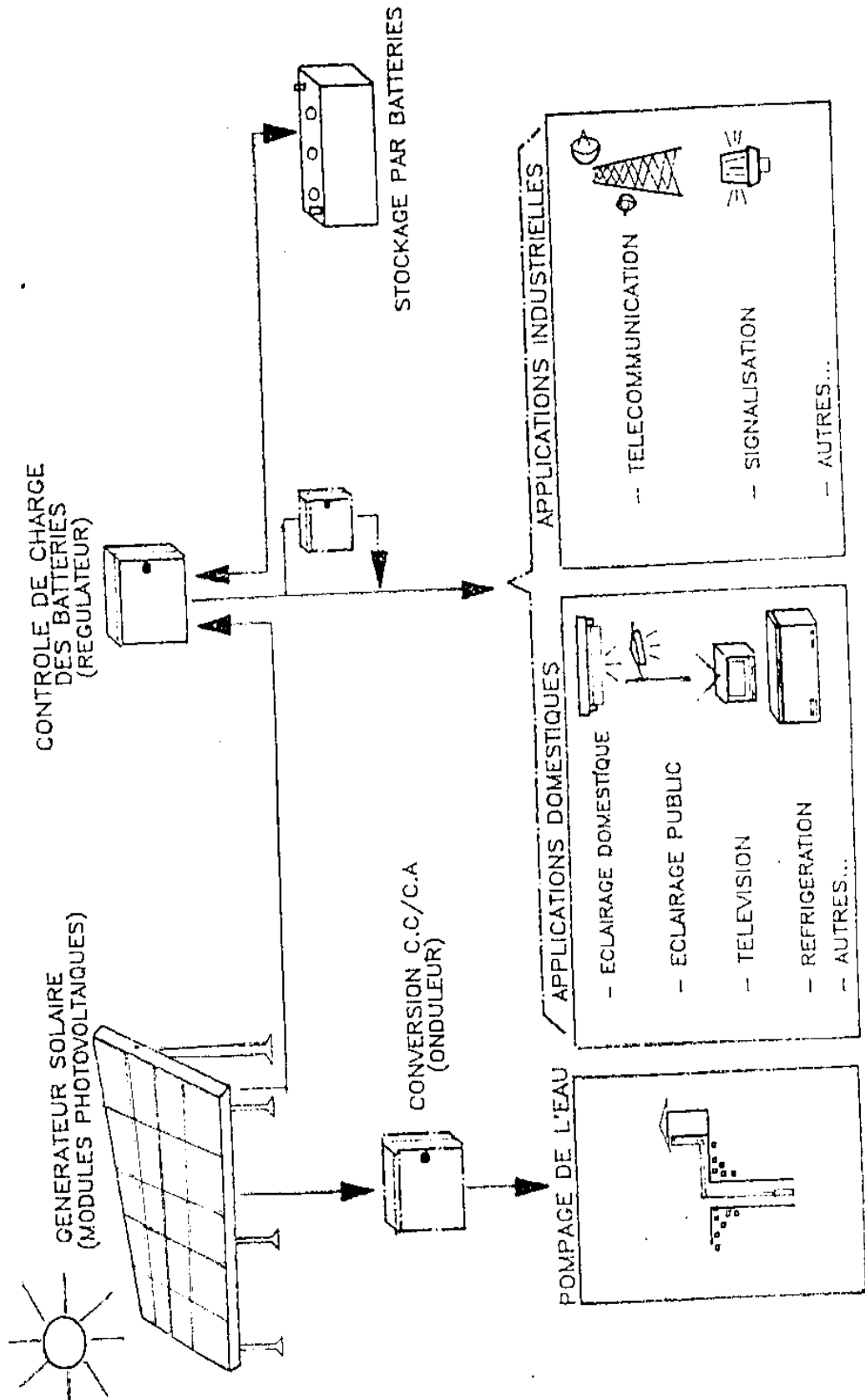


Fig. II.19 : L'énergie Solaire photovoltaïque et ses Applications [7]

Conclusion

Les différents paragraphes que nous avons présentés dans ce chapitre nous montrent l'importance de l'élément clé d'un système solaire qui est la cellule photovoltaïque, sa constitution, son principe de fonctionnement et les différents branchements qui existent.

Nous avons pu voir l'effet de la température et l'effet du flux solaire sur la caractéristique {Courant –Tension} et sur la caractéristique {Puissance –Tension} de la cellule photovoltaïque.

Les différentes applications des systèmes solaires se divisent en trois sortes, les systèmes au fil du soleil, les systèmes avec stockage et les systèmes hybrides qui connaissent de plus en plus une large application. En particulier en association avec les éoliennes et les systèmes hydrauliques.

Le rôle de l'ensoleillement est capital pour capter le maximum d'énergie, ceci fera l'objet de notre étude dans le chapitre suivant.

CHAPITRE III

ENSOLEILLEMENT ET METEOROLOGIE

CHAPITRE III

ENSOLEILLEMENT ET METEOROLOGIE

Notre planète se déplace autour du Soleil sur une trajectoire elliptique, appelée éclipse dont le soleil occupe un foyer au cours d'une année. En fait la distance qui les sépare varie de $\pm 1,69\%$ au cours de l'année du fait de la légère excentricité de l'orbite. Le soleil est une énorme sphère incandescente de plasma dont le diamètre atteint 1391 000 Km, situé à une distance voisine de 150 millions de kilomètres de la terre, sa température de cœur atteint 10^7k [21].

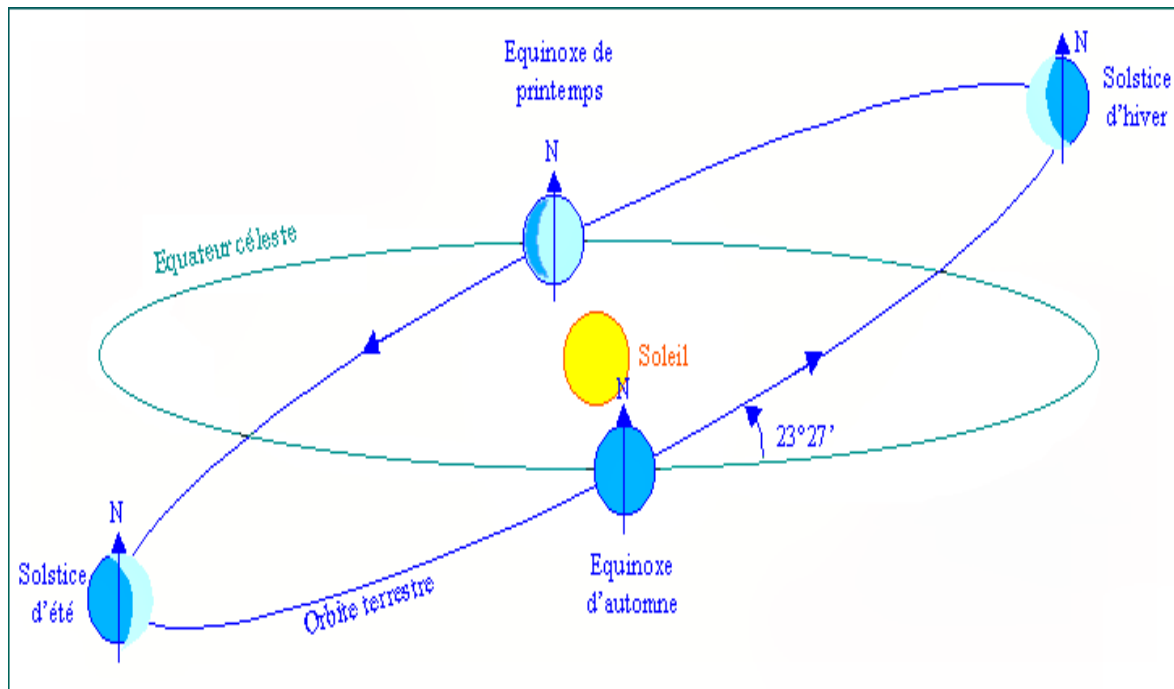


Fig.III.1 : L'orbite terrestre et les saisons [20]

La terre tourne sur elle-même autour de l'axe des pôles d'Est en Ouest toutes les vingt quatre heures. Rappelons que le plan équatorial est le plan diamétral (horizontal) perpendiculaire à l'axe des pôles. Les plans méridiens (verticaux) passent par l'axe des pôles, le méridien le plus important est le méridien de Greenwich. Le temps universel est défini par le temps solaire moyen du méridien de Greenwich [8].

L'axe de rotation de la Terre sur elle-même est incliné par rapport au plan de l'écliptique céleste. On appelle déclinaison δ l'angle formé par l'axe Terre-Soleil avec le plan équatorial. La déclinaison varie de $+23^\circ 27'$ solstice d'été (21 juin), à $-23^\circ 27'$ solstice d'hiver (23 décembre), elle s'annule deux fois par an les 21 mars et 23 septembre (ce sont les équinoxes) et elle est responsable des saisons. Les parties diurnes et nocturnes de la journée ont alors la même durée aux équinoxes la déclinaison passe par 0° ($-23^\circ 27' < \delta < +23^\circ 27'$) [8].

III.1 Référentiels spatiaux

Pour décrire le trajet du rayon solaire au point P de la surface de la terre, deux référentiels liés à la terre de centre C et au point P sont utilisés. les directions considérées sont PS rayon solaire et PC rayon terrestre.

1 -Le premier référentiel est le plan équatorial-central son origine est le centre de la terre C.

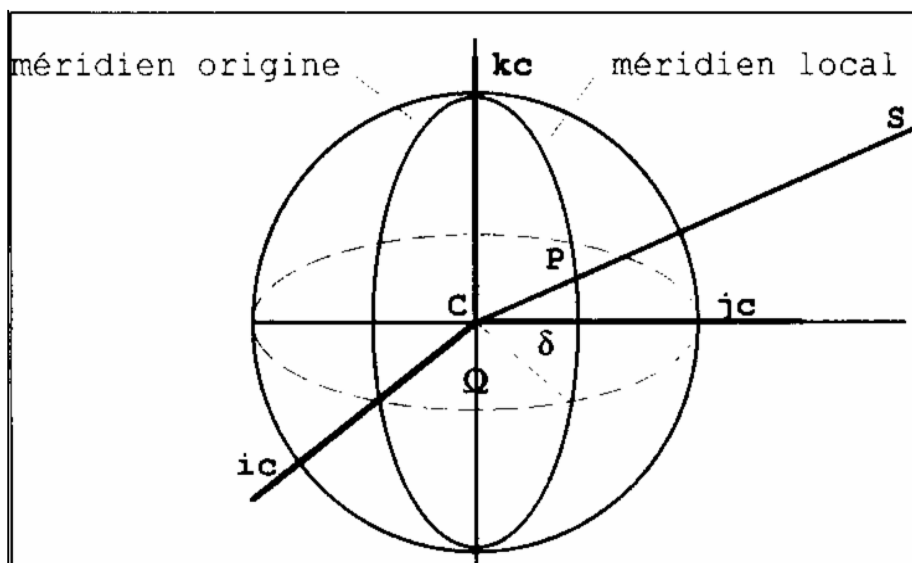


Fig.III.2 : Référentiel Equatorial central [12]

Les coordonnées géographiques d'un point P sont

- sa latitude $la(P)$, angle de CP avec le plan équatorial
- sa longitude $lg(P)$, angle du méridien passant par le point P (méridien local) avec le méridien origine (**ic, kc**)
- son altitude $z(P)$, est la distance du point P, sur CP, à la surface de référence.

Les trois vecteurs unitaires rectangulaires **ic**, **jc** et **kc** sont tels que :

- **ic** et **jc** sont dans le plan équatorial
- **ic** est dans le plan du méridien origine
- **kc** est dirigé selon l'axe des pôles vers le nord.

La droite CS fait avec le plan équatorial un angle de déclinaison δ . La projection de CS sur le plan équatorial fait l'angle Ω avec **ic** appelé angle horaire universel [12]. Cet angle est nul quand le rayon solaire est dans le plan (**ic, kc**) méridien origine (fig.III.2).

2 - Le deuxième référentiel le plus commode à utiliser est appelé **horizontal local** l'origine est au point P. Les trois vecteurs unitaires deviennent : **il**, **jl** et **kl**

- **kl** est selon la vertical au point P
- **il** est dans le plan horizontal à la direction du méridien local

La direction du rayon solaire PS fait les angles

- de zénith solaire θ_s avec **kl**
- de hauteur solaire H_s avec le plan horizontal
- d'azimut A avec **il**.

On rappelle que le zénith est le point du ciel au dessus de notre tête et l'azimut du soleil c'est l'angle entre la projection du rayon solaire sur le plan horizontal et la direction sud, ces angles seront repris avec plus de détails dans le chapitre 4.

III.2 Caractéristiques du rayonnement solaire

Le rayonnement solaire parvient au niveau de la terre après avoir parcouru une distance moyenne de $150 \cdot 10^6$ Km , il est constitué de photons aux trajectoires à peu près parallèles, la puissance de ce flux est d'environ 1367 W/m^2 .

Ce flux dit constante solaire varie légèrement au cours de l'année suivant les variations de la distance terre – soleil ($\pm 3\%$) [10].



Fig.III.3 : La constante solaire [41]

- **Rôle de l'atmosphère**

Cette énergie qui descend vers notre planète ne peut pas arriver sur la Terre en intégralité, elle va subir des transformations en traversant l'atmosphère.

En effet, l'atmosphère contient une majorité d'azote, d'oxygène, d'argon, de la vapeur d'eau et la couche d'ozone dont le rôle est de filtrer les ultra –violet, sans oublier les poussières et les nuages.

- **Masse d'air**

On appelle masse d'air ou Air Mass (AM) en anglais, le rapport entre l'épaisseur d'atmosphère traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol et l'épaisseur traversée à la verticale du lieu. Ou appelée dans certains ouvrages masse atmosphérique M_a .

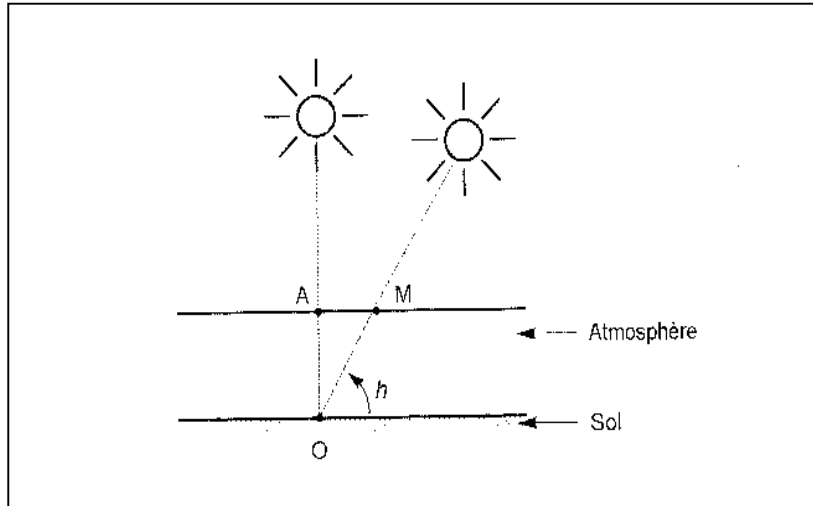


Fig.III.4 : Définition de l'Air Mass [20]

Cela dépend surtout de la hauteur h du soleil comme représentée dans la figure (3.4), à l'aide des points O, A et M. L'Air Mass est donc :

$$\frac{OM}{OA} = \frac{1}{\sin h} = M_a \quad (3.1)$$

Pour un soleil de hauteur h pas trop petite (en pratique $h > 12^\circ$), on classe donc les situations rencontrées en :

AM0 désigne la masse d'air hors atmosphère,

AM1 une atmosphère traversée verticalement (soleil au zénith), $M_a = 1$ et $h = 90^\circ$,

AM1.5 a été conventionnellement normalisé spectre de référence pour un rayonnement de 1KW/m^2 et une hauteur du soleil $h = 45^\circ$ [15].

III.3 Différentes composantes du rayonnement solaire

Le rayonnement Solaire appelé également rayonnement électromagnétique émis par le soleil est grandement perturbé par l'atmosphère. Ce qui ne permet que la réception au sol

des composants les plus importants et les plus actifs du rayonnement solaire total qui sont le rayonnement direct et le rayonnement diffus. L'albédo ou la partie réfléchi par le sol du rayonnement solaire global comme représentés dans la figure suivante :

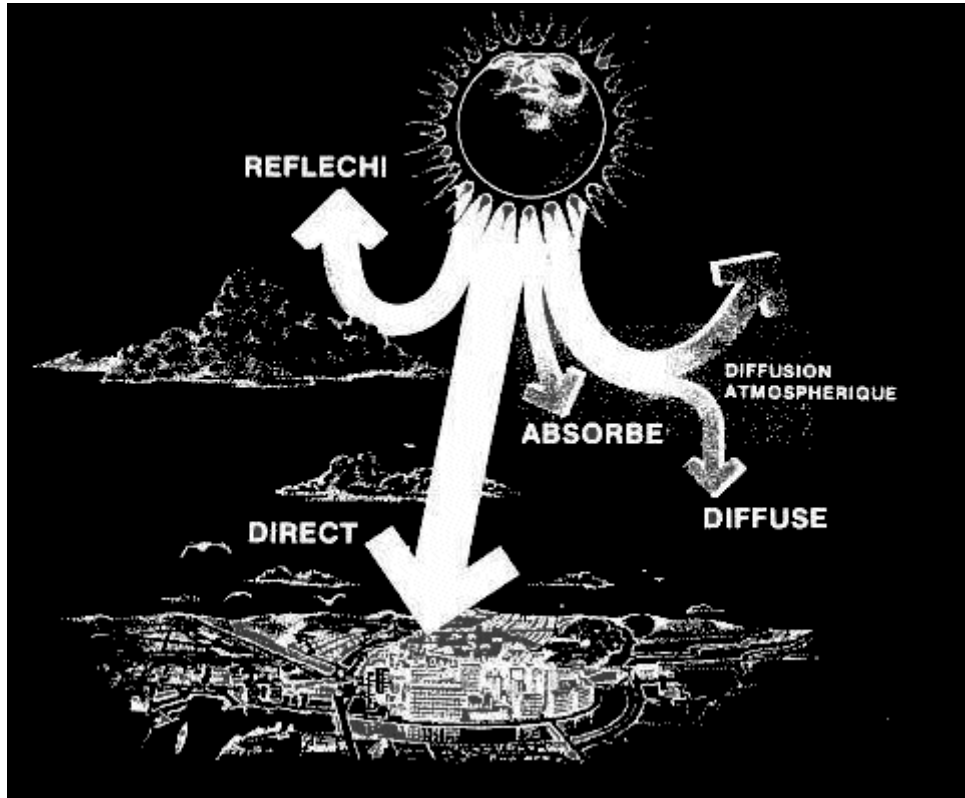


Fig.III.5 : Les différents composants du rayonnement solaire [13]

- **Rayonnement direct**

Le rayonnement direct est reçu directement du soleil c'est un flux uniforme de rayons parallèles entre eux et de puissance incidente I (W/m^2). C'est le flux des photons qui n'ont pas interagi avec les constituants de l'atmosphère et ont conservé une direction commune et leurs énergies propres.

- **Rayonnement diffus**

Parmi les photons qui ont interagi avec la couche d'atmosphère, certains ont été absorbés et d'autres ont subi un simple changement de direction (diffusion). Il s'agit donc de

la répartition d'un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions. Pour un élément plan considéré la composante diffuse D (W/m^2) provenant de toutes les directions est la plus difficile des composantes à calculer.

- **L'albédo**

Parvenant au sol, le rayonnement solaire n'est qu'en partie absorbé. On appelle albédo la fraction de rayonnement réfléchi par le sol, il dépend directement de la nature du sol (prairie, terre, désert). Le rayonnement réfléchi par le sol n'est évidemment à prendre en considération que pour les surfaces inclinées, comme le montre la figure suivante [8].

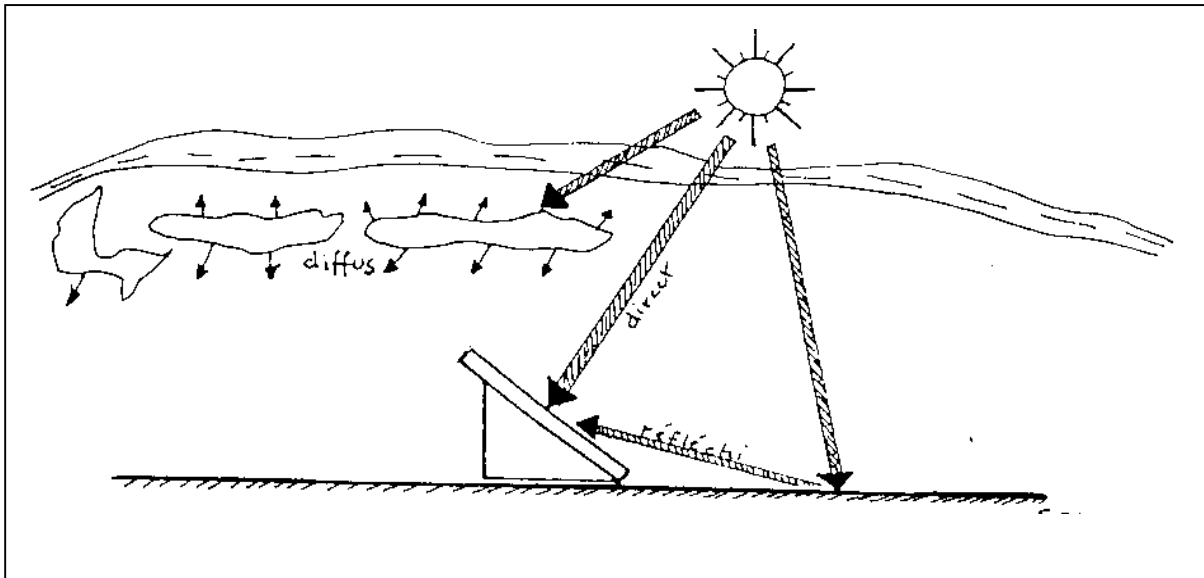


Fig.III.6 : Composants au Sol du Rayonnement Solaire [7]

- **Rayonnement Global**

Le rayonnement global est simplement la somme des composantes directe et diffuse. On distingue deux types de données d'ensoleillement :

- Rayonnement instantané : on considère les courbes de l'intensité du rayonnement en fonction de l'heure de la journée.

- Rayonnement cumulé : le cumul du rayonnement global par jour. Ce sont toutes les valeurs cumulées d'année en année et l'on en réalise avec des moyennes pour chaque mois de l'année.

- **Irradiation**

Plutôt que d'exprimer le rayonnement solaire en puissance, on préfère souvent raisonner en énergie reçue pendant un intervalle de temps : l'heure, la journée ; on emploie alors le terme d'irradiation horaire ou quotidienne.

III.4 Instruments de mesure du rayonnement solaire

-Durée d'insolation :

L'instrument le plus répandu est l'**héliographe**, il donne la durée d'insolation de la journée pendant laquelle le flux direct dépasse un certain seuil autour de 120W/m^2 .

-Mesure du Global :

L'instrument destiné à mesurer le rayonnement global (direct + diffus) est le pyranomètre. Le pyranomètre est en général associé à un intégrateur de sorte qu'on mesure des irradiances à un pas de temps qu'on fixe souvent à 1 heure.

-Mesure du Direct :

Le rayonnement direct est mesuré au moyen du **pyrhéliomètre**, cette mesure est la plus délicate car il faut suivre le parcours du soleil. Cet instrument est donc équipé d'un système qui suit le soleil dans ses déplacements.

-Mesure du Diffus :

Le rayonnement diffus est mesuré à l'aide d'un pyranomètre muni d'un dispositif d'occultation du rayonnement direct.

La mesure du rayonnement direct étant coûteuse et délicate, on effectue le plus souvent des mesures du diffus et on calcule le direct à partir du global et du diffus.

La modification du rayonnement solaire par l'atmosphère obéit en grande partie à des phénomènes aléatoires. Le flux lumineux reçu au niveau du sol à un instant donné dépend d'un grand nombre de paramètres :

- la latitude du lieu ou localisation géographique
- la saison, l'heure de la journée
- les conditions météorologiques (nébulosité, poussière, humidité, vent, température).

Prenons l'exemple de la variation de l'énergie solaire en fonction des heures d'ensoleillement : pour un plan fixe la courbe en bleu (G^*) et pour un plan mobile (motorisé) la courbe en vert (I^*+D^*) {[13], [18], [20], [21], [37]}.

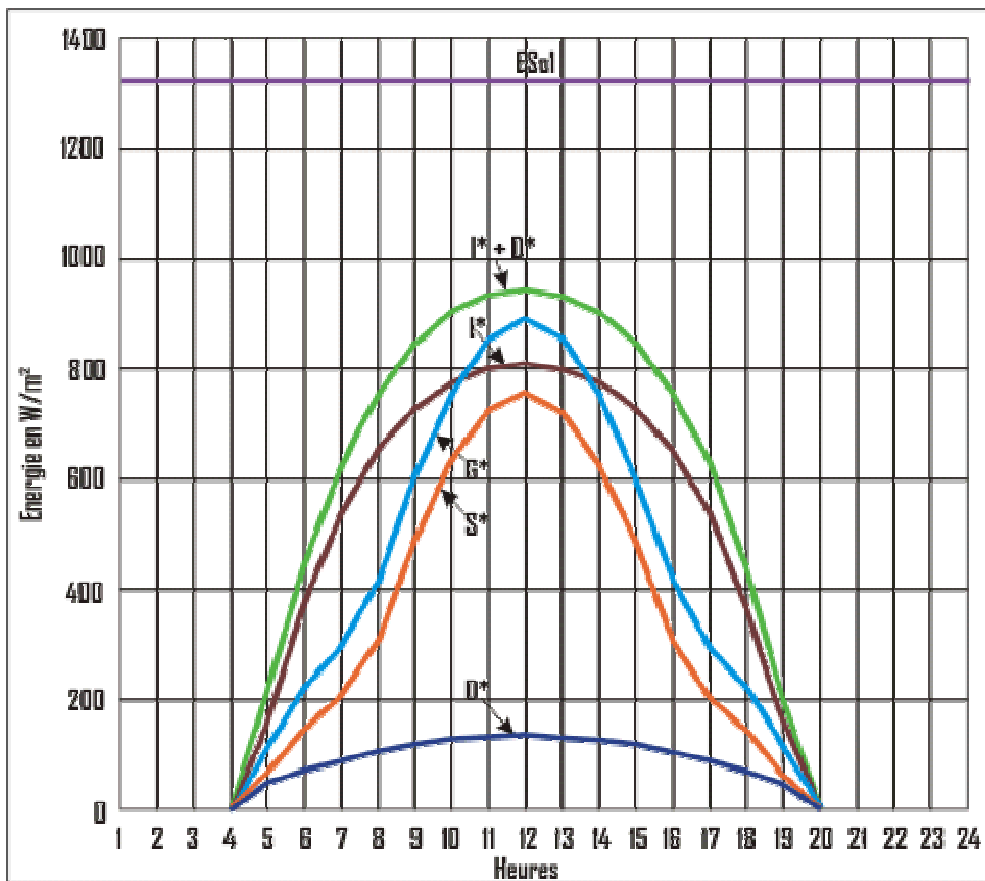


Fig.III.7 : Variation horaire de l'énergie solaire [37]

Les stations météorologiques existent depuis longtemps dans la plus part des pays, elles ont été équipées d'appareils de mesure du rayonnement solaire. La mission de ces stations est de fournir des informations sur les conditions climatiques.

Les satellites d'observation de la terre peuvent être équipés d'appareils mesurant le rayonnement diffusé par l'atmosphère dans des bandes de longueurs d'onde choisies. C'est le cas de Météosat, satellite stationnaire, qui observe l'Europe et une grande partie de l'Afrique. Son objectif est d'observer les grosses masses nuageuses pour améliorer les prévisions météorologiques [15].

III.5 Spectre Solaire

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

$$E = h\nu = \frac{hC}{\lambda} \quad (3.2)$$

Où E est l'énergie, h est la constante de Planck, ν la fréquence, C la vitesse de la lumière et λ la longueur d'onde.

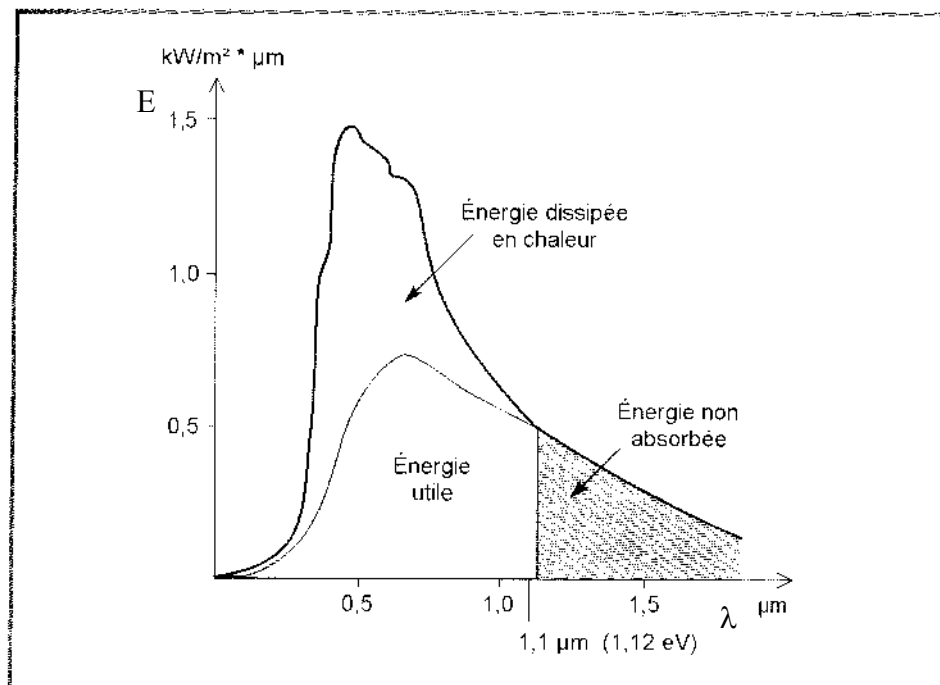


Fig.III.8 : Spectre Solaire [21]

L'énergie associée à ce rayonnement se décompose approximativement comme suit :

- 6.4 % de la puissance du spectre se situe dans l'ultraviolet (UV) de longueur d'onde ($0.2 < \lambda < 0.4 \mu\text{m}$)
- 48.0 % de la puissance dans le spectre visible ($0.4 < \lambda < 0.8 \mu\text{m}$)
- 45.6% de la puissance dans le proche infrarouge (IR) ($\lambda > 0.8 \mu\text{m}$) [21].

Exemple : le rayonnement de couleur verte a pour longueur d'onde $\lambda = 0.55 \mu\text{m}$, l'énergie du photon associé à cette longueur d'onde se calcule par : $E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$ avec E en électron-volt (eV) et λ en (μm) , nous obtenons $E = 1.24/0.55 = 2.25 \text{ eV}$.

La partie principale du rayonnement solaire est constituée par une gamme de longueur d'onde continue allant de 0.2 à 2.4 (μm), ce spectre est assez voisin de celui d'un corps noir à 5900°K. Le soleil est donc souvent assimilé à ce corps noir ce qui permet aux physiciens d'élaborer des modèles pour expliquer son comportement et ses émissions de rayonnement.

Conclusion

Les notions de base du mouvement de la terre autour du soleil ainsi que les caractéristiques du rayonnement solaire et le spectre solaire ont été présentées dans ce chapitre.

Nous avons constaté que le rayonnement solaire reçu au sol est fortement lié à la position du soleil. La mesure du rayonnement direct par le pyréliomètre qui doit être équipé d'un système de poursuite du soleil dans ces déplacements, reste la plus délicate des mesures du rayonnement solaire. Des formules empiriques ont été développées par les météorologistes sont des outils commodes pour calculer le rayonnement au sol direct ou diffus. C'est donc l'objectif du chapitre suivant, est de simuler une orientation suivant deux axes d'un panneau photovoltaïque suiveur, dans le but d'obtenir un meilleur rendement de puissance, nous devons maintenir notre panneau perpendiculaire aux rayons solaires durant les heures où le rayonnement solaire est maximale.

CHAPITRE IV
SIMULATION DE LA TRAJECTOIRE
DU SOLEIL

CHAPITRE IV

SIMULATION DE LA TRAJECTOIRE DU SOLEIL

Dans ce chapitre nous sélectionnons les équations théoriques qui nous permettent de réaliser l'algorithme de calcul du rayonnement global reçu par un panneau photovoltaïque monocristalin, pour des journées définies et des horaires précis.

L'objectif du programme de calcul est d'orienter le panneau perpendiculairement aux rayons solaires et de suivre le mouvement tracé par le soleil du levé au couché dans le but d'obtenir un rendement maximal.

IV.1 Mouvement Apparent du Soleil

Le repérage de la position du Soleil s'effectue par l'intermédiaire de deux angles :

- l'azimut α : c'est l'angle que fait la direction de la projection du soleil sur le plan horizontal avec la direction du sud, cet angle étant orienté positivement vers l'Ouest et varie de $[-90^\circ$ à $+90^\circ]$.

- la hauteur h du Soleil : c'est l'angle que fait la direction du soleil avec la projection sur un plan considéré [18].

Ces deux angles sont représentés sur la figure (IV.1).

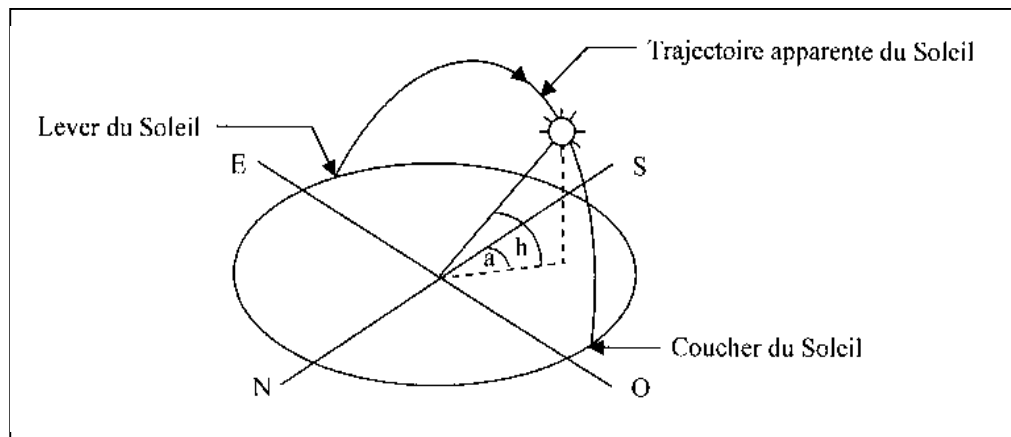


Fig. IV.1 : Mouvement apparent du soleil [18]

Ces deux angles sont fonction de :

- la latitude (L) du lieu considéré
- la date ou le numéro du jour de l'année (N)
- Temps solaire (TS) de la journée.

La latitude L et la date N servent à déterminer la trajectoire du Soleil et l'heure donne la position d'un point donné sur cette trajectoire.

L'angle de déclinaison (δ) formé par la direction du soleil avec le plan équatorial peut être calculé par la relation suivante [18] :

$$\delta = 23.45^\circ \sin [0.980^\circ (N + 284)] \quad (4.1)$$

On définit également l'angle horaire (ω), cet angle est compté positivement l'après-midi par :

$$\omega = 15^\circ (TS - 12) \quad (4.2)$$

IV.1.1 Heures et temps

La planète terre est divisée en fuseaux horaires distants de 15 degrés, mesurés à partir de la longitude 0 correspondant au temps universel (**T.U**) du méridien de **Greenwich**. Le temps légal (**TL**) c'est le temps adopté par un pays, il est lié au T.U par un nombre entier d'heures qui dépend de la longitude et des coutumes du pays (heure d'été, heure d'hiver).

Les zones des fuseaux horaires à l'Est de la zone 0 sont numérotés -1, -2, ...et ceux à l'Ouest +1, +2, ... Les relations se rapportant au mouvement du soleil utilisent le temps solaire vrai **TS** (ou local apparent time LAT), qui diffère généralement du temps légal TL du lieu considéré [18].

$$C = TL - TCF \quad (4.3)$$

Cette différence est liée entre l'heure légale TL, et l'heure civile du fuseau horaire TFC qui est égale au temps universel TU augmenté de la valeur du décalage horaire.

La variation de la vitesse de la terre sur sa trajectoire autour du Soleil introduit un terme correctif appelé équation du temps et noté **ET**, cet écart varie de ± 16 minutes au cours de l'année [18] :

$$ET = - \left[\begin{array}{l} 0.0002 - 0.4797 \cos(\omega' N) + 3.2265 \cos(2\omega' N) + 0.0903 \cos(3\omega' N) \\ + 7.3509 \sin(\omega' N) + 9.3509 \sin(2\omega' N) + 0.3361 \sin(3\omega' N) \end{array} \right] \quad (4.4)$$

Où : N Numéro du jour de l'année, $\omega' = 0.984$ et ET est l'équation du temps en minutes.

Le temps solaire TS se calcule finalement par la formule :

$$TS = TL \pm C + ET + \frac{(l_{ref} - l)}{15} \quad (4.5)$$

La différence de longitude ($l_{ref} - l$) entre le lieu considéré et le lieu servant de référence au temps légal en général le centre du fuseau horaire [18].

IV.2 Repérage de la position du soleil

Le repérage de la position du Soleil s'effectue par les deux angles l'azimut α et la hauteur h qui se calculent par les formules théoriques suivantes :

1- l'azimut α :

Trois cas peuvent se présenter : le panneau en position horizontale, le panneau incliné fixe et le panneau perpendiculaire suivant la trajectoire des rayons solaires.

Nous désirons dans notre étude d'orientation et de simulation de maintenir le panneau perpendiculaire aux rayons solaires.

Les rayons solaires forment un angle incident θ avec la normale au plan considéré, comme le montre la figure suivante :

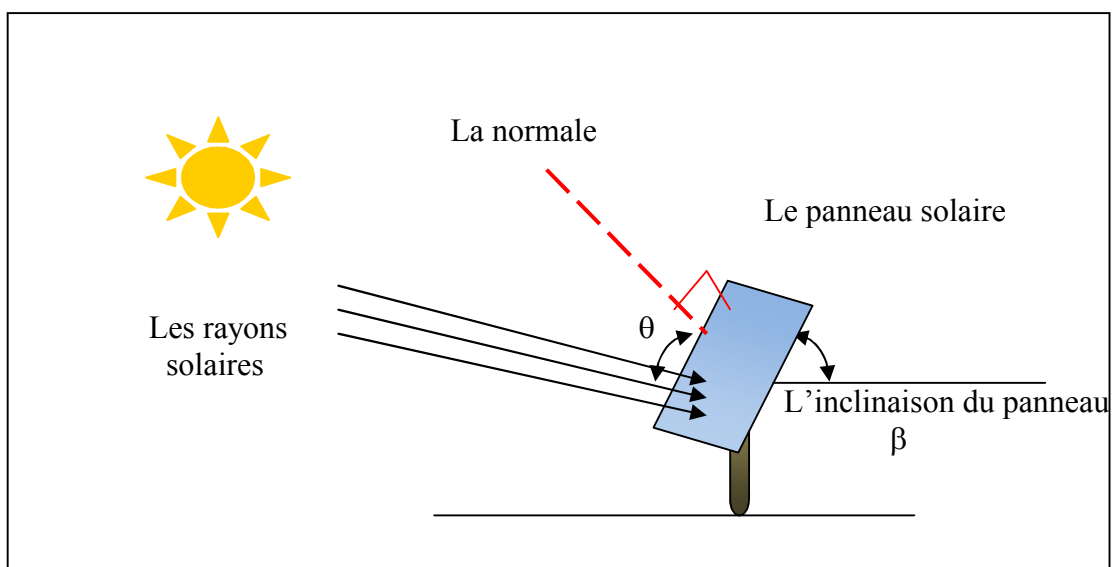


Fig. IV.2 : Les rayons Solaires sur un plan incliné

Le panneau est incliné d'un angle β , les rayons solaires arrivent avec une hauteur h , les deux angles doivent être complémentaires et former 90° . Nous devons incliner le panneau de telle sorte que les rayons solaires arrivent perpendiculairement sur la surface. Cela revient donc à annuler l'angle incident θ et à déterminer l'angle d'inclinaison du panneau β .

L'équation générale qui nous permet de calculer les angles (a, h) pour les différentes positions du panneau est **{[12], [19]}** :

$$\begin{aligned} \cos(\theta) = & \sin(L) \sin(\delta) \cos(\beta) - \cos(L) \sin(\delta) \sin(\beta) \cos(a) \\ & + \cos(L) \cos(\delta) \cos(\omega) \cos(\beta) + \sin(L) \cos(\delta) \sin(\beta) \cos(\omega) \cos(a) \\ & + \cos(\delta) \sin(\omega) \sin(\beta) \sin(a) \end{aligned} \quad (4.6)$$

- Cas d'un plan horizontal : l'inclinaison du panneau est nulle et l'équation (4.6) devient **{[12], [18], [19]}** ;

$$\sin(h) = \cos(\theta) = \sin(L) \sin(\delta) + \cos(L) \cos(\delta) \cos(\omega) \quad (4.7)$$

- Cas d'un plan perpendiculaire : l'équation (4.6) devient **[19]** ;

$$\begin{aligned} \cos(\theta) = & -\cos(L) \sin(\delta) \cos(a) + \sin(L) \cos(\delta) \cos(\omega) \cos(a) \\ & + \cos(\delta) \sin(\omega) \sin(a) \end{aligned} \quad (4.8)$$

Pour une poursuite du soleil suivant deux axes, avec le panneau orienté en permanence face au soleil, sous une incidence normale l'angle incident θ doit être nul **[19]**:

$$\cos(\theta) = 1 \quad (4.9)$$

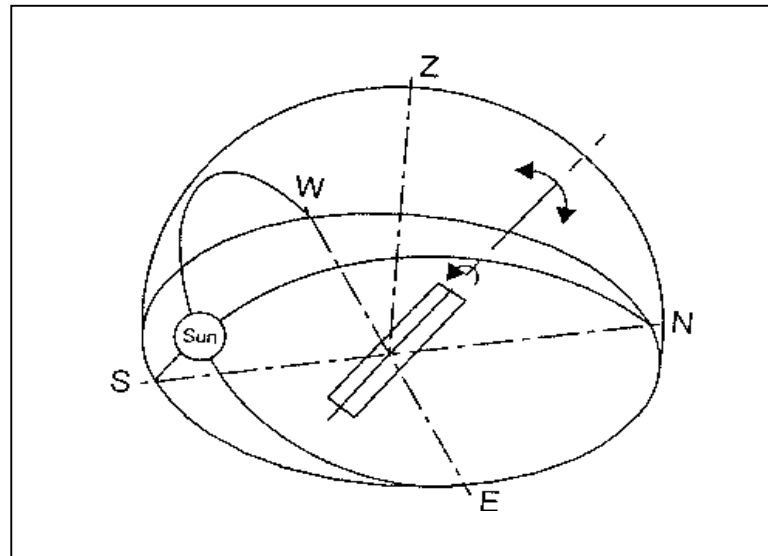


Fig. IV.3 : Poursuite du soleil suivant deux axes [19]

Ce qui nous amène à résoudre deux équations non linéaires (4.7) et (4.8) pour les différentes valeurs de l'angle horaire ω . Au moyen du programme réalisé sous matlab et avec le choix des conditions initiales nous obtenons ainsi les valeurs de l'azimut du soleil (a).

2- La hauteur h :

La hauteur du soleil h peut alors se déduire par la relation suivante {[12], [18], [19]} :

$$\sin(a) = \frac{\cos(\delta) \sin(\omega)}{\cos(h)} \quad (4.10)$$

h est déterminé par :

$$h = \arccos\left(\frac{\cos(\delta) \sin(\omega)}{\sin(a)}\right) \quad (4.11)$$

3- L'inclinaison du panneau β :

L'inclinaison du panneau se détermine finalement par la relation {[12], [19]} :

$$\beta = 90 - h \quad (4.12)$$

IV.3 Calcul du rayonnement solaire

Le manque de données sur les constituants de l'atmosphère ne permet pas de calculer avec précision le rayonnement au sol. Des formules empiriques développées par les météorologistes restent des outils commodes pour évaluer le rayonnement au sol, elles ont besoin d'être validées dans certains cas par des mesures expérimentales. La démarche à suivre pour calculer le rayonnement au sol est :

IV.3.1 Calcul du rayonnement solaire direct sur un plan récepteur perpendiculaire, sur un plan incliné fixe et sur un plan horizontale

IV.3.1.1 Rayonnement solaire direct sur un plan incliné

Le rayonnement direct est celui qui traverse l'atmosphère sans subir de modifications, il est possible de l'estimer par la formule suivante [18]:

$$S = F * C_1 \quad (4.13)$$

où F est le flux incident reçu sur une surface face aux rayons solaires et peut être évalué par :

$$F = E_{sol} \exp(-T_L / (0.9 + 9.4 \sin(h))) \text{ [w/m}^2\text{]} \quad (4.14)$$

avec $E_{sol} = 1370 \text{ w/m}^2$ et T_L le facteur de trouble de Linke défini comme suit :

$$T_L = 2.4 + 14.6B + 0.4(1+2B)\ln(P_v)$$

Où B est le coefficient de trouble atmosphérique qui prend une des valeurs :

$B = 0.02$ pour un lieu situé en montagne

$B = 0.05$ pour un lieu rural

$B = 0.10$ pour un lieu urbain

$B = 0.20$ pour un lieu industriel (atmosphère polluée)

P_v est la pression partielle de vapeur d'eau , qui se calcule par :

$P_v = P_{vs} * HR$ avec P_{vs} la pression de vapeur saturante, HR le taux moyen d'humidité relative et :

$P_{vs} = 2.165 * (1.098 + T/100)^{8.02}$ où T est la température de l'air en °C.

C_i étant le coefficient d'orientation, c'est l'angle formé par le rayonnement solaire avec la perpendiculaire d'une surface. Ce coefficient est défini d'une part par la hauteur du soleil (h) et son azimut (a) et d'autre part par l'orientation (o) figure (IV.4) et l'inclinaison (β) du plan récepteur. L'orientation (o) est négative vers l'Est, positive vers l'Ouest et nulle vers le sud. Le calcul du coefficient d'incidence C_i est obtenu par la formule suivante [37] :

$$C_i = \sin(\beta) * \cos(h) * \cos(o - a) + \cos(\beta) \sin(h) \quad (4.15)$$

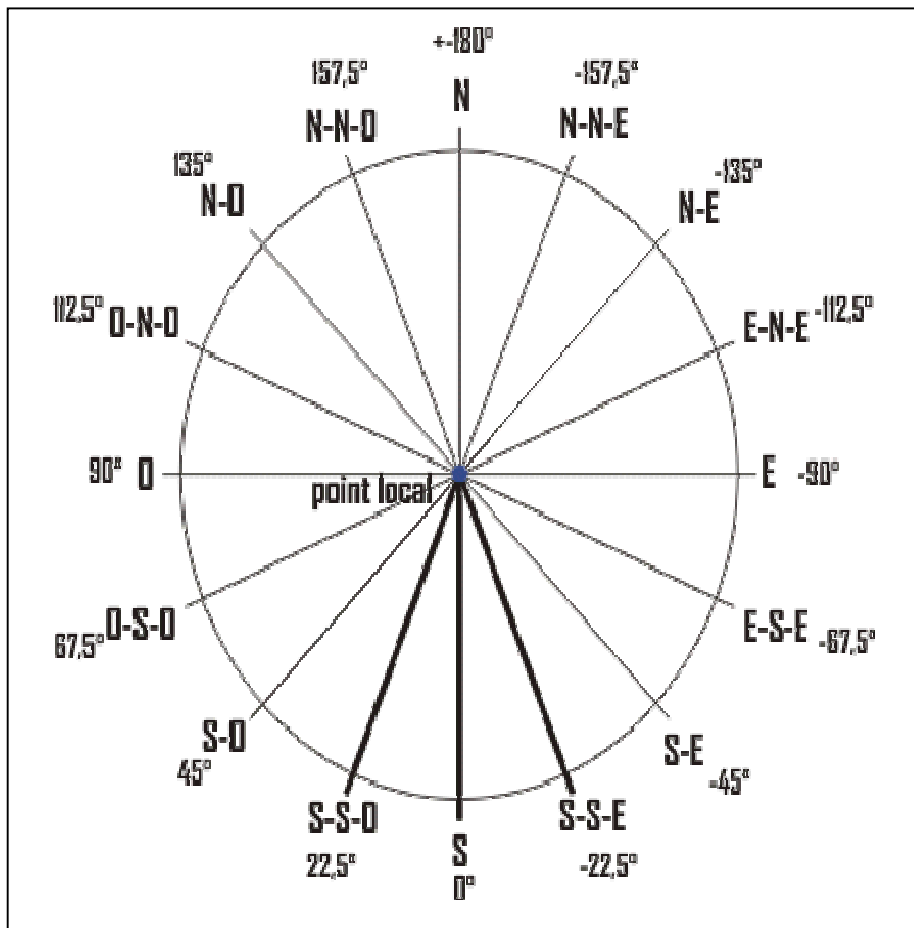


Fig. IV.4 : La rose d'orientation [37]

Nous avons en traits gras les orientations qui sont les plus favorables sur la rose d'orientation.

Pour calculer le rayonnement solaire sur un plan incliné fixe, les angles d'inclinaison (β) et d'orientation (α) sont choisis suivant le cas étudié et remplacés dans l'équation (4.15). Le calcul du rayonnement solaire incliné fixe est un cas particulier du calcul du rayonnement solaire pour un plan perpendiculaire orienté à la poursuite des rayons solaires calculé par (4.13) et (4.14).

IV.3.1.2 Rayonnement solaire direct sur un plan horizontal

Le rayonnement solaire direct reçu sur un plan horizontal peut être déterminé par {[12], [15], [18]}:

$$S = F * \sin(h) \quad (4.16)$$

avec $\sin(h)$ évalué par (4.7).

IV.3.2 Calcul du rayonnement diffus

IV.3.2.1 Calcul du rayonnement diffus sur un plan incliné

Le rayonnement solaire diffus D arrive sur le plan récepteur incliné après avoir été diffusé par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère, il n'a pas de direction privilégiée, de ce fait, l'orientation du plan (l'azimut) n'a pas d'importance, seule son inclinaison en α .

Ainsi sur un plan récepteur d'inclinaison (β), D se calcule [37] :

$$D = 125 * \sin(h)^{0.4} * ((1 + \cos(\beta)) / 2) + 211.86 \sin(h)^{1.22} * ((1 - \cos(\beta)) / 2) \quad [\text{W/m}^2] \quad (4.17)$$

Le rayonnement diffus pour un plan incliné fixe est un cas particulier du rayonnement diffus pour un plan incliné mobile, l'inclinaison (β) doit être prédéfinie.

IV.3.2.2 Calcul du rayonnement diffus sur un plan horizontal

Le rayonnement solaire diffus sur un plan horizontal peut être déterminé par [18] :

$$D = 54.8 \sqrt{\sin(h)} \left[T_L - 0.5 - \sqrt{\sin(h)} \right] \quad (4.18)$$

Où T_L est le facteur de trouble de Linke calculé par la formule (4.14).

IV.3.3 Calcul du rayonnement global

Le rayonnement global est la somme de ces deux rayonnements direct et diffus :

$$G = S + D \quad (4.19)$$

Le rayonnement global G est le rayonnement maximal qu'il est possible d'avoir sur un plan récepteur incliné ou fixe en négligeant le rayonnement réfléchi.

IV.3.4 Calcul de la puissance et du rendement du module photovoltaïque

On appelle puissance ($P(W)$) d'un module photovoltaïque le produit de la tension et du courant pouvant être extraite du module PV :

$$P_{\text{électrique}} = I * V \text{ (W)} \quad (4.20)$$

Où I et V sont le courant et la tension de la cellule PV qui sont évalués par les équations (2.2) et (2.3).

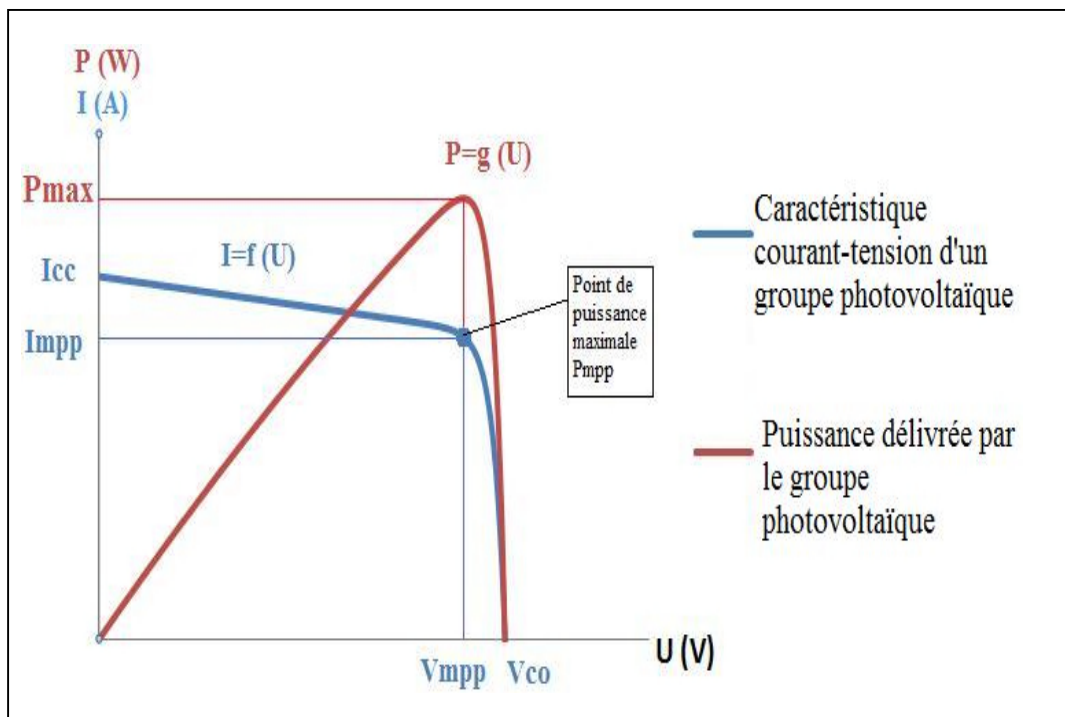


Fig. IV.5 : Caractéristique courant –tension $I=f(U)$ et puissance $P=g(U)$ délivrée par le module photovoltaïque [46]

On appelle rendement $\eta(\%)$ du panneau photovoltaïque le rapport de la puissance électrique pouvant être extraite sur le produit du rayonnement solaire incident P (W/m^2) et de la surface S (m^2) du panneau photovoltaïque {[15], [21], [34], [38]} :

$$\eta = \frac{P_{\text{électrique}}}{P_{\text{solaire incidente}} * S} \% \quad (4.21)$$

Le point de puissance maximale (figure IV.5) est le point d'extraction de puissance (le point de fonctionnement de la cellule). Ce point est associé à une tension maximale (U_m) et à un courant maximal (I_m). Il est connu par le MPPT qui est l'abréviation de "Maximal Power Point Tracking", qui signifie en français "Recherche du Point de Puissance Maximum", le point de puissance maximum d'un module photovoltaïque correspond au couple courant-tension générant le maximum de puissance électrique (Illustrée dans la figure IV.5).

La courbe de la figure IV.5 montre bien la relation courant-tension d'un module solaire PV. Lorsque le module travaille dans sa caractéristique optimale la puissance est maximale, mais dès que le point (I_m, V_m) est dépassé, c'est le courant qui s'écroule très rapidement, ceci quel que soit l'ensoleillement. La partie intéressante de la caractéristique courant –tension est celle qui génère de l'énergie, donc ni au point de tension de circuit ouvert ni au point de court circuit, la puissance qui n'est que le produit courant tension pour ces deux points serait nulle.

IV.4 Algorithme de calcul de la puissance d'un panneau PV

Les jours choisis de l'année sont :

Le 21 mars, le 21 juin, le 1 août, le 21 septembre et le 21 décembre, où la terre passe par les points critiques de sa trajectoire autour du soleil.

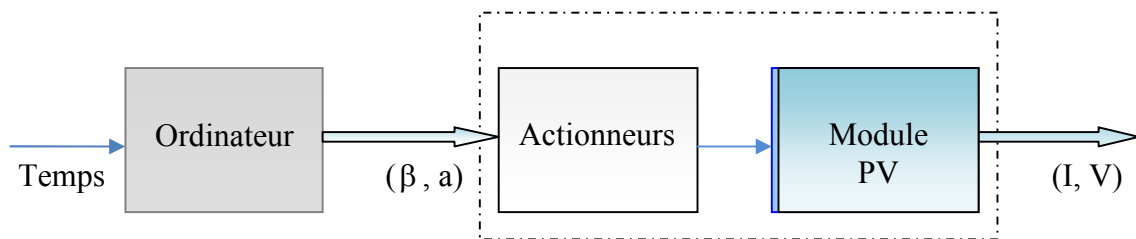


Fig. IV.6: Schéma de principe élémentaire du système de commande d'un module PV

Le schéma de principe du système comprend un ordinateur pour exécuter l'algorithme de calcul pour la détermination des angles (azimut, hauteur et inclinaison), et l'ensemble actionneurs et module photovoltaïque. Les actionneurs peuvent être des moteurs pas à pas pour l'orientation du module PV.

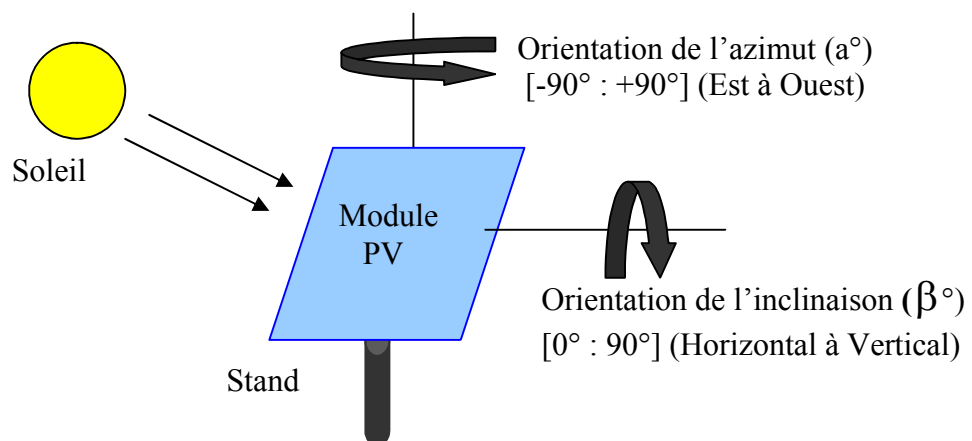


Fig. IV.7: Rotation du Module PV suivant deux axes l'azimut et l'inclinaison

IV.4.2 L'algorithme de calcul de la puissance d'un panneau PV pour trois positions:

L'algorithme de calcul du rayonnement global et de la puissance d'un module photovoltaïque dont les caractéristiques sont spécifiées dans le tableau (IV.2) est :

Le lieu choisi est la Wilaya de **Boumerdès** dont les coordonnées géographiques sont :

La Latitude est : $L = 36.76^\circ$ Nord

La longitude est : $l = 3.70^\circ$ Est

- **Début du programme**

- Choix des jours (N° du jour de l'année)
- Choix de la Température du jour
- Calculer l'angle de déclinaison ($\delta = \text{delta}$) par l'équation (4.1)
- Calculer l'équation du temps ET par l'équation (4.4)
- Fixer les heures de suivi soit le temps légal
- Calculer le temps solaire vrai TS par l'équation (4.5)
- Calculer l'angle horaire ω par l'équation (4.2)

- **1^{er} cas étudié : Panneau perpendiculaire**

- Calculer l'azimut du soleil a par l'équation (4.8)
- Tracer l'azimut a
- Calculer la hauteur h du soleil par l'équation (4.11)
- Tracer la hauteur h
- Calculer l'angle d'inclinaison du panneau ($\beta = \text{bêta}$)
- Tracer l'inclinaison du panneau β
- Calcul du rayonnement Direct S par l'équation (4.13)
- Calcul du rayonnement Diffus D par l'équation (4.17)
- Calcul du rayonnement Global G par l'équation (4.19)
- Tracer les rayonnements S , D et G
- Calcul du courant par l'équation (2.3)
- Calcul de la tension par l'équation (2.4)
- Calcul de la caractéristique $I(V)$ par l'équation (2.6)
- Tracer de la caractéristique $I(V)$

- Calcul de la puissance par l'équation (4.20)
- Tracer de la puissance

- **2^{ème} cas étudié : Panneau incliné fixe**
- Calculer la hauteur h du soleil par l'équation (4.11)
- Calcul du rayonnement Direct S par l'équation (4.13)
- Calcul du rayonnement Diffus D par l'équation (4.17)
- Calcul du rayonnement Global G par l'équation (4.19)
- Tracer les rayonnements S , D et G
- Calcul du courant par l'équation (2.3)
- Calcul de la tension par l'équation (2.4)
- Calcul de la caractéristique $I(V)$ par l'équation (2.6)
- Tracer de la caractéristique $I(V)$
- Calcul de la puissance par l'équation (4.20)
- Tracer de la puissance

- **3^{ème} cas étudié : Panneau horizontal**
- Calculer la hauteur h du soleil par l'équation (4.7)
- Calcul du rayonnement Direct S par l'équation (4.16)
- Calcul du rayonnement Diffus D par l'équation (4.18)
- Calcul du rayonnement Global G par l'équation (4.19)
- Tracer les rayonnements S , D et G
- Calcul du courant par l'équation (2.3)
- Calcul de la tension par l'équation (2.4)
- Calcul de la caractéristique $I(V)$ par l'équation (2.6)
- Tracer de la caractéristique $I(V)$
- Calcul de la puissance par l'équation (4.20)
- Tracer de la puissance
- **Fin du programme.**

Nous présentons les résultats obtenus sous forme de tableaux récapitulatifs et de courbes obtenues pour chaque cas étudié.

IV.5 Tableaux et Courbes des résultats de calculs

Nous présentons le premier tableau de calculs qui récapitule pour chaque jour :

Le numéro du jour par rapport aux jours de l'année, la température, la déclinaison de la terre et l'équation du temps.

Jour/mois	21 Mars	21 Juin	1 Août	21 Septembre	21 Décembre
Jour/année	81	173	213	265	356
T°(C)	20	25	30	25	15
δ° (dgr)	-0.94	18.62	18.72	0.81	-23.32
δ (rd)	-0.0319	0.4042	0.3335	0.0375	-0.4021
ET (mn)	-7.35	-1.35	-6	+6	+4

Tableau IV.1 : Résultats de calculs

Le module utilisé pour la simulation théorique des programmes de calculs est le module PWX 500 multicristallin, commercialisé par PHOTOWATT international filiale de Matrix Solar Technologies, répondant aux spécifications techniques suivantes :

Tension à puissance maximale	17	V
Courant à puissance maximale	2.80	A
Tension de circuit ouvert	21.6	V
Courant de court-circuit	3.05	A

Tableau IV.2 : Caractéristiques du Module Photovoltaïque

IV.5.1 Résultats obtenus pour la journée du 21 Mars

Nous constatons d'après la figure IV.8 que les rayons solaires arrivent avec un angle de hauteur de 53 degrés à 13 heures, l'inclinaison du panneau correspondante est de 37 degrés et l'azimut est de -3 degrés.

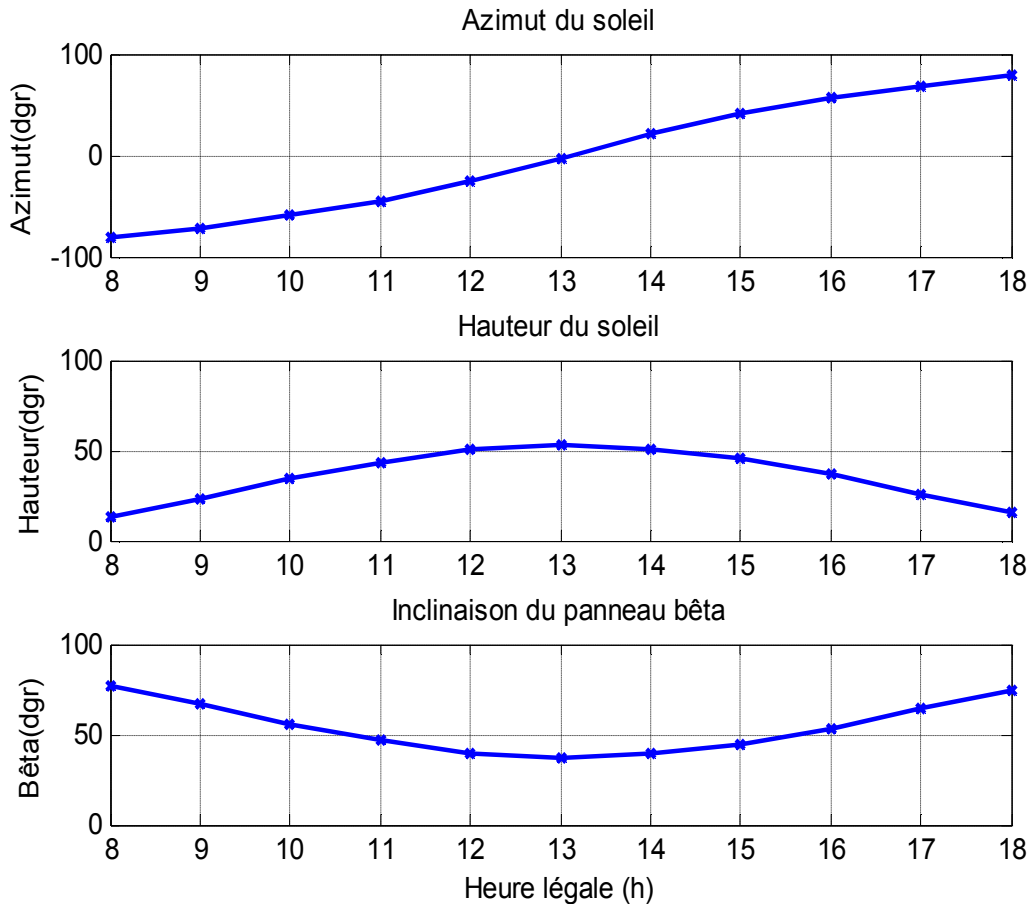


Fig. IV.8: Variation de l'azimut du soleil (a), de la hauteur du soleil (h) et de l'inclinaison du panneau bêta β le 21 mars

Les courbes d'éclairement de la journée du 21 Mars, nous montrent que le flux solaire global reçu sur un plan normal (GN figure IV.9) atteint 960 (W/m^2) à 13 heures, il atteint 878 (W/m^2) sur un plan incliné à 37 degrés (GF figure IV.10) et il atteint 768 (W/m^2) sur un plan horizontal (GF figure IV.11).

La figure IV.12 présente les courbes du global sur plan normal, global sur plan incliné fixe et global sur plan horizontal tracées dans le même graphique. Ce qui nous permet de comparer les trois courbes pour les trois cas étudiés et de constater que le flux solaire est maximal pour la position normale.

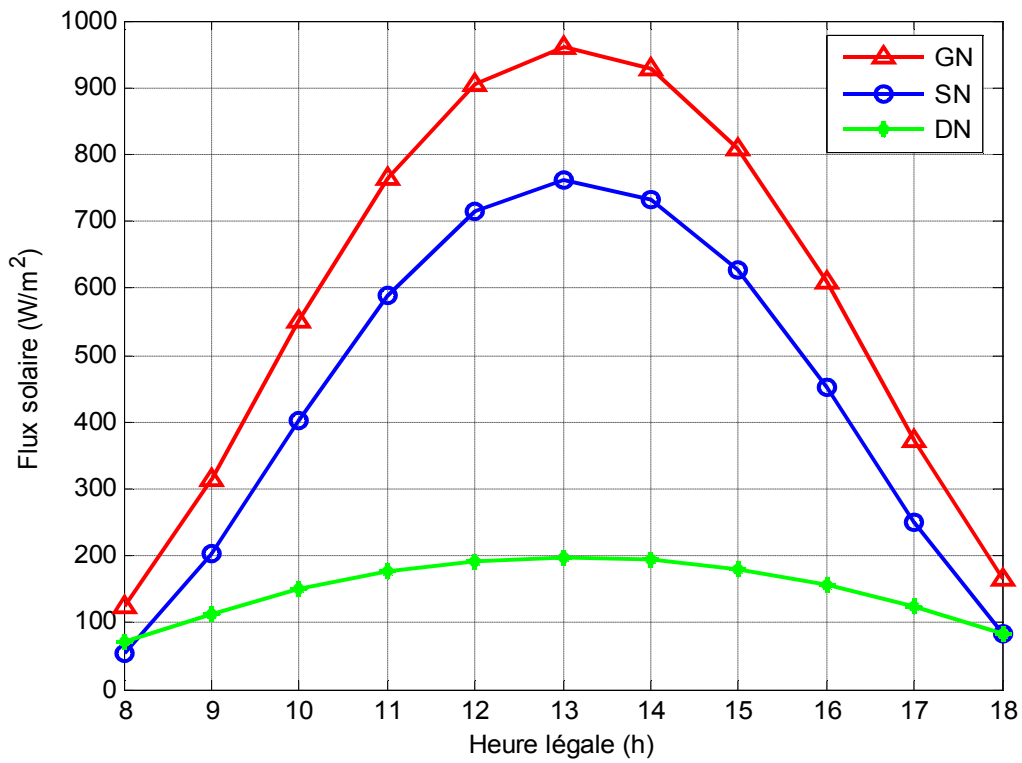


Fig. IV.9: Variation de l'éclairement du 21 mars sur plan normal
 GN : global normal, SN : direct normal et DN : diffus normal

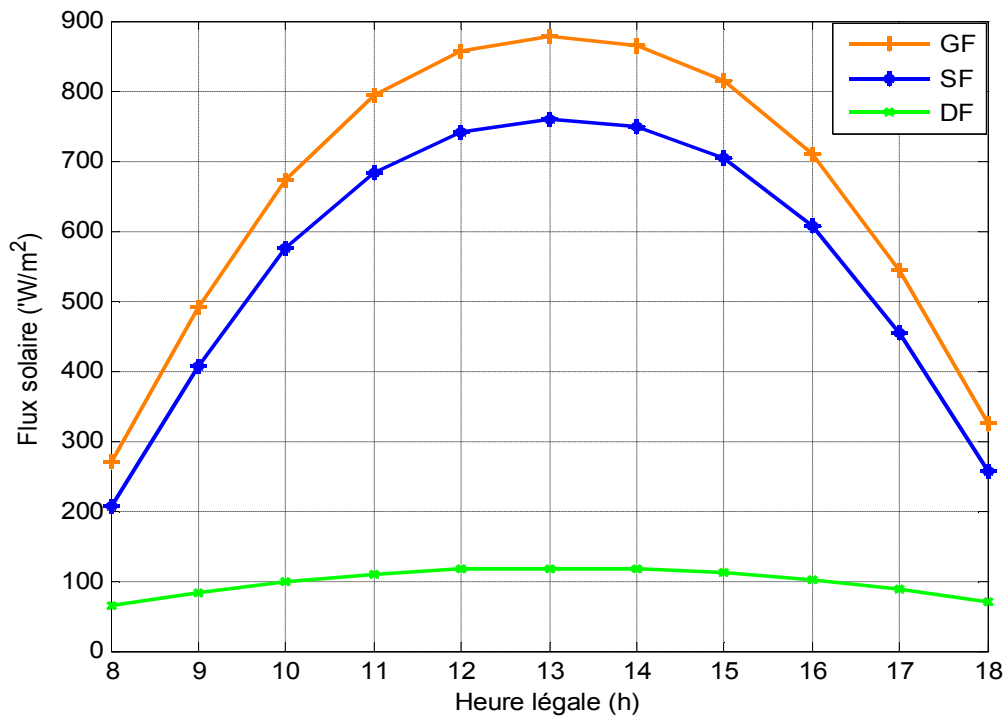


Fig. IV.10: Variation de l'éclairement du 21 mars sur plan fixe incliné à 37 degrés
 GF : global fixe, SF : direct fixe et DF : diffus fixe

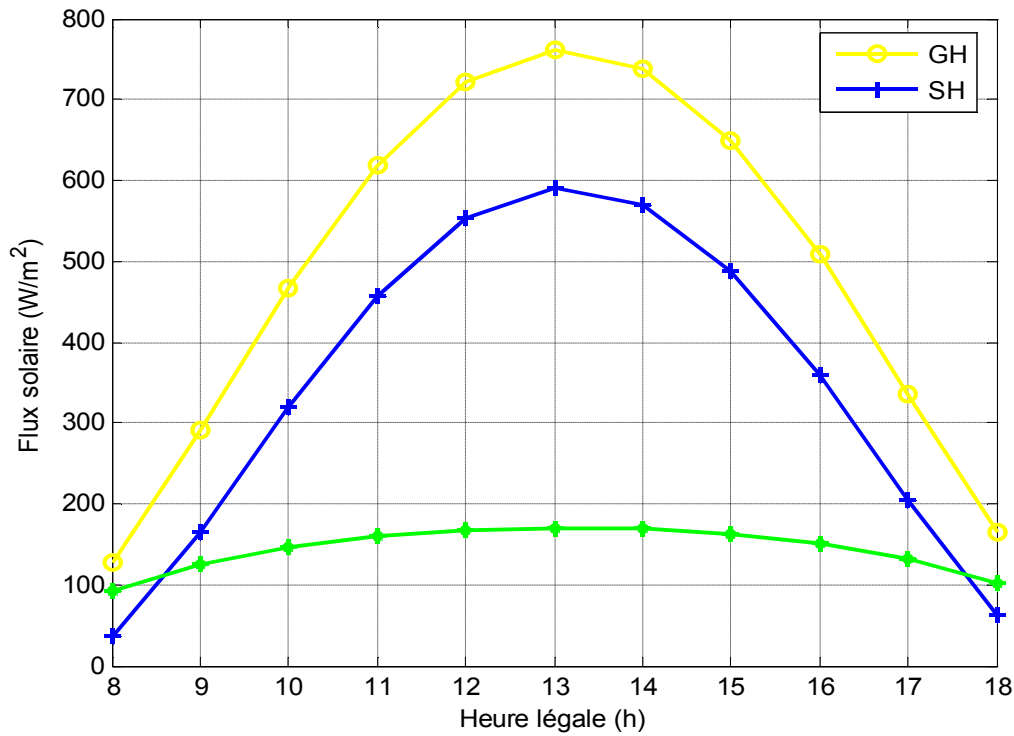


Fig. IV.11: Variation de l'éclairement du 21 mars sur plan horizontal
 GH : global horizontal, SH : direct horizontal et DH : diffus horizontal

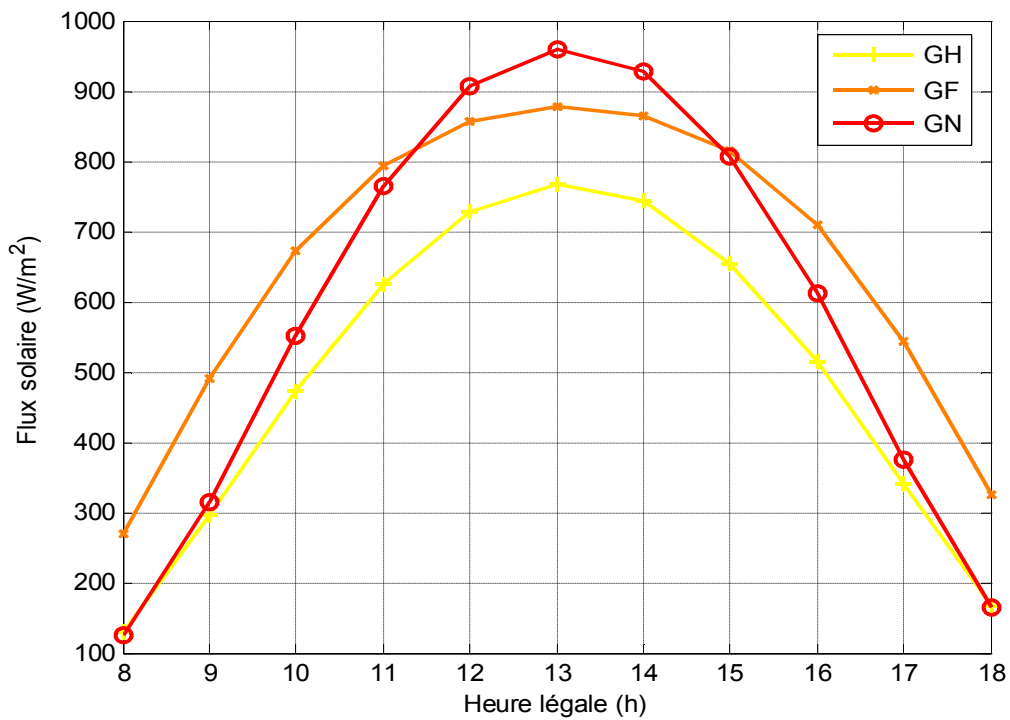


Fig. IV.12: Variation de l'éclairement du 21 mars sur plan horizontal
 GH (courbe jaune), plan fixe GF (courbe orange) et plan normal GN (courbe rouge)

La figure IV.13 nous permet de voir l'influence du rayonnement solaire sur la caractéristique courant-tension $I(V)$ du module photovoltaïque, en particulier sur le courant de court circuit qui varie directement avec la variation du rayonnement solaire. Alors que la tension de court circuit ne varie que très faiblement pour les trois cas étudiés.

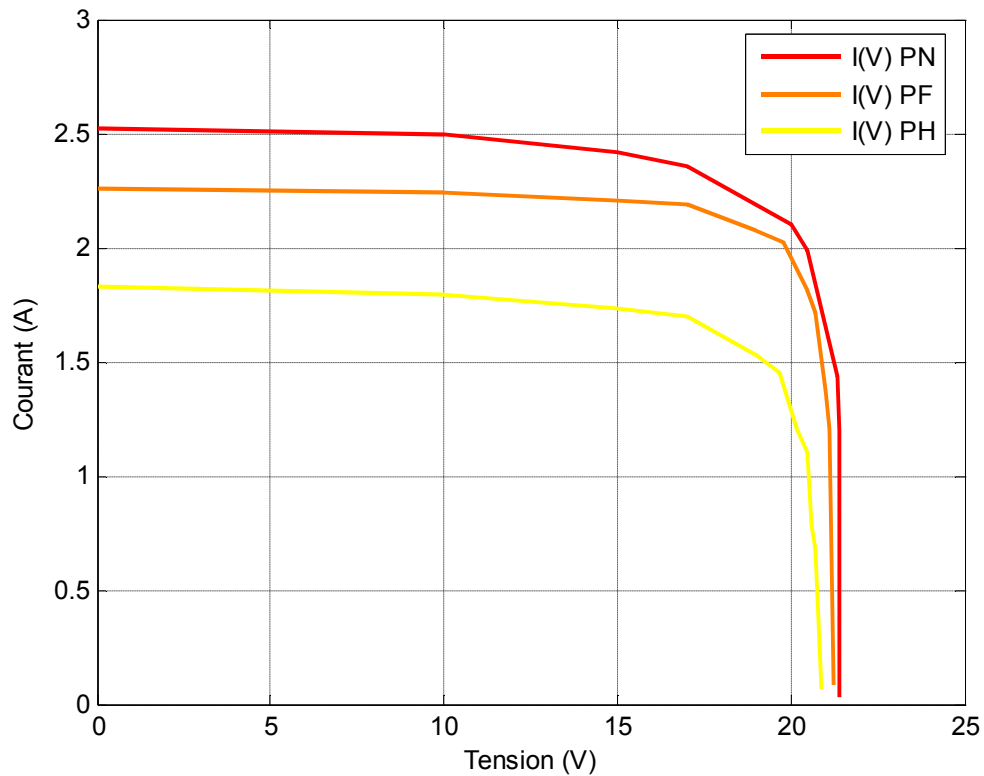


Fig. IV.13 : Variation de la caractéristique courant-tension $I(V)$ du panneau PV le 21 mars pour les trois positions normale (PN), inclinée fixe (PF) et horizontale (PH) sur le même graphique

La figure IV.14 nous montre la variation de puissance en fonction de la tension, elle atteint 42 W pour la position perpendiculaire, 40 W pour la position inclinée fixe et 29 W pour la position horizontale. Nous constatons que la puissance est maximale pour la position perpendiculaire.

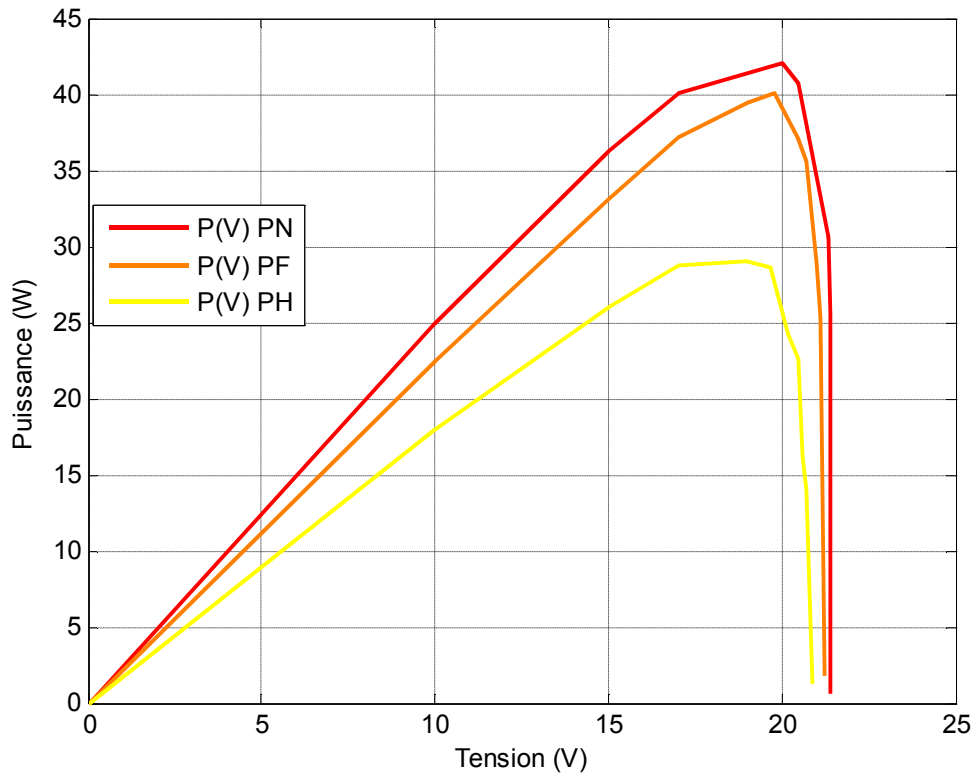


Fig. IV.14: Variation de la puissance $P(V)$ du panneau PV le 21 mars pour les trois positions normale (PN), inclinée fixe (PF) et horizontale (PH) sur le même graphique

IV.5.2 Résultats obtenus pour la journée du 21 Juin

Les rayons solaires atteignent la hauteur maximale de 72° à 13 heures, l'inclinaison du panneau doit être de 18° et l'azimut est de l'ordre de -1.2° comme nous le montre la figure IV.15.

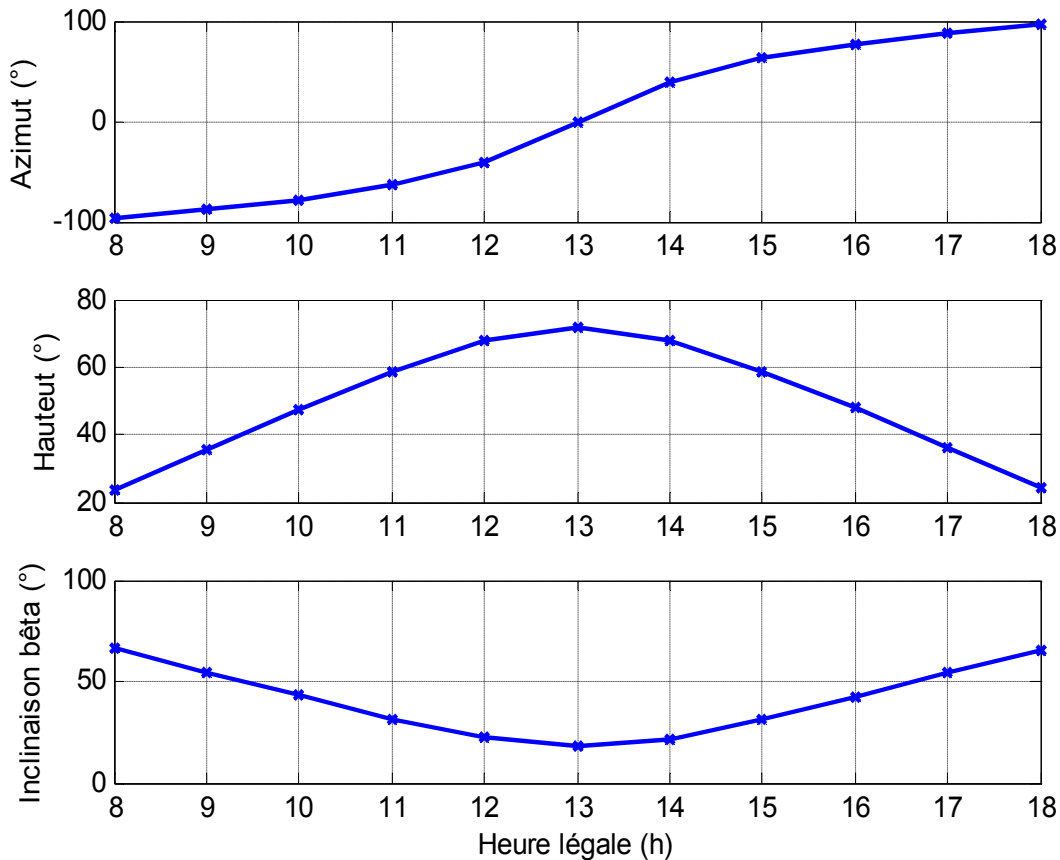


Fig. IV.15 : Variation de l'azimut du soleil (a), de la hauteur du soleil (h) et de l'inclinaison du panneau β le 21 juin

La variation du rayonnement solaire de la journée du 21 juin, nous montrent que le flux solaire globale reçu sur un plan normal (GN figure IV.16) atteint $1044(\text{W}/\text{m}^2)$ à 13 heures, il atteint $943(\text{W}/\text{m}^2)$ sur un plan incliné à 18 degrés (GF figure IV.17) et il atteint $960(\text{W}/\text{m}^2)$ sur un plan horizontal (GF figure IV.18).

La figure IV.19 nous montre les courbes du global sur plan normal, global sur plan incliné et global sur plan horizontal tracées dans le même repère. Nous constatons que pour les courbes des trois cas étudiés le flux solaire est maximal pour la position normale.

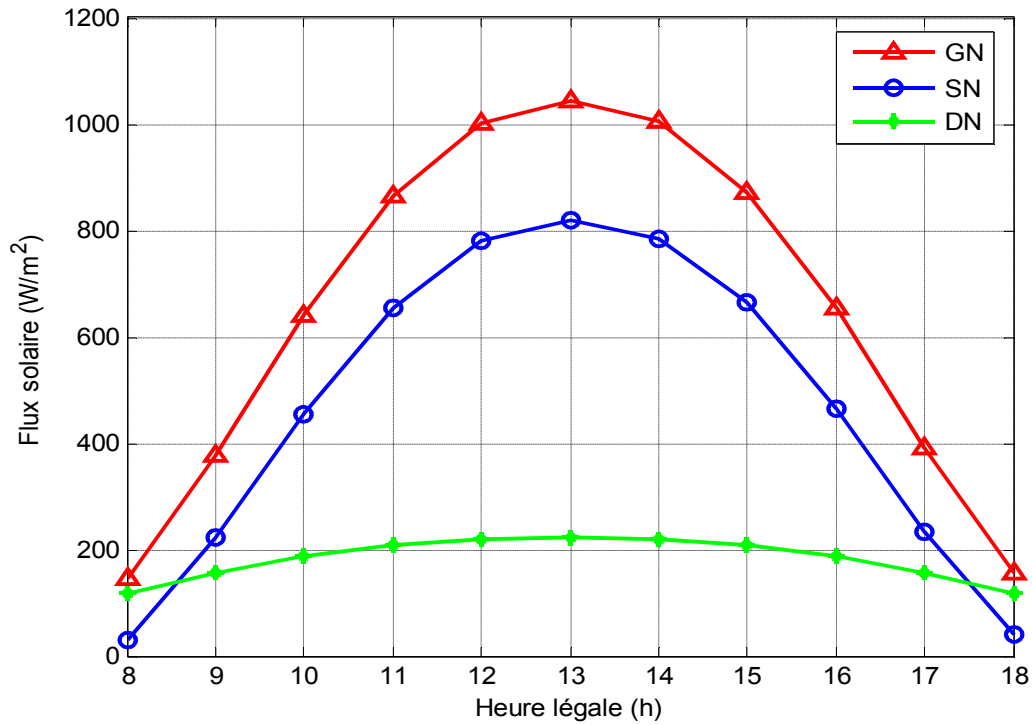


Fig. IV.16 : Variation de l'éclairement du 21 juin sur plan normal
 GN : global normal, SN : direct normal et DN : diffus normal

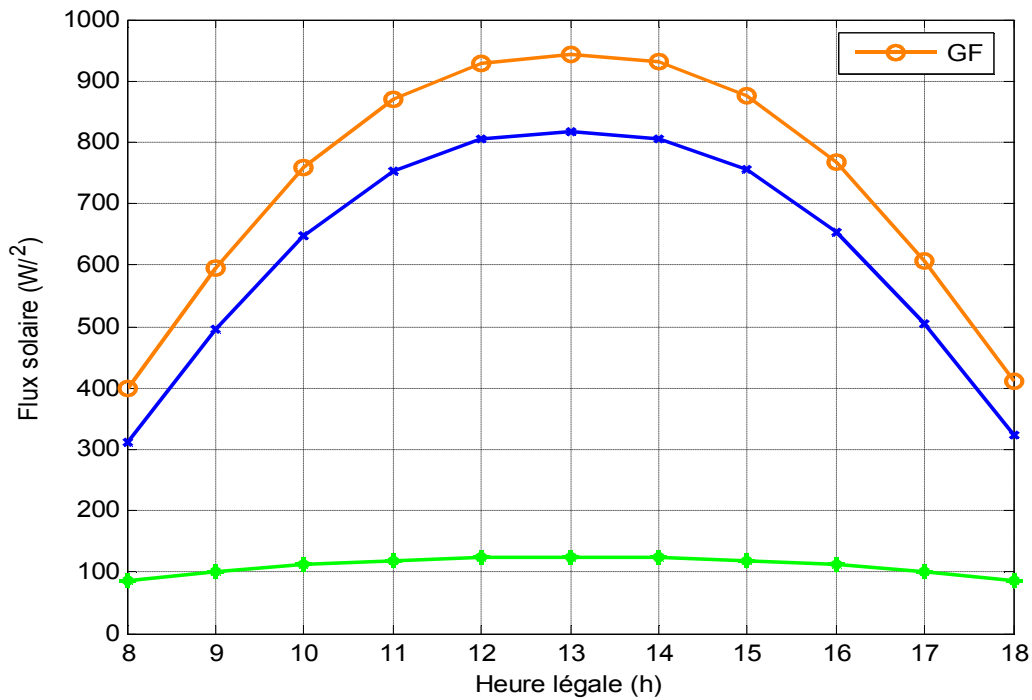


Fig. IV.17: Variation de l'éclairement du 21 juin sur plan fixe incliné à 18 degrés
 GF : global fixe, SF : direct fixe et DF : diffus fixe

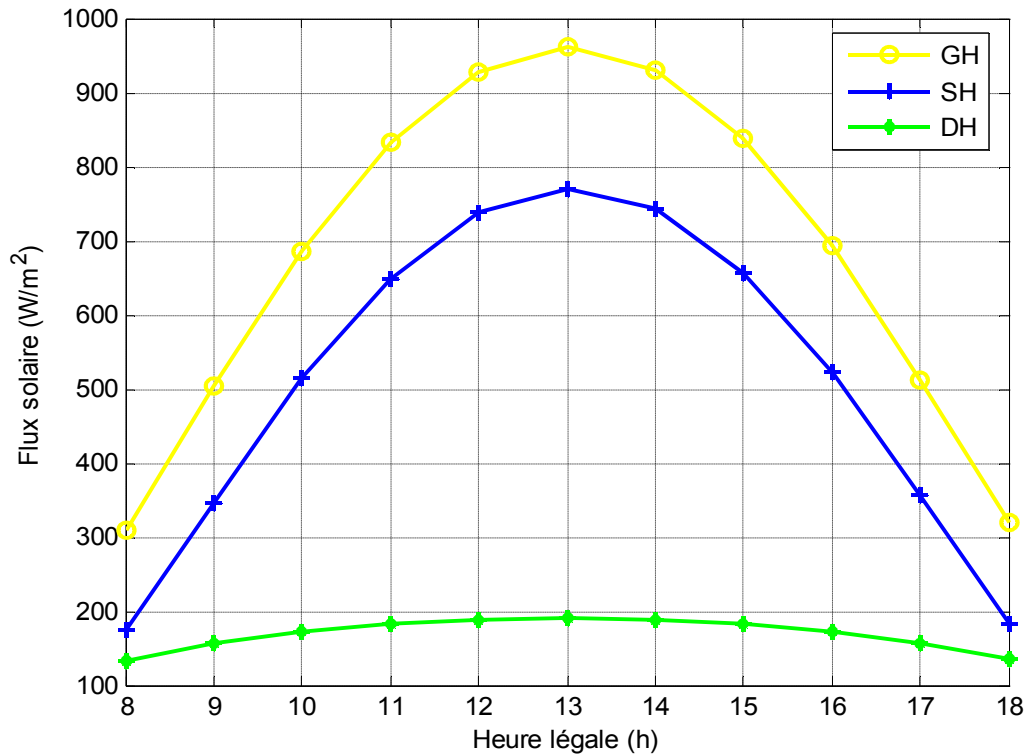


Fig. IV.18: Variation de l'éclairement du 21 juin sur plan horizontal
 GH : global horizontal, SH : direct horizontal et DH : diffus horizontal

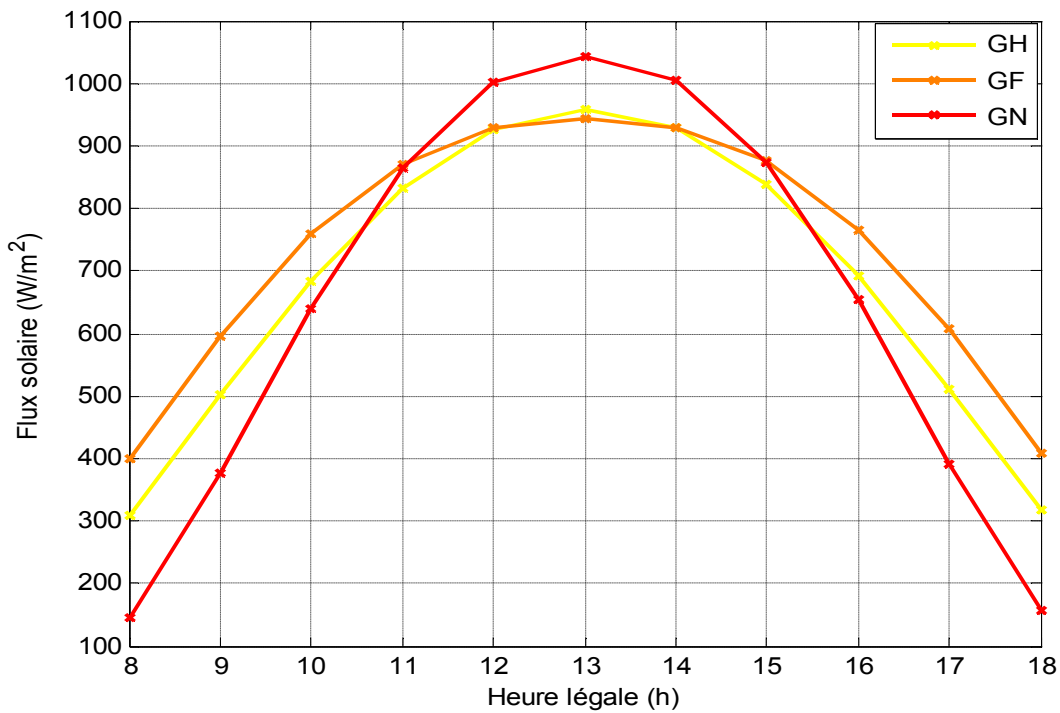


Fig. IV.19: Variation de l'éclairement du 21 juin sur plan horizontal
 GH (courbe jaune), plan fixe GF (courbe orange) et plan normal GN (courbe rouge)

La figure IV.20 nous permet de voir que la caractéristique courant-tension $I(V)$ du module photovoltaïque qui est presque identique pour les positions inclinée fixe et horizontale. Tandis que pour le plan position perpendiculaire la caractéristique $I(V)$ connaît une élévation. En effet le rayonnement solaire reçu sur le panneau position normale est supérieur aux rayonnements reçus sur le plan position inclinée fixe et sur le plan position horizontale qui sont très voisins figure IV.19.

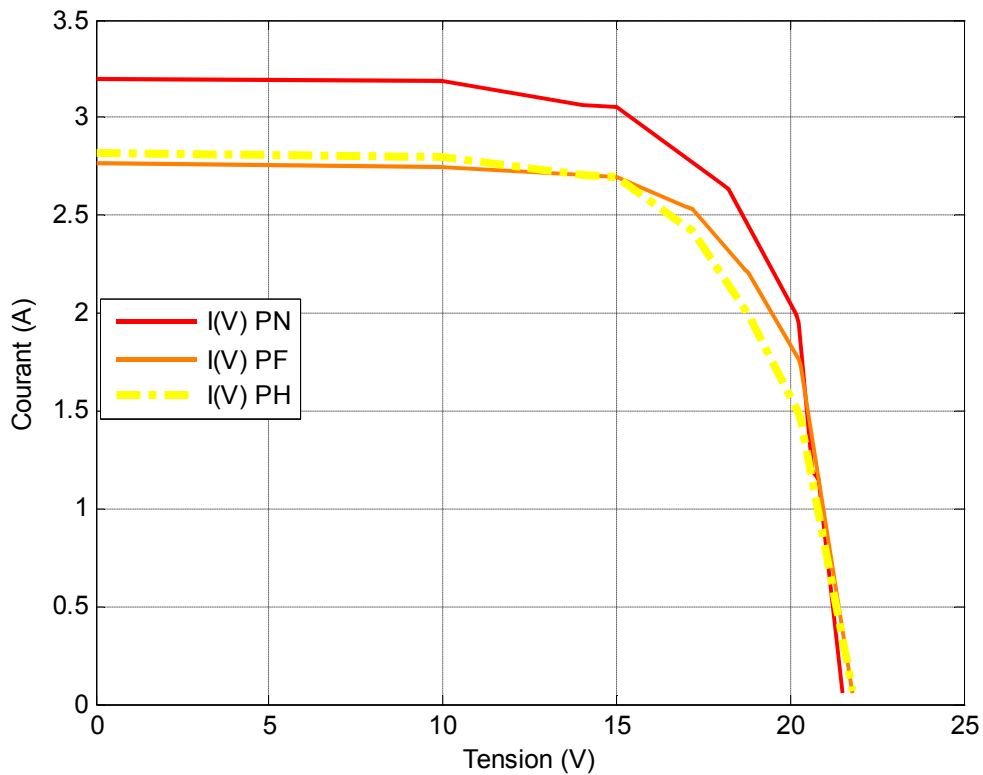


Fig. IV.20: Variation de la caractéristique courant-tension $I(V)$ du panneau PV le 21 Juin pour les trois positions normale (PN), fixe (PF) et horizontale (PH) sur le même graphique

La figure IV.21 nous montre la variation de puissance en fonction de la tension, elle atteint 48.35 W pour la position normale, 43.6 W pour la position inclinée fixe et 41.71 W pour la position horizontale. Nous constatons que la puissance est maximale pour la position normale.

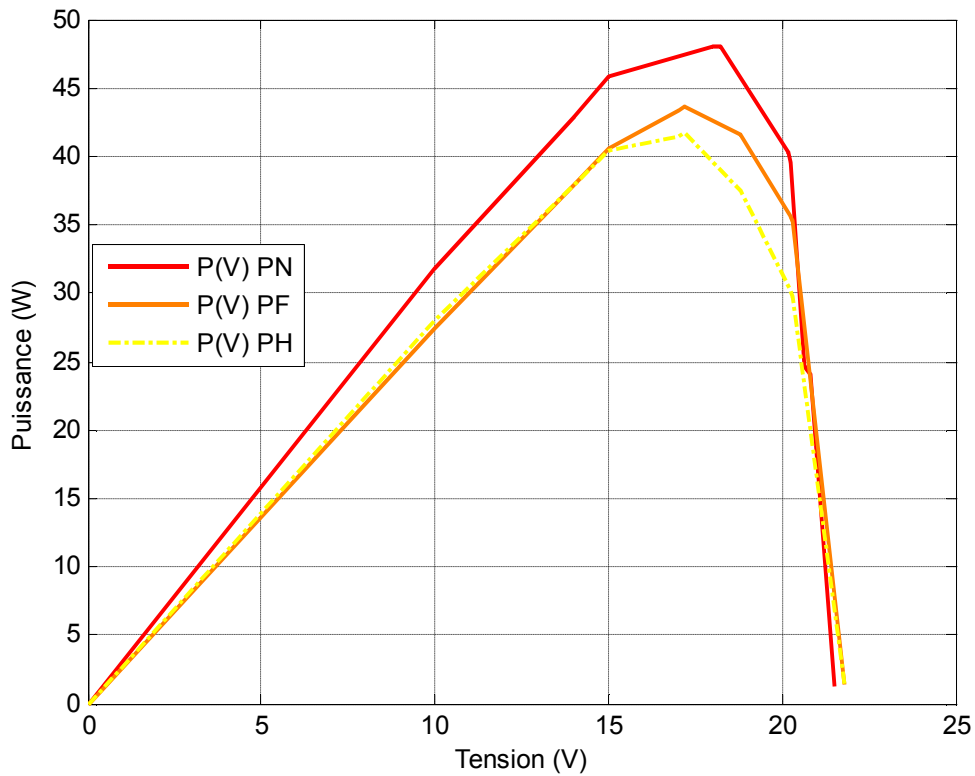


Fig. IV.21: Variation de la puissance $P(V)$ du panneau PV le 21 juin pour les trois positions normale (PN), fixe (PF) et horizontale (PH) sur le même graphique

IV.5.3 Résultats obtenus pour la journée du 1 Août

La hauteur des rayons solaires au mois d’Août est très proche de 70° à 13 heures, l’inclinaison du panneau photovoltaïque correspondante est de 20° et l’azimut est de -5° , comme nous pouvons le constater sur la figure IV.22.

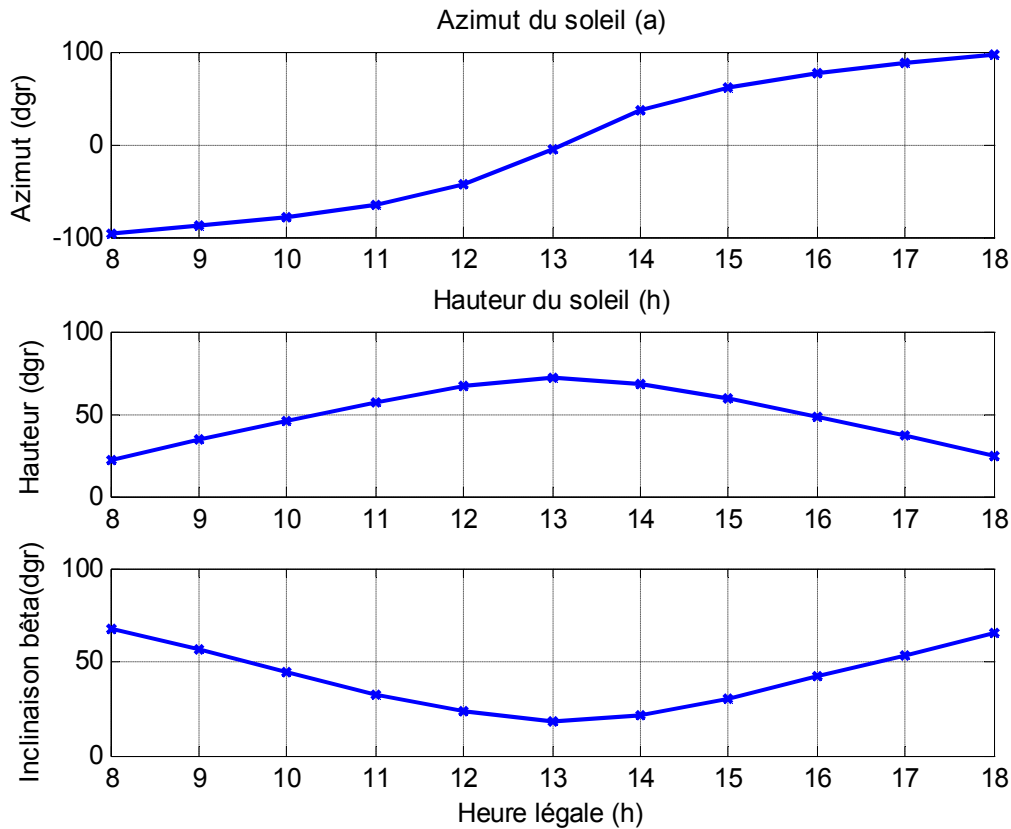


Fig. IV.22 : Variation de l’azimut du soleil (a), de la hauteur du soleil (h) et de l’inclinaison du panneau β le 1 août

La variation du rayonnement solaire le mois d’août est très proche de la variation du rayonnement solaire au mois de juin, en effet l’angle de déclinaison de la terre ne varie pas. Nous obtenons un flux solaire global reçu sur un plan normal (GN figure IV.23) de l’ordre de $1032(\text{W}/\text{m}^2)$ à 13 heures, il atteint $932(\text{W}/\text{m}^2)$ sur un plan incliné à 20 degrés (GF figure IV.24) et il atteint $956 (\text{W}/\text{m}^2)$ sur un plan horizontal (GF figure IV.25).

La figure IV.26 nous montre les courbes du rayonnement global sur plan normal, global sur plan incliné et global sur plan horizontal tracées dans le même repère. Nous constatons que parmi les courbes des trois cas étudiés le flux solaire est maximal pour la position normale.

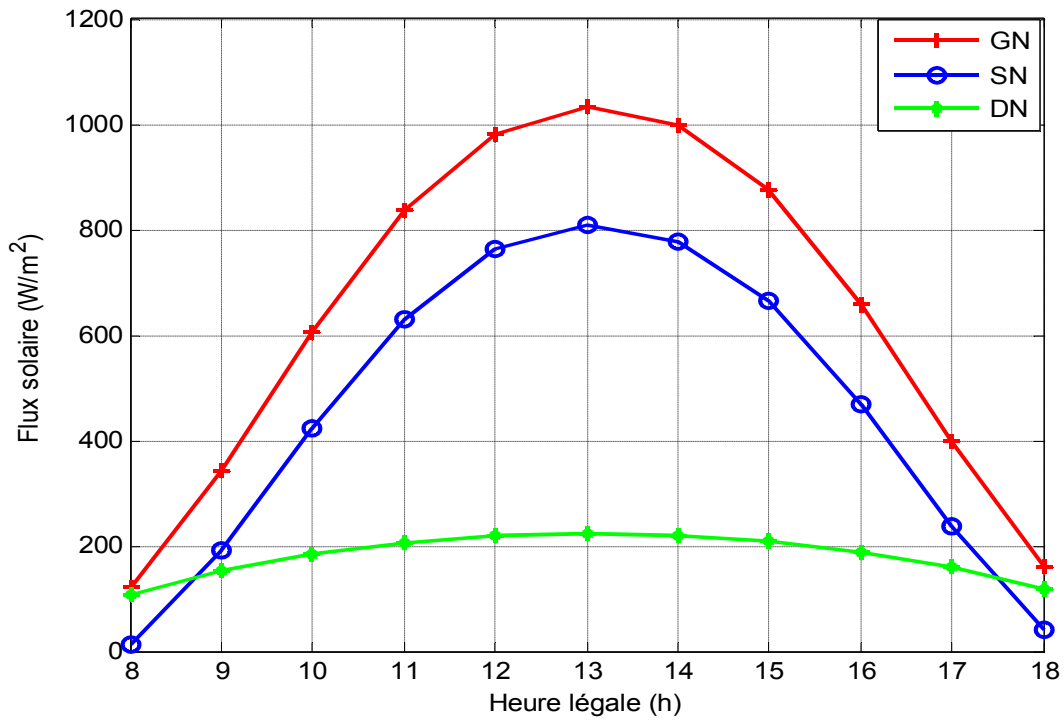


Fig. IV.23 : Variation de l'éclairement du 1 août sur plan normal
 GN : global normal, SN : direct normal et DN : diffus normal

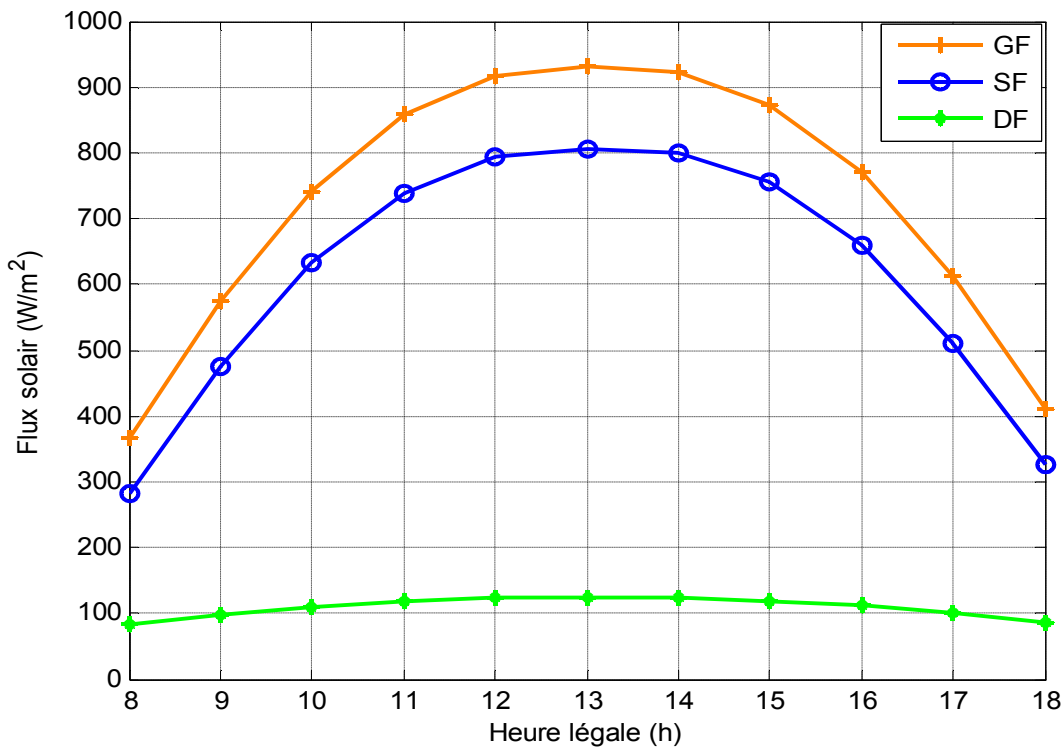


Fig. IV.24: Variation de l'éclairement du 1 août sur plan fixe incliné à 20 degrés
 GF : global fixe, SF : direct fixe et DF : diffus fixe

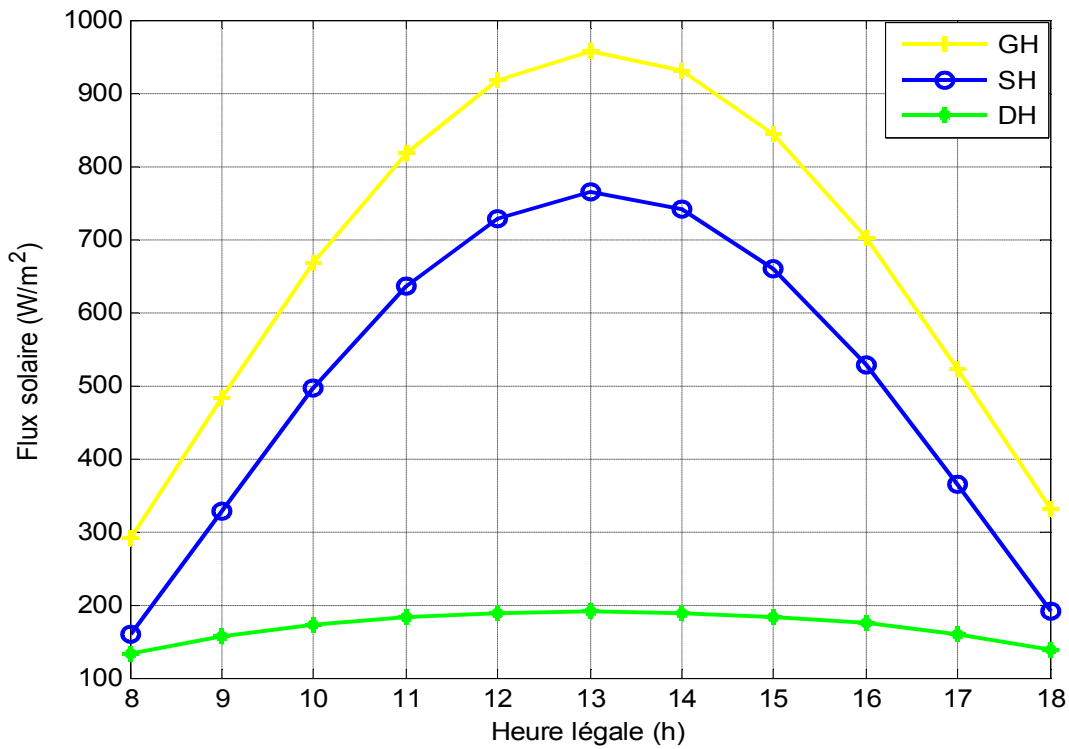


Fig. IV.25: Variation de l'éclairement du 1 août sur plan horizontal
 GH : global horizontal, SH : direct horizontal et DH : diffus horizontal

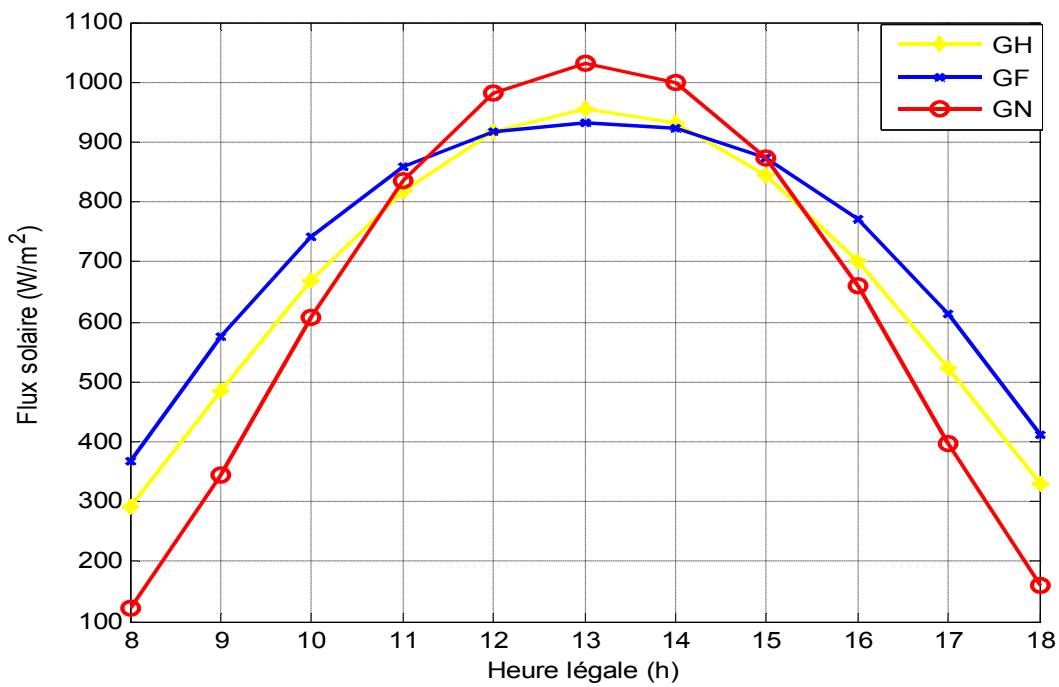


Fig. IV.26: Variation de l'éclairement du 1 août sur plan horizontal
 GH (courbe jaune), plan fixe GF (courbe orange) et plan normal GN (courbe rouge)

La figure IV.27 nous permet de voir la caractéristique courant-tension $I(V)$ du module photovoltaïque le premier août, et de constater que la caractéristique $I(V)$ pour un plan perpendiculaire est plus élevée que les caractéristiques $I(V)$ pour un plan incliné fixe et pour un plan horizontal qui sont très voisines.

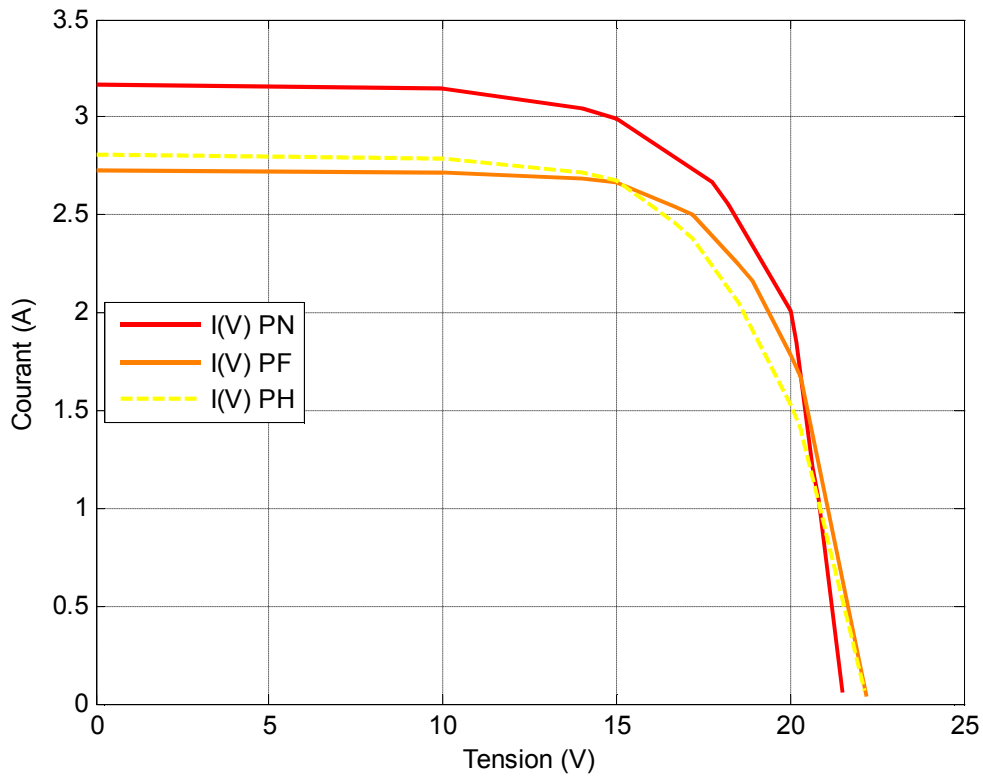


Fig. IV.27: Variation de la caractéristique courant-tension $I(V)$ du panneau PV Le 1 août pour les trois positions normales (PN), fixe (PF) et horizontale (PH) sur le même graphique

La figure IV.28 nous montre la variation de puissance en fonction de la tension, elle atteint 47.32 W pour la position perpendiculaire, 43.01 W pour la position inclinée fixe et 41.05 W pour la position horizontale. Nous constatons que la puissance est maximale pour la position normale.

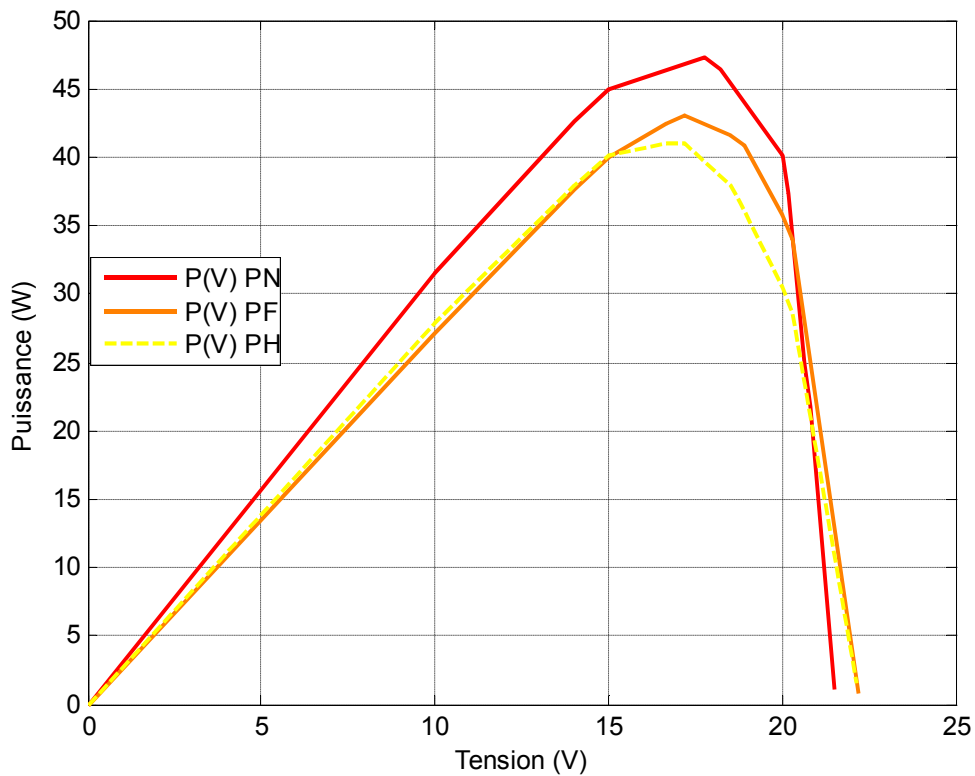


Fig. IV.28: Variation de la puissance $P(V)$ en fonction de la tension du panneau PV le 1 août pour les trois positions normale (PN), fixe (PF) et horizontale (PH) sur le même graphique

IV.5.4 Résultats obtenus pour la journée du 21 Septembre

L'altitude maximale des rayons solaires au mois de septembre est de 55° à 13 heures, l'inclinaison correspondante du panneau est de 35° , l'azimut est de 2.5° comme nous le remarquons sur la figure IV.29.

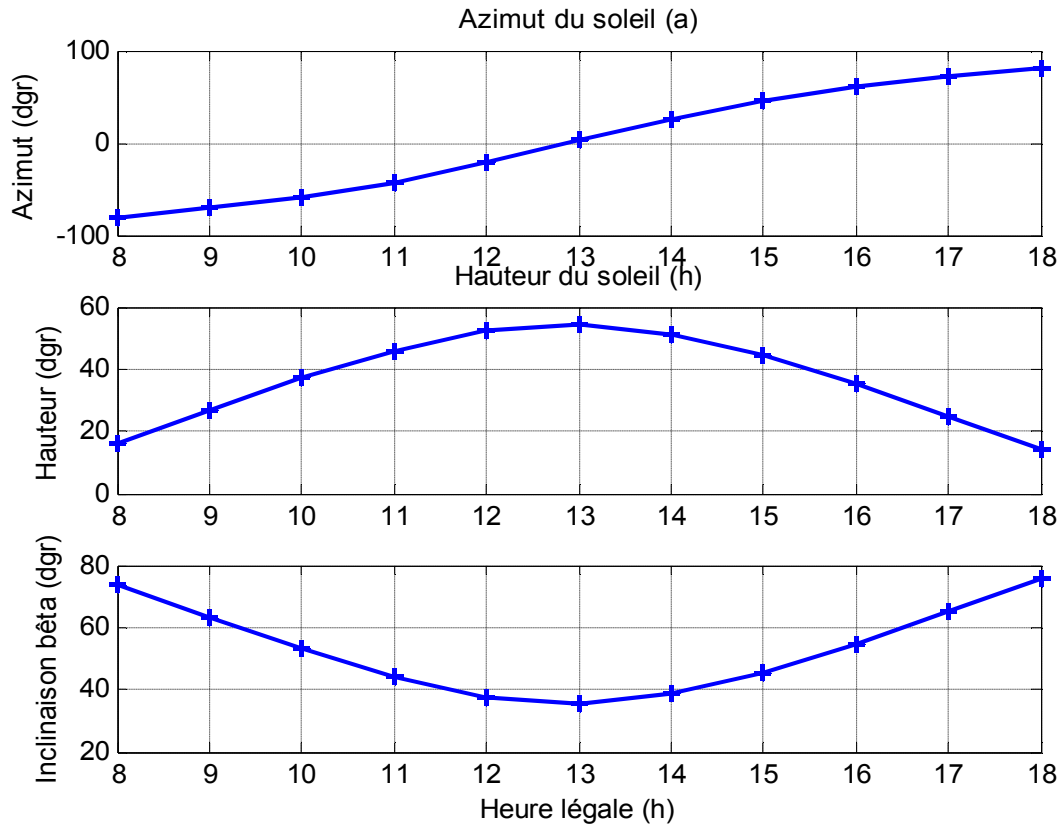


Fig. IV.29 : Variation de l'azimut du soleil (a), de la hauteur du soleil (h) et de l'inclinaison du panneau β le 21 septembre

Les courbes d'éclairement de la journée du 21 Septembre, nous montre une baisse du rayonnement global, il est de l'ordre de $960 \text{ (W/m}^2\text{)}$ sur un plan normal figure (IV.30), il envoie les $873 \text{ (W/m}^2\text{)}$ sur un plan fixe incliné à 35° figure (IV.31), et il est proche de $780 \text{ (W/m}^2\text{)}$ sur un plan horizontal figure (IV.32). En comparant les courbes du rayonnement global pour les trois cas étudiés dans la figure IV.33, le rayonnement global sur plan normal est maximal.

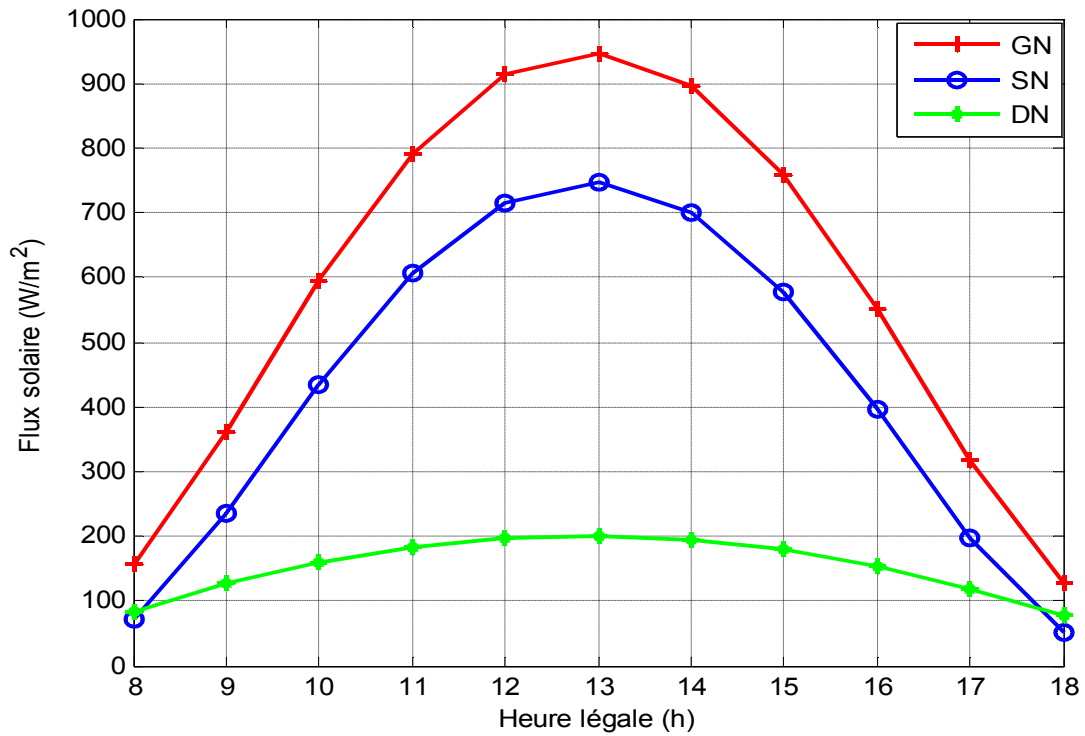


Fig. IV.30 : Variation du flux solaire le 21 septembre sur plan normal
 GN : global normal, SN : direct normal et DN : diffus normal

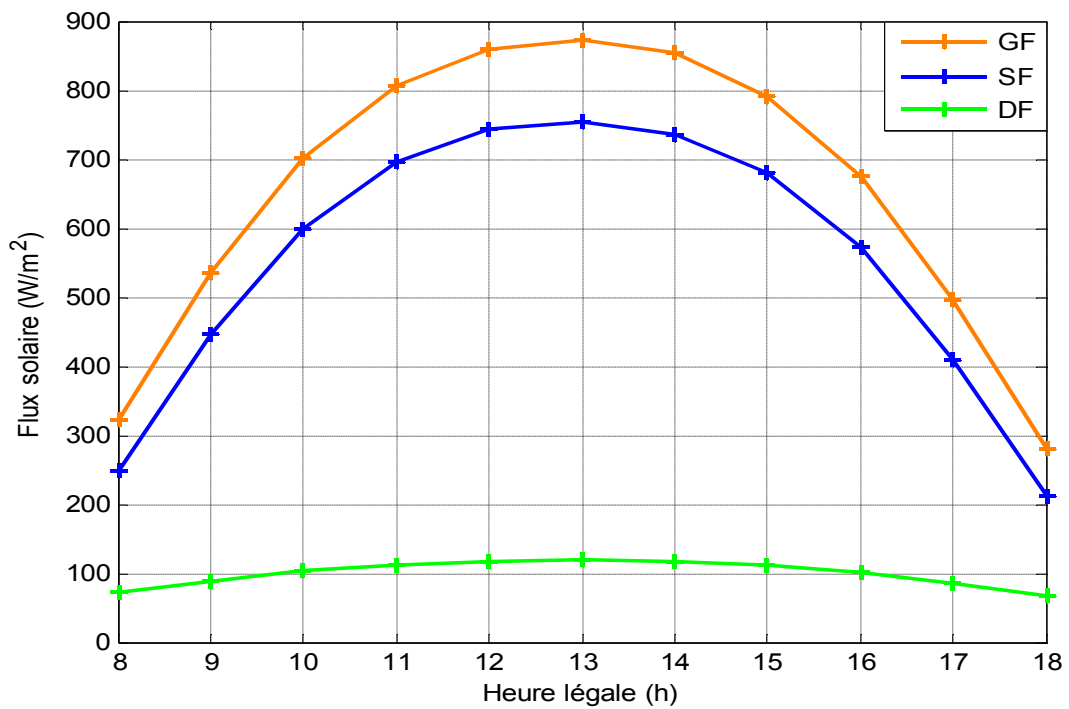


Fig. IV.31: Variation de l'éclairement le 21 septembre sur plan fixe incliné à 35 degrés
 GF : global fixe, SF : direct fixe et DF : diffus fixe

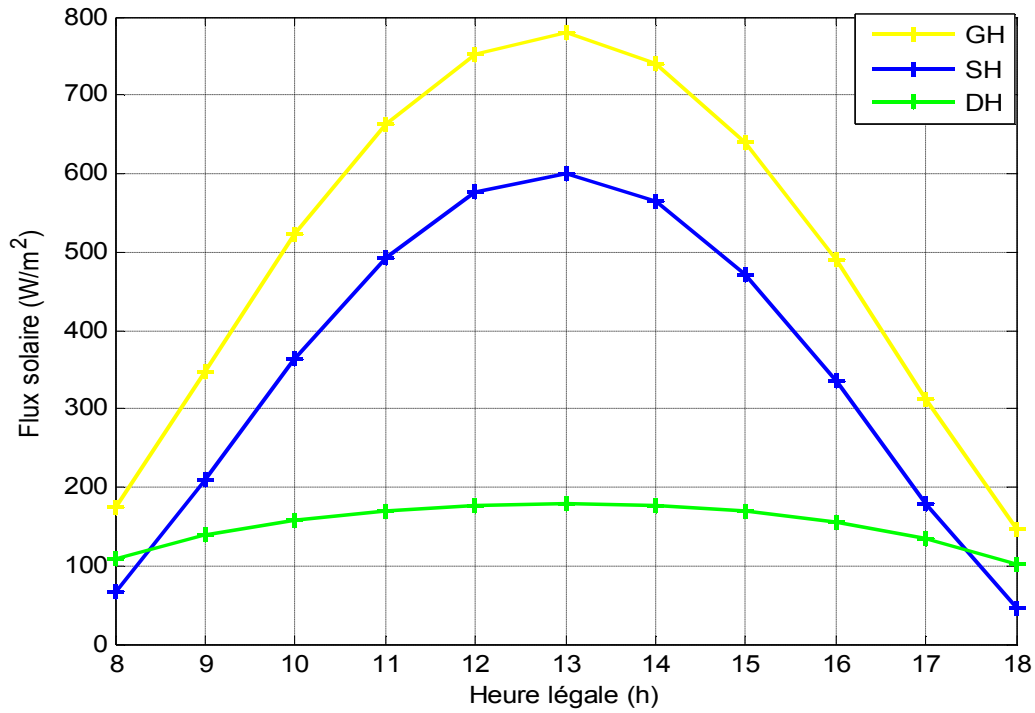


Fig. IV.32: Variation de l'éclairement le 21 septembre sur plan horizontal
 GH : global horizontal, SH : direct horizontal et DH : diffus horizontal

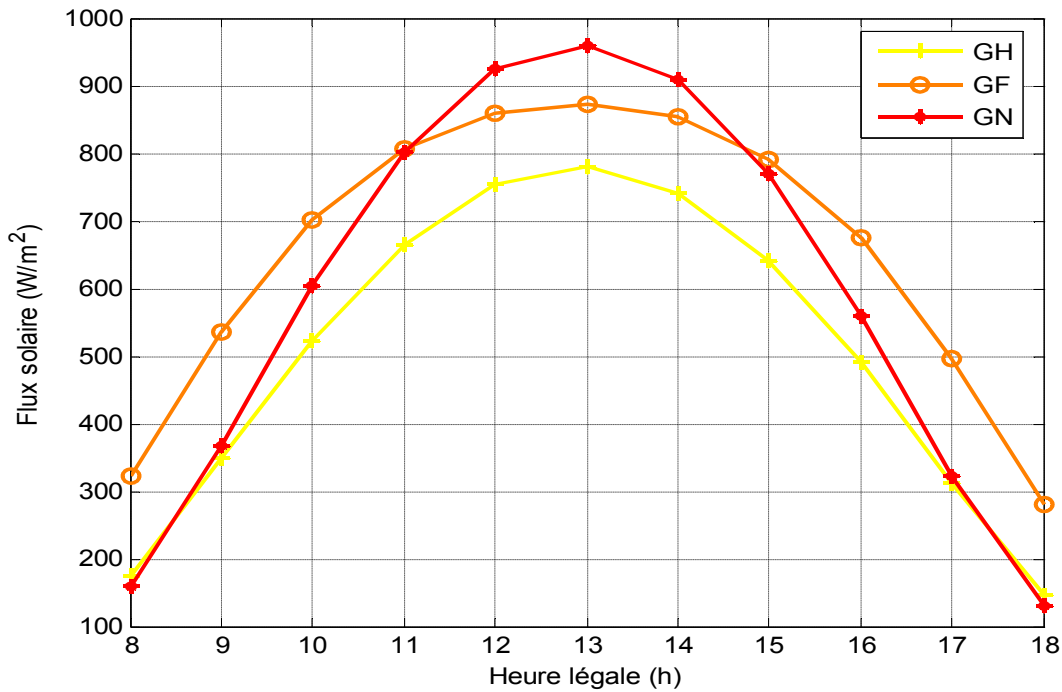


Fig. IV.33: Variation de l'éclairement du 21 septembre sur plan horizontal
 GH (courbe jaune), plan fixe GF (courbe orange) et plan normal GN (courbe rouge)

La figure IV.34 nous permet de voir l'influence du flux solaire sur la caractéristique courant-tension $I(V)$ du module photovoltaïque, en particulier sur le courant de court circuit qui varie directement avec la variation du rayonnement solaire, qui reste maximum pour la position normale. La caractéristique courant-tension $I(V)$ du module photovoltaïque baisse considérablement pour un plan position horizontale dont le flux atteint $780 \text{ (W/m}^2\text{)}$.

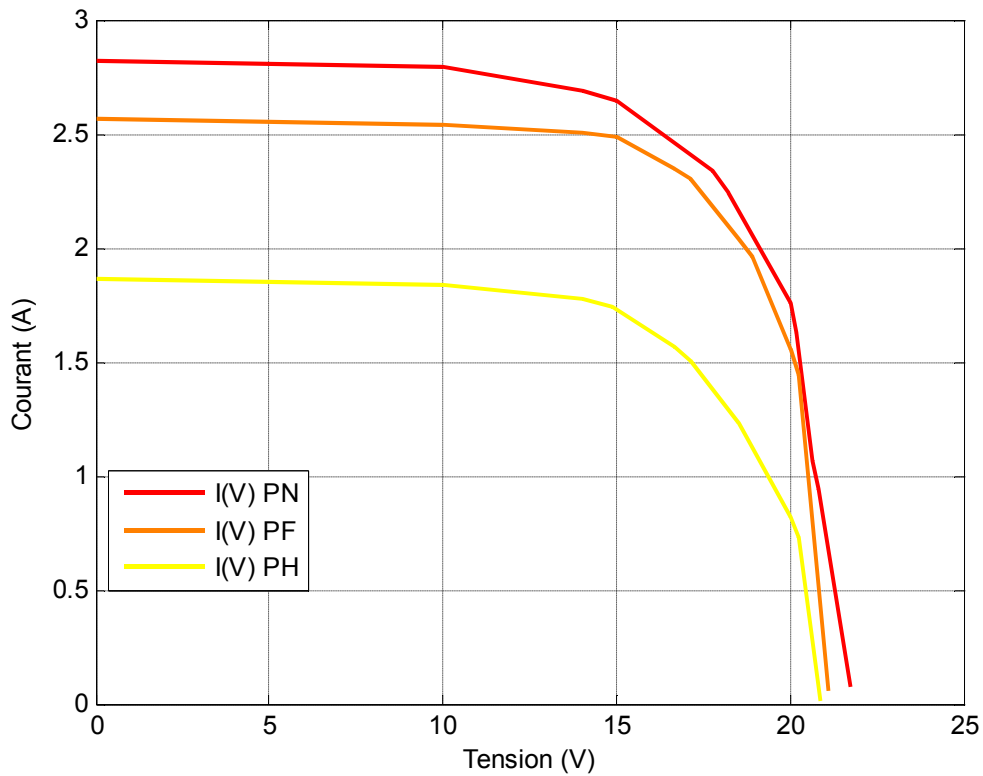


Fig. IV.34: Variation de la caractéristique courant-tension $I(V)$ du panneau PV le 21 septembre pour les trois positions normale (PN), fixe (PF) et horizontale (PH) sur le même graphique

La figure IV.35 nous montre la variation de puissance en fonction de la tension, elle atteint 41.45 W pour un panneau position perpendiculaire, 39.41 W pour un panneau position inclinée fixe et 26.09 W pour un panneau position horizontale. Nous constatons que la puissance est maximale pour la position normale, alors qu'elle baisse pour le plan position horizontale.

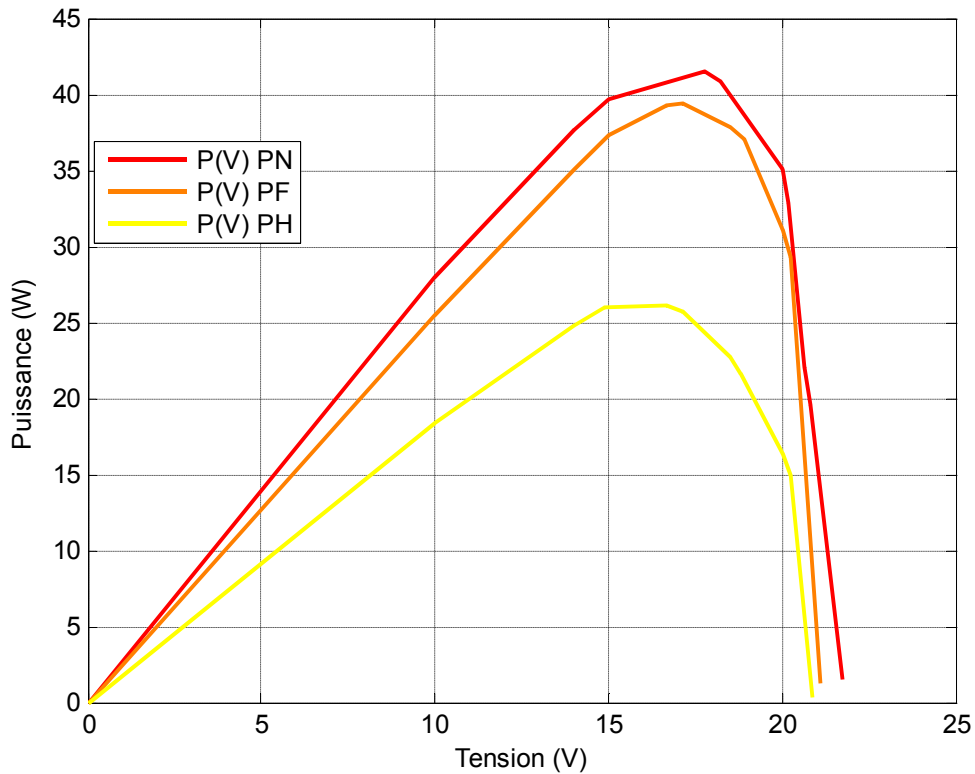


Fig. IV.35: Variation de la puissance $P(V)$ du panneau PV le 12 septembre pour les trois positions normale (PN), fixe (PF) et horizontale (PH) sur le même graphique

IV.5.5 Résultats obtenus pour la journée du 21 Décembre

Au mois de décembre les rayons solaires arrivent sur la surface du panneau avec une hauteur de 30° à 13 heures, l'inclinaison correspondante pour maintenir le panneau perpendiculaire aux rayons solaires doit être de 60° et l'azimut est de l'ordre $+0.93$ comme nous pouvons le constater sur la figure IV.36.

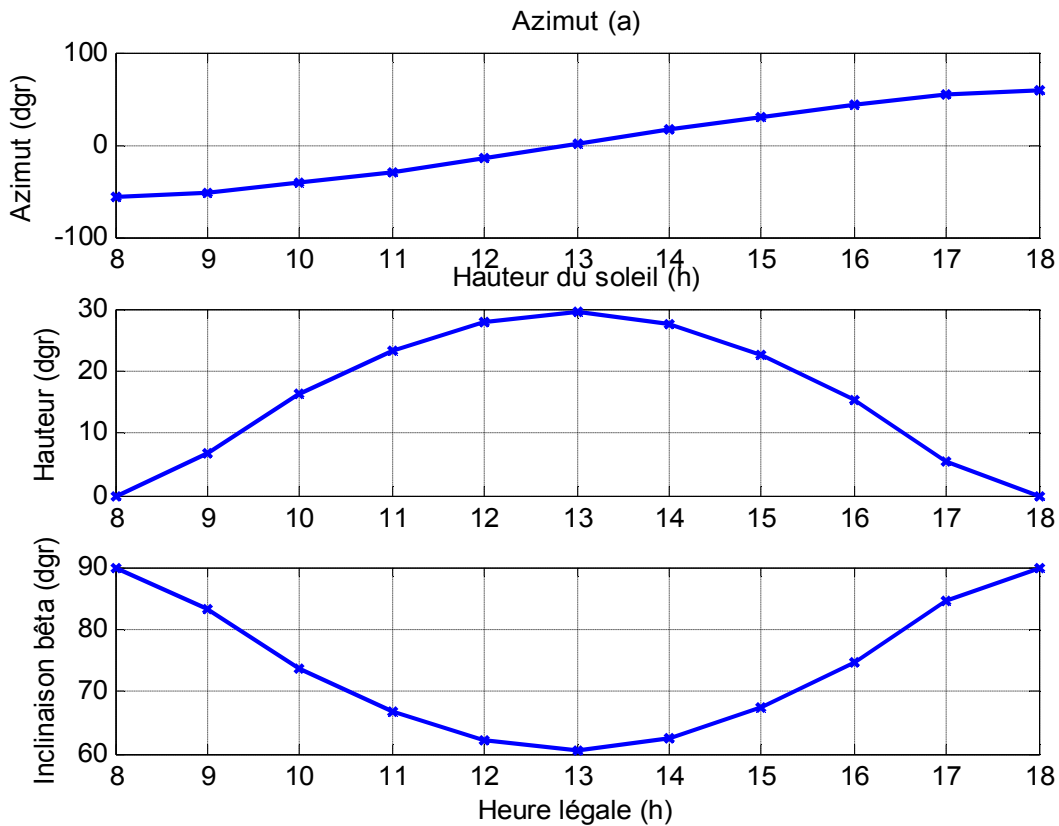


Fig. IV.36 : Variation de l'azimut du soleil (a), de la hauteur du soleil (h) et de l'inclinaison du panneau β le 21 décembre

Les différentes composantes du rayonnement solaire chutent considérablement pendant la journée du 21 Décembre, c'est l'hiver, le rayonnement global sur un plan perpendiculaire est autour de $714 \text{ (W/m}^2\text{)}$ figure IV.37. Sur un plan fixe il est proche de $668 \text{ (W/m}^2\text{)}$ figure IV.38 et il est de l'ordre de $437 \text{ (W/m}^2\text{)}$ sur un plan horizontal figure IV.39.

La figure IV. 40 nous permet de comparer les rayonnements obtenus sur le panneau PV pour les trois positions étudiées.

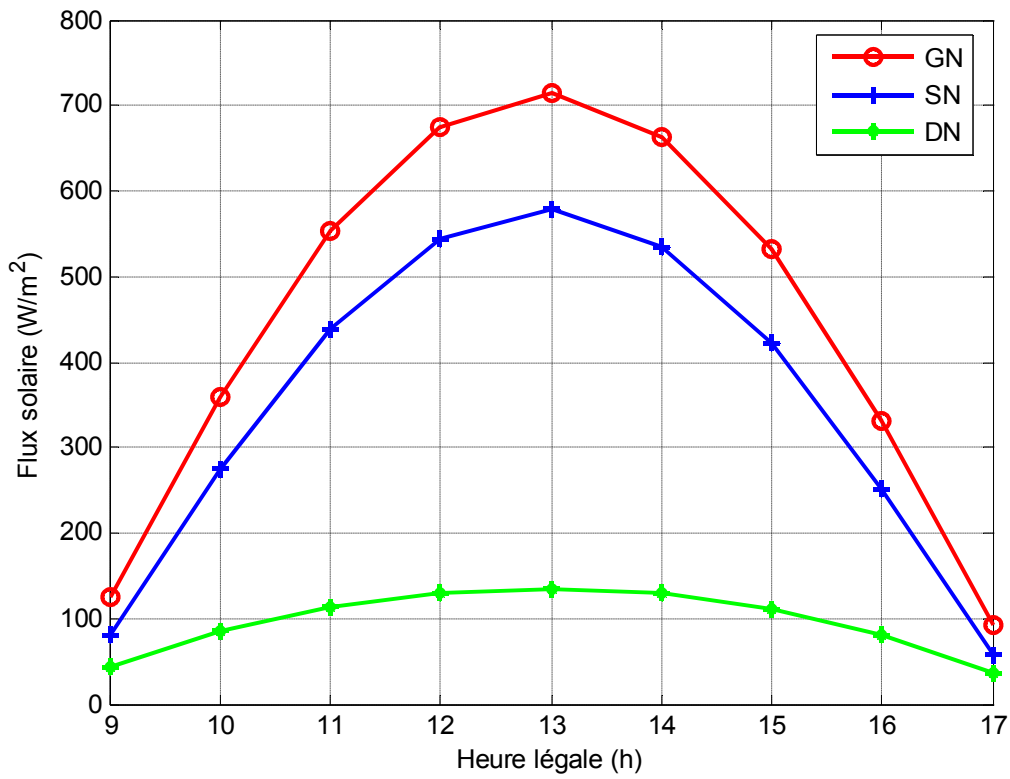


Fig. IV.37 : Variation du flux solaire le 21 décembre sur plan normal
 GN : global normal, SN : direct normal et DN : diffus normal

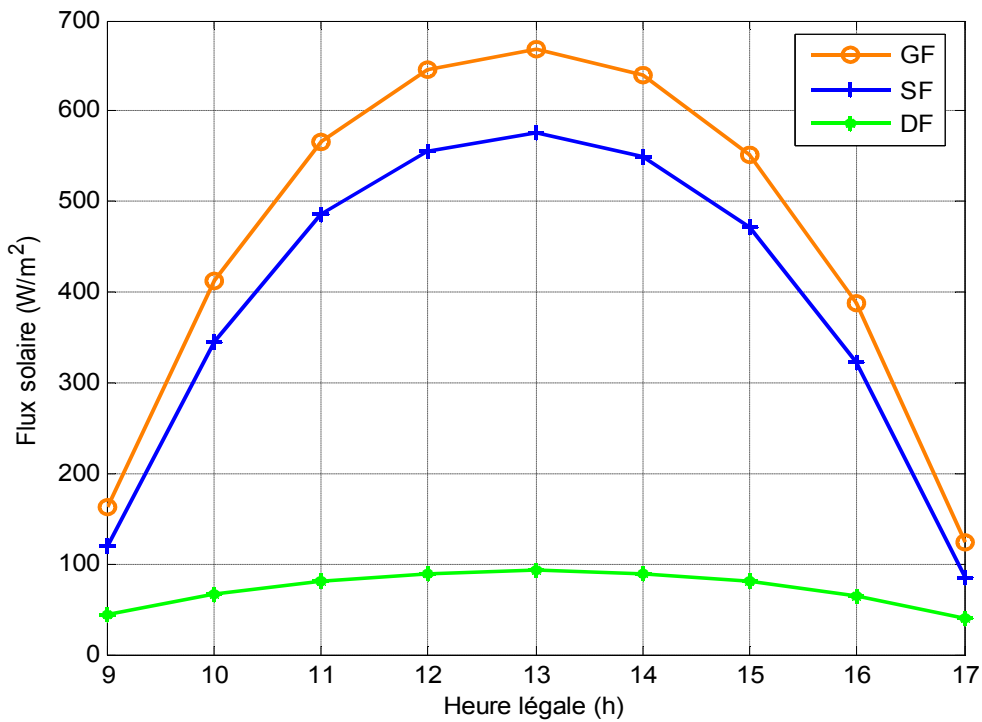


Fig. IV.38 : Variation de l'éclairement le 21 décembre sur plan fixe incliné à 60 degrés
 GF : global fixe, SF : direct fixe et DF : diffus fixe

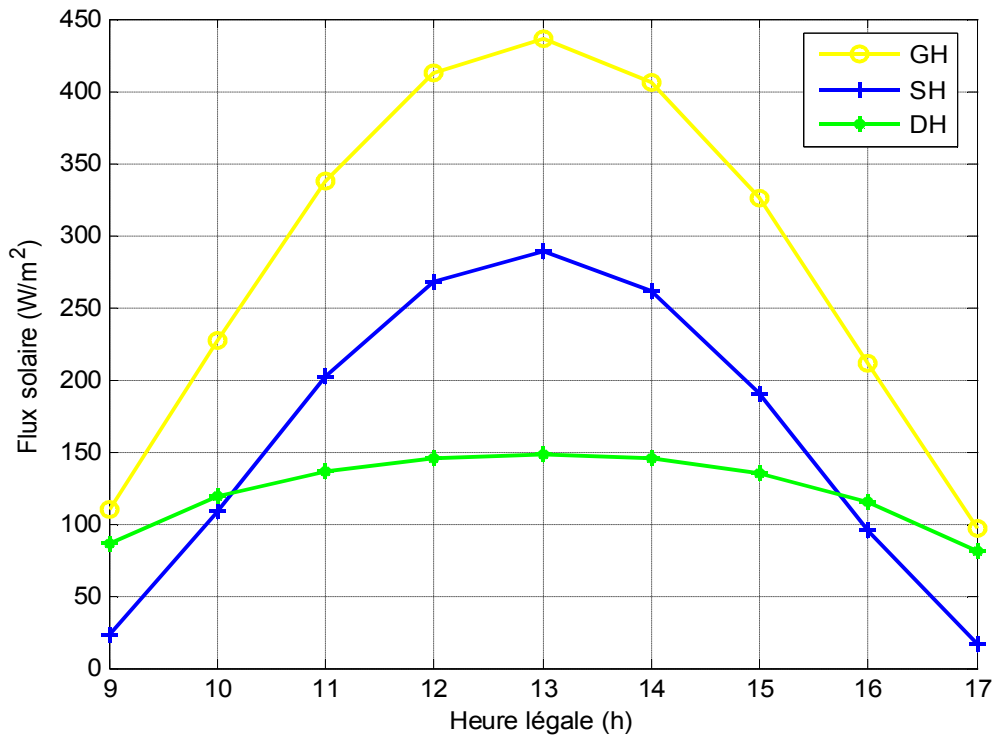


Fig. IV.39: Variation de l'éclairement du 21 décembre sur plan horizontal
 GH : global horizontal, SH : direct horizontal et DH : diffus horizontal

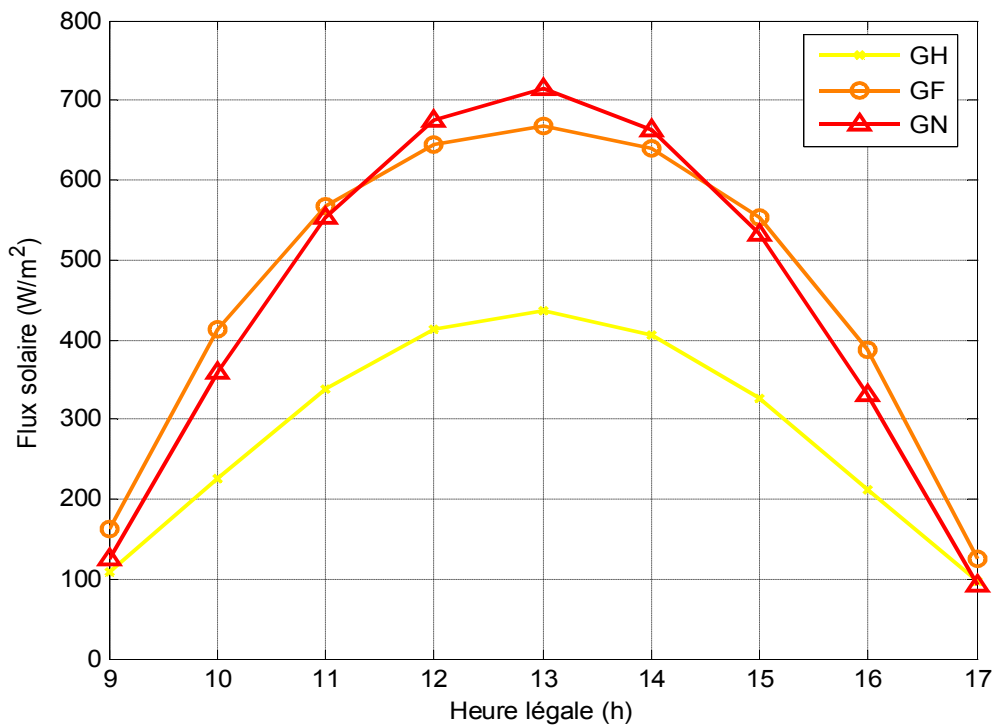


Fig. IV.40: Variation de l'éclairement du 21 décembre sur plan horizontal
 GH (courbe jaune), plan fixe GF (courbe orange) et plan normal GN (courbe rouge)

La figure IV.41 nous permet de voir l'influence directe de la baisse du rayonnement solaire sur la caractéristique courant-tension $I(V)$ du module photovoltaïque. Le courant de court circuit baisse considérablement avec la chute du flux solaire, alors que la tension de court circuit ne varie que très faiblement

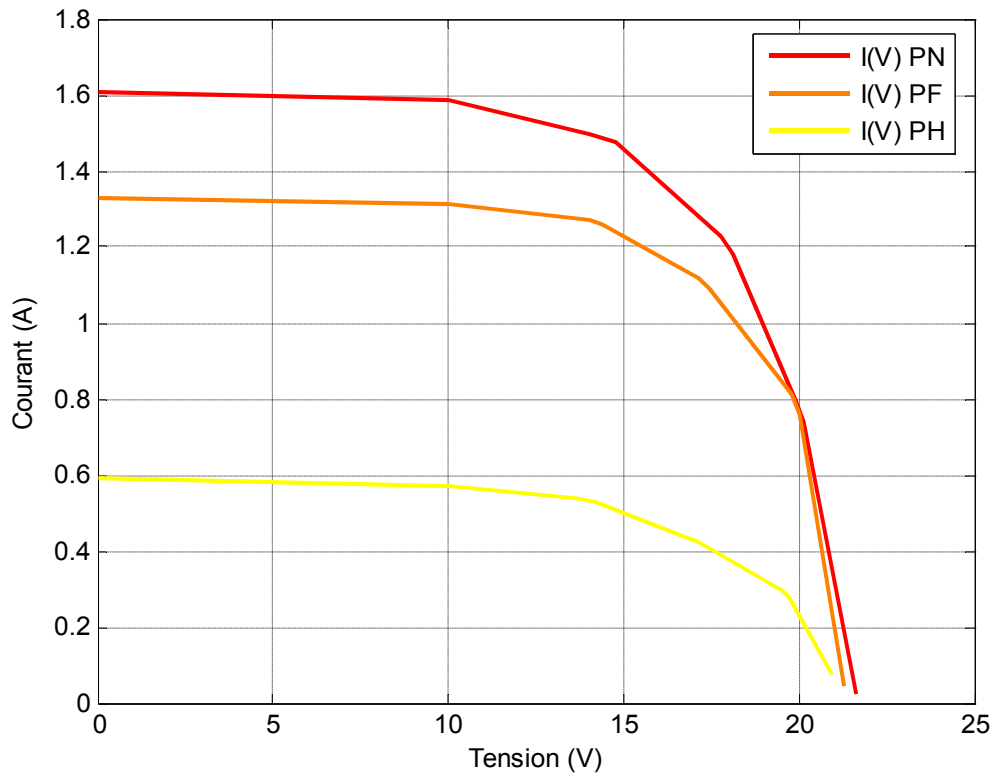


Fig. IV.41: Variation de la caractéristique courant-tension $I(V)$ du panneau PV le 21 décembre pour les trois positions normale (PN), fixe (PF) et horizontale (PH) sur le même graphique

La figure IV.42 nous montre la variation de la puissance en fonction de la tension, elle atteint 21.82 W pour la position perpendiculaire, 19.10 W pour la position inclinée fixe et 7.51 W pour la position horizontale. Nous constatons que la puissance qui peut être extraite du panneau PV baisse considérablement au mois de décembre, comme c'est le cas pour le rayonnement solaire. La puissance pour la position perpendiculaire reste relativement élevée par rapport aux positions inclinée fixe et horizontale.

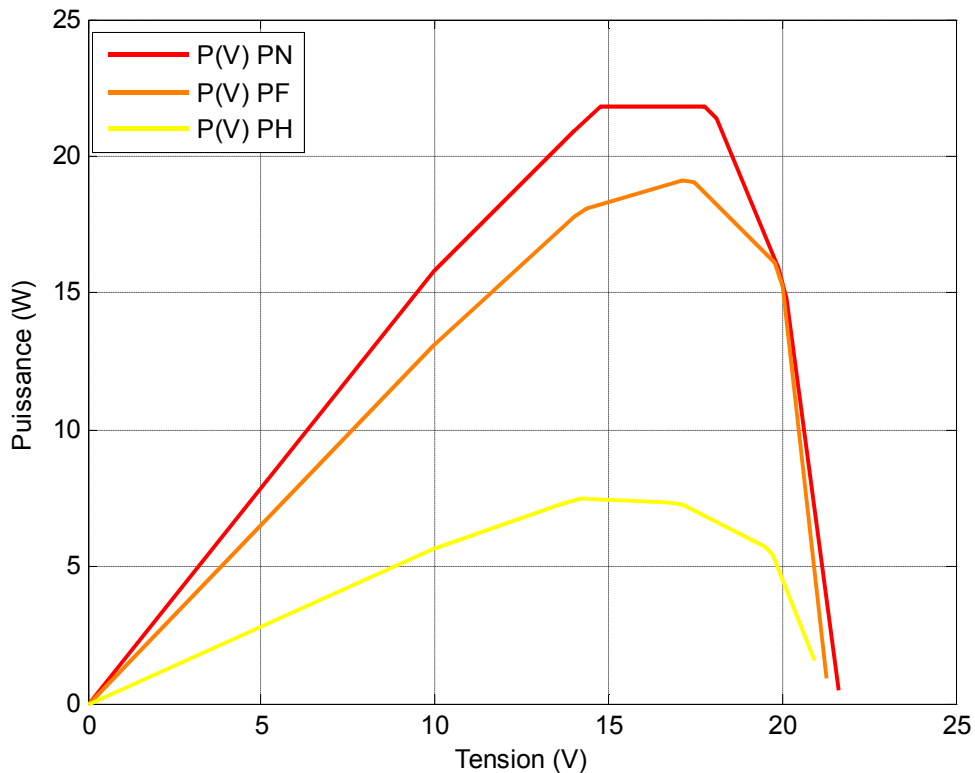


Fig. IV.42: Variation de la puissance $P(V)$ du panneau PV le 21 décembre pour les trois positions normale (PN), fixe (PF) et horizontale (PH) sur le même graphique

IV.6 Résultats et discussions :

Les résultats des calculs obtenus pour la détermination des angles azimut et hauteur du soleil (a , h) ainsi que les différentes composantes du flux solaire journalier pour les trois cas étudiés ; position perpendiculaire, position inclinée fixe et position horizontale du module photovoltaïque ont été très satisfaisants. Ils nous ont permis de voir l'influence du flux solaire et de l'inclinaison du panneau sur les caractéristiques courant –tension et puissance-tension du module PV.

Nous avons remarqué que le flux solaire varie autour de $1000 \text{ (W/m}^2\text{)}$ pour la ville de Boumerdès. Avec une augmentation aux mois de juin et août, une légère baisse durant les mois de septembre et mars et une baisse considérable au mois de décembre. Cette variation est due essentiellement à l'angle de déclinaison δ et au changement de température.

Le flux solaire influe considérablement sur le courant de court circuit et donc sur la puissance extraite. Pour un flux solaire de $1044 \text{ (W/m}^2\text{)}$ la puissance extraite est maximale avec 48.35 W au mois de juin et 47.32 W au mois d'août. Tandis qu'aux mois de mars et de septembre la puissance est proche de 42 W pour un flux de $960 \text{ (W/m}^2\text{)}$. Elle est de l'ordre de 21.82 W au mois de décembre pour un flux solaire de $714 \text{ (W/m}^2\text{)}$, pour le cas d'un module photovoltaïque orienté perpendiculairement face aux rayons solaires. Pour le cas d'un module incliné fixe la puissance extraite atteint 43 W aux mois de juin et août, elle est de l'ordre de 40 W pour un flux de $878 \text{ (W/m}^2\text{)}$ aux mois de mars et de septembre et elle atteint 19 W pour un flux de $668 \text{ (W/m}^2\text{)}$ au mois de décembre.

Le cas d'un panneau position horizontale fournit 41 W aux mois de juin et août, 29 W au mois de mars et septembre et 7.51 W au mois de décembre. Les valeurs de la puissance obtenues pour la position horizontale sont relativement faibles par rapport aux valeurs des puissances obtenues pour le panneau position inclinée fixe et panneau position perpendiculaire.

En comparant les courbes du flux solaire, les caractéristiques courant-tension et puissance-tension pour les trois positions étudiés ; panneau position perpendiculaire, panneau position inclinée fixe et panneau position horizontale, pour chaque saison la position qui permet d'extraire le maximum de puissance du module photovoltaïque est la position perpendiculaire en permanence face aux rayons solaires.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'objectif ciblé par cette étude est de repérer la position du soleil à des heures choisies de la journée a été atteint avec réussite, le programme de calcul nous a permis d'obtenir les angles (azimut et hauteur) du soleil qui sont à la base de tous les calculs des différents composants du rayonnement solaire.

Pour pouvoir ainsi appliquer au module photovoltaïque l'inclinaison qui lui permet d'avoir une position perpendiculaire en permanence face aux rayons solaires. L'angle d'inclinaison du module photovoltaïque et l'angle de hauteur du soleil doivent être complémentaires et former un angle total de 90° . Ainsi la collecte du flux solaire est maximale et donc la puissance du module est optimale. Nous avons pu comparer les courbes de puissance obtenues pour les trois cas étudiés pour chacun des jours choisis et nous avons constaté que l'inclinaison du panneau PV joue un rôle important pour l'amélioration de la puissance produite par ce dernier.

Le rayonnement solaire direct reçu au sol sur une surface horizontal ou inclinée est fortement lié à la hauteur (h) des rayons solaires :

- un facteur de réduction purement géométrique en $\sin(h)$
- la croissance en $1/\sin(h)$ de l'épaisseur de l'atmosphère traversée qui réduit l'énergie disponible au sol.

Le choix du lieu sur la terre est également déterminant, le rayonnement reçu dans les latitudes élevées diffère de celui reçu dans de basses latitudes aux zones équatoriales et tropicales. La présence des nuages qui renvoient vers l'espace une grande partie du rayonnement incident réduit encore l'énergie disponible au sol. L'influence du taux d'humidité relative au niveau des villes côtières influe considérablement sur le facteur de trouble de Linke. La température est un facteur à prendre en considération, la nature du matériau de la cellule photovoltaïque également.

Un suivi journalier de la trajectoire du soleil peut ne pas être très économique, mais une poursuite durant au moins six heures du jour, de dix heures du matin à seize heures de l'après-midi est très bénéfique, avec une modification de la position du module toutes les deux heures trois fois par jour est très envisageable.

Comme nous l'avons présenté dans l'état de l'Art les systèmes photovoltaïques englobent trois grands axes de recherches très liés entre eux, qui sont le stockage et la distribution de l'énergie emmagasinée.

Cette étude peut trouver son application dans le cas d'un système au fil du soleil (exemple une pompe d'irrigation), ou raccordé au réseau électrique. Notre étude peut être développée en adoptant les perspectives suivantes :

- introduire un système de stockage
- conception d'un contrôleur flou.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Ahmed Hamza H.Ali, “Photovoltaic Module Thermal Regulation: Effect of the Cells Arrangement Configurations on the Performance”, March/ June 2011, International Journal of Thermal and Environmental Engineering, volume 2, Numbers 1/2 (www.iasks.org/journals/ijtee).
- [2] A.AI Tarabsheh, I.Etier “Potentiel of One-Axis and Two-Axis Tracking Photovoltaic Systems”, International Journal Of Thermal and Environmental Engineering, volume 3, Septembre 2011. (www.iasks.org/journals/ijtee).
- [3] M.S. Ait Chikh . C. Larbes “ Maximum power point tracking using a fuzzy logic control system”, Revue des Energies Renouvelables, volume 10 N°3 /200 page 387.
- [4] Ashhab MS. “Adaptative Prediction of the Performance of Photovoltaic Solar Integrated System”. International Journal of Thermal and Environmental Engineering, Volume 3, Septembre 2011. (www.iasks.org/journals/ijtee).
- [5] E. C. BOES, “ A Summary of Recent Photovoltaic Concentrator Technology Developments” , 20th IEEE Photovoltaic Specialist Conference, Las Vegas Nevada, septembre 1988 pp. 21-30.
- [6] R.BERNARD , M.MENGUY , M.SHWARTZ , « Le rayonnement solaire, Conversion et Application », 11 Lavoisier, Paris (1980).
- [7] Brochure, Manuel d’installation, d’entretien et de maintenance des systèmes solaires photovoltaïques pour l’éclairage domestique et le pompage d’eau, édition l’UNESCO et l’IEPF Marrakech 29 juillet 2000.
- [8] Brochure, Dimensionnement et installation des systèmes Solaires PV pour l’éclairage domestique, Centre de Développement des Energies Renouvelables Royaume du Maroc Marrakech édition l’UNESCO et l’IEPF Marrakech 29 juillet 2000.

- [9] Cours de Cargèse (Corse), « Energie solaire, Conversion et application » Edition du CNRS (1978).
- [10] Colloque Valbonne Sophia Antipolis, Agence française pour la Maîtrise de L'énergie, « Des Watts pour la vie » (1986).
- [11] Daniel DESMETTRE et Florence MATTERA, Batteries à Usage Solaire, école d'été – juillet 99, GNEC/DER/SSAE/LVT, BT 315, C.N. Cadarache, 13108 Saint-Paul-lez-Durance CEDEX.
- [12] Claude Delorme, « Gisement solaire » G.D.T.A (1987), texte imprimé à partir du site : <http://catalogue-bibliothèque.upmc.fr> (Sorbonne Université).
- [13] C. DELORME, “ le rayonnement solaire utilisable”, p65, 2^{ème} édition-Edition EETI, Paris 75016
- [14] Rodolfo Dufo et Jos. Bernal-Agust, « Concevoir et commander les stratégies des systèmes ‘PV-Diesel’ en utilisant des algorithmes génétiques » université de Zaragoza Espagne, accessible en ligne dans Sciences Directes le 20/11/2004.
- [15] Bernard EQUER « Energie solaire photovoltaïque », volume 1, publié par Ellipses Editions Marketing et l'UNESCO 1993.
- [16] Th.FOGELMAN et R.MONTLOIN, « Installation photovoltaïque dans l'habitat isolé » - Edisud.
- [17] M. Hatti, « Contrôleur Flou pour la poursuite du point de puissance maximum d'un système photovoltaïque » JCGE'08 LYON, 16 et 17 décembre 2008.
- [18] Yves JANNOT « Thermique Solaire », (p30-p70) Octobre 2003. Texte imprimé à partir de : <http://www.thermique55.com/principal/> thermique solaire Annexe. Yves Jannot, ingénieur CNRS pdf.

- [19] Soteris Kalogirou « Solar Energy », (p49-p63) TJ810.K258 2009. British Library Cataloguing-in-Publication Data Web site: www.elsevierdirect.com.
- [20] Ahmed Khedim « L'énergie Solaire », publié par l'Office Universitaire Tunis 2003.
- [21] Anne Labouret * Michel Villos « l'énergie solaire Photovoltaïque » 3^e édition DUNOD juin 2007.
- [22] A. LAUGIER et J.A. ROGER, « les photopiles solaires » Technique et documentation 11 rue Lavoisier-Paris-(1981).
- [23] Antonio Luque and Steven Hegedus « Handbook of Photovoltaic Science and Engineering », (p906-p917) 2003.
- [24] Y. MARAFAING, « Etude Physique des effets photovoltaïques dans les semi-conducteurs » Cahier de l'AFEDES n°2.
- [25] S.Martinuzzi . UNESCO 1999 La filière Silicium Cristallin Faculté des Sciences et techniques de Marseille –St.Jérôme.
- [26] Didier MAYER « Cours de formation Electricité Solaire pour les zones rurales et isolées ». Ecole de Mines de Paris, Centre d'Énergétique, cours de l'UNESCO Mars 1998 Harare Zimbabwe.
- [27] N. Mazouz. A. Midoun “ Control of a DC/DC Buck Converter by Fuzy logic of a Pumping Solar système” Article apparu dans IASKS, volume 3, 2011, p53-p57.
- [28] PALTRIDGE and PLATT, “Radiative Processing in Meteorology and Climatology” Elsevier 1976.
- [29] W. PALZ, « L'électricité solaire » Dunod, 1986.
- [30] Pierre Rivet, « L'énergie solaire -Ensoleillement et météorologie », Copyright 1993, p45-p65, 32 rue Bague 75015 Paris.

- [31] M.RODOT et coll. « les matériaux pour photopiles solaires », revue de physique appliquée, 12-1223-(1977).
- [32] R. J. SCHWARTZ and M. D. LAMMERT, “ Silicon Solar Cells fo High Concentration Applications” ,1975 IEEE Electron Devices Meeting, Washington D.C., Décembre 1975, pp.350.
- [33] R. M. SWANSON, “ Point – Contact Solar Cells : Modeling and Experiment ” Solar Cells, Vol. 17, 1986, p21-p30.
- [34] CHRISTIAN VERIE, “ La Cellule Solaire Arc-en-Ciel” , IEEE-PVSC, Las Vegas 1991
- [35] Christian VERIE Laboratoire de physique du solide et énergie solair (LPSES) Sophia Antipolis, 06560 Valbonne. Extrait de la revue < l’Onde Electrique> Vol.72,n°6.
- [36] Ganesh Kumar Venayagamoorthy et Richard L. Welch, « Contrôleurs d’expédition d’énergie pour un système photovoltaïque » Université intelligente du Missouri laboratoire de systèmes de la science et de la technologie, Rolla, Etats-Unis 2010, p249-p261.

WEBOGRAPHIE

- [37] <http://hernes.silve.pges.perso-orange.fr>.
- [38] [http://M. Pasquinelli / TECESSEN / Université Aix-Marseille III](http://M.Pasquinelli/TECESEN/UniversitéAix-MarseilleIII)
- [39] <http://eco-sceptique.over-blog.fr/Article-27492707.html>.
- [40] <http://www.infoeco.fr/actualités>.
- [41] http://fr.wikipedia.org/wiki/fichier:Solar_Land_area.png.
- [42] <http://www.devis-panneaux-photovoltaiques.fr/photovoltaique.html>
- [43] <http://imex-cgi.fr/nos-produits/le-solaire-photovoltaique/présentation>
- [44] http://www.ecosources.info/energies_renouvelables/
- [45] <http://www.joliet-europe.com/indexfr.htm>.
- [46] http://photovoltaique.guidenr.fr/III_1_caracteristique-courant-tension-module-photovoltaique.php
- [47] EL Ayam-2 / 16 Juillet 2011.