

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR- ANNABA
BADJI MOKHTAR –ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار- عنابة

Faculté: Sciences de l'Ingénierat
Département: Électrotechnique
Domaine: Sciences et Technologies
Filière : Électrotechnique

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de LICENCE

Thème :

Etude et modélisation d'un panneau photovoltaïque

Présentés Par:

- ABDELJOUAD Med Tarek
- SAADI Abdelkodous

Encadrant : KSENTINI Abdelhamid

Grade : MCB

Université : UBMA

Jury de Soutenance:

Pr :ABDERREZAK Abdallah

Année Universitaire : 2019/2020

REMERCIEMENT

En préambule à ce mémoire nous remercions ALLAH qui nous aide et nous donne la patience et le courage durant ces longues années d'étude.

Nous souhaitons adresser nos remerciements les plus sincères aux personnes qui nous ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette formidable année universitaire.

Ces remerciements vont tout d'abord au corps éducatif et administratif de la Faculté Badji Mokhtar des Sciences techniques, pour la richesse et la qualité de leur enseignement et qui déploient de grands efforts pour assurer à leurs étudiants une formation actualisée.

Nous tenons à remercier sincèrement Mr.KSENTINI, qui, en tant que Directeur de mémoire, s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'elle a bien voulu nous consacrer et sans lui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour.

On n'oublie pas nos parents pour leur contribution, leur soutien et leur patience.

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis, qui nous ont toujours encouragé au cours de la réalisation de ce mémoire.

Merci à tous et à toutes.



Sommaire

Introduction Générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : Différentes types des Energie Renouvelables

I. Introduction	3
II. Les différentes ressources du renouvelables.....	4
II.1. L'énergie hydroélectrique	4
II.2. L'énergie solaire (photovoltaïques)	6
II.3. Les éoliennes	7
II.4. La biomasse	8
II.5. L'énergie des mers ou énergie marine	9
III. Conclusion	9

Chapitre II : Energie Solaire

II.1 Introduction	10
II.2 Caractéristiques du système photovoltaïque	10
II.2.1 Le rayonnement solaire	10
II.2.2 L'effet photovoltaïque	12
II.2.3 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	12
II.2.4 Type de cellules photovoltaïques	13
II.2.5 Les paramètre des cellules photovoltaïques	14
II.2.5.1 Influence de l'éclairement	17
II.2.5.2 Influence de la température	17
II.2.6 Le module photovoltaïque	18
II.2.6.1 Association des cellules photovoltaïques	18
II.2.6.2. Protection d'un module photovoltaïque	19
II.2.7. Différents types de systèmes photovoltaïques.....	19
Conclusion.....	22

Chapitre III : Modélisation d'un système photovoltaïque

Introduction	22
Modélisation d'une cellule photovoltaïque	22
Modèle mathématique	22
Modélisation d'un panneau photovoltaïque	24
Caractéristique d'un panneau photovoltaïque	24
Modèles de coordonnées soleil	25

Angle solaire	25
Modèle de rayonnement solaire	28
Rayonnement solaire sur un plan horizontal	28
Rayonnement solaire sur un plan incliné	29
Modélisation du champ photovoltaïque	30
Modèle de la température.....	32
Caractéristiques I-V d'un module	34
Conclusion	36
Conclusion générale	37

Listes des figures

Chapitre I : Différentes types des Energie Renouvelables

Fig. I.1 : Consommation d'énergie dans le monde, 2014.....	3
Fig. I.2 : Répartition de la consommation d'énergie par secteur (2014)	4
Fig. I.3: Schéma en coupe d'un barrage hydroélectrique.....	4
Fig. I.4: Puissance PV installée dans le monde jusqu'en 2013.....	6
Fig. I.5 : Eolienne à axe horizontal.....	7
Fig. I.6 : Eolienne à axe verticale.....	7
Fig. I.7 : Puissance éolienne installée dans le monde jusqu'à 2013.....	8

Chapitre II : Energie Solaire

Fig. II.1 : Types de rayonnement solaire reçus au sol	11
Fig. II.2: Principe de la conversion photovoltaïque	13
Fig. II.3 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque avec charge	15
Fig. II.4 : Courbe courant -tension d'une cellule photovoltaïque	17
Fig. II.5 : Module photovoltaïque.....	18
Fig. II.6: Schémas de principe de différentes topologies d'installations PV connectés à un Réseau électrique.....	21
Fig. II.7: structure de conversion multi-string mixte.	22

Chapitre III : Modélisation d'un système photovoltaïque

Fig.III.1 :Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.....	23
Fig.III.2 :les différentes zones de la Caractéristique d'une cellule photovoltaïque réelle...	23
Fig.III.3 : Coordonnées angulaires de soleil	27
Fig.III.4 : Représentation de l'éclairement d'un capteur plan	27
Fig.III.5 : Schéma électrique équivalent d'une cellule PV.....	30
Fig.III.6 : Configurations des associations série parallèle des modules PV.....	32
Fig.III.7 : Caractéristiques I-U d'un module Photo watt PW 6-110 pour différentes Irradiations solaires, à 25 °C	34

Fig.III.8 : Caractéristiques I-U d'un module Photo watt PW 6-110 pour différentes Températures.....35

Introduction générale

Les énergies renouvelables sont des énergies qui se renouvellent assez rapidement pour être considérées comme inépuisables à l'échelle humaine du temps.

L'énergie solaire est disponible, non polluante et gratuite. C'est pourquoi, elle est de plus en plus utilisée, comme alternative aux combustibles, dans la production d'électricité. L'Algérie possède l'un des gisements solaires les plus élevés au monde, avec une durée d'ensoleillement sur la totalité du territoire national pouvant atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m^2 est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de $1700\text{KWh}/\text{m}^2/\text{an}$ au Nord et $2263\text{ kWh}/\text{m}^2/\text{an}$ au Sud du pays [1].

L'Algérie a réservé une multitude d'investissements dans la technologie photovoltaïque et ses applications à titre d'exemple le projet HASSI R'MEL. Ce dernier consiste à mettre à profit des concentrateurs solaires cylindre-parabolique muni des systèmes de poursuite solaire [2], [3].

Les premières applications des suiveurs solaires remontent vers les années 1750 où le principe repose sur l'utilisation de l'héliostat. La rotation du miroir de l'héliostat est assurée par un mécanisme d'horlogerie dont la plus ancienne mention du système se trouve dans des publications datant de 1742 du physicien néerlandais Willem Jacob 's Gravesande [4].

Dans ce contexte, notre motivation dans ce travail développé en chapitres est de construire un instrument permet d'optimiser l'énergie fournie par les panneaux photovoltaïques dans le but de maximiser la quantité d'éclairement absorbé par les panneaux photovoltaïques en suivant le mouvement du soleil pendant la journée.

Afin d'aboutir au but, on a organisé notre mémoire de la manière suivante :

Introduction générale

Le premier chapitre dans lequel on va parler sur le rayonnement solaire, généralité sur le photovoltaïque et les suiveurs solaires.

Le second chapitre porte sur la matérialisation du dispositif expérimental.

Le troisième chapitre sera consacré à la conception et la réalisation du système de poursuite.

Pour la validation de notre travail, l'instrument qu'on a développé sera utilisé par les collègues d'Electrotechnique pour l'amélioration du rendement du panneau solaire. Les résultats obtenus seront présentés dans le troisième chapitre.

Enfin, on finalise notre travail par une conclusion générale et perspectives au futur.

I. Introduction :

Lors de cette dernière décennie, l'attention des scientifiques s'est de plus en plus tournée vers des préoccupations plus grandes pour l'avenir de l'humanité: la demande en énergie à tendance à croître constamment (fig.1.1) et en même temps l'utilisation des carburants fossiles contribue à la pollution globale et aux changements climatiques.

Néanmoins, les ressources de la planète sont limitées. L'optimisation et l'augmentation de l'efficacité énergétique sont des mesures qui peuvent contribuer à assurer un développement durable

La répartition de la consommation finale d'énergie par secteur dans le monde est représentée dans la figure (1.2) Une analyse statistique montre que les plus grands consommateurs sont le secteur des transports, le secteur résidentiel et l'industrie. Aussi, une grande partie de l'énergie est consommée sous la forme d'énergie électrique.

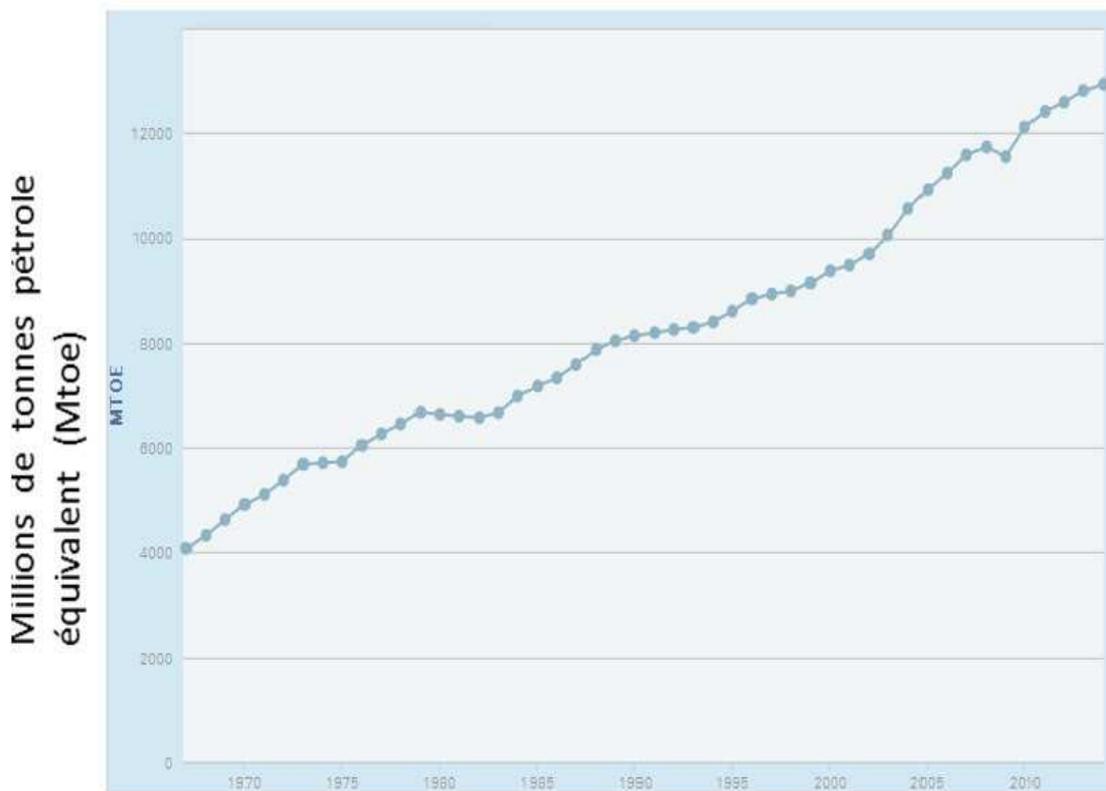


Fig. I.1 : Consommation d'énergie dans le monde, 2014 [5]

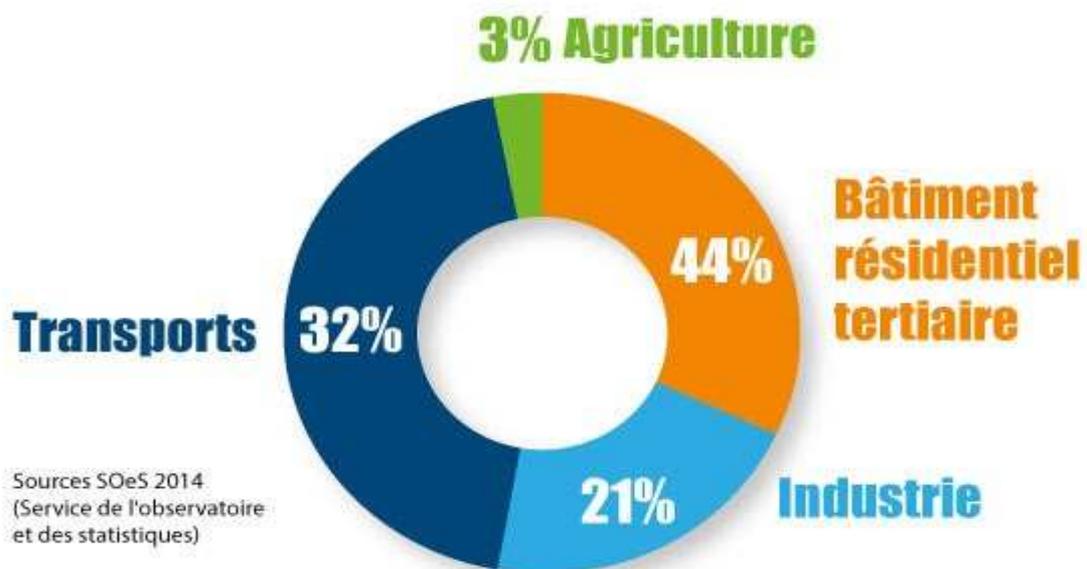


Fig. I.2 : Répartition de la consommation d'énergie par secteur (2014) [6]

II. Les différentes ressources du renouvelables :

Les ressources du renouvelable sont diverses, à savoir :

II. 1 L'énergie hydroélectrique :

Les centrales hydrauliques transforment l'énergie cinétique d'un flux d'eau en énergie électrique par l'intermédiaire d'une ou plusieurs turbines hydrauliques, couplées à des générateurs électriques (fig. □.1).

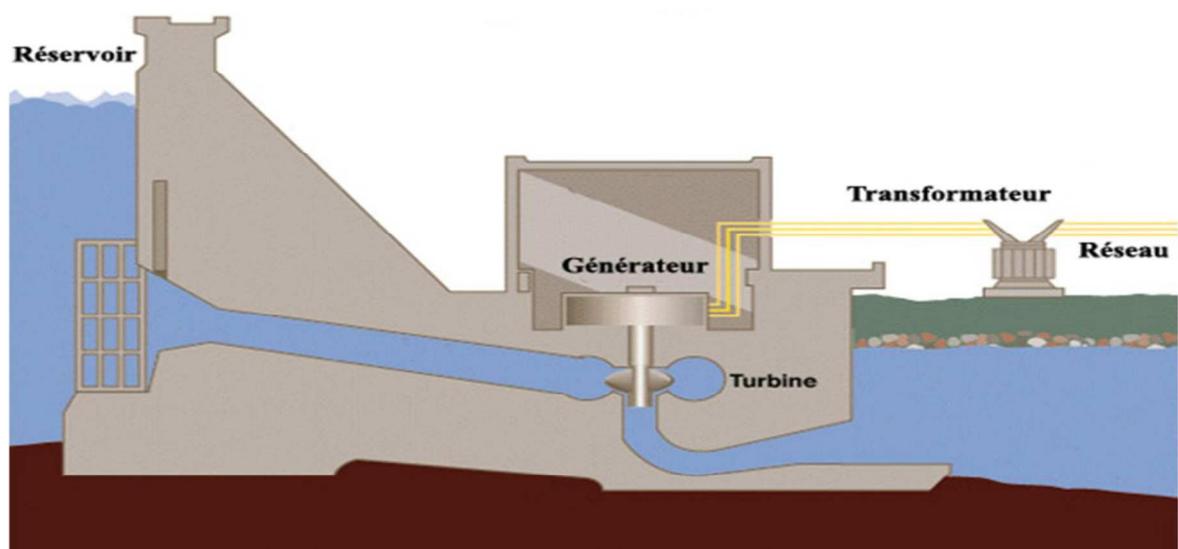


Fig. I.3: Schéma en coupe d'un barrage hydroélectrique [4]

La puissance maximale dépend de la hauteur de chute, du débit d'eau et des caractéristiques mécaniques de la turbine. Il y a trois types principaux de centrales hydroélectriques:

- **Les centrales dites gravitaires** pour lesquelles les apports d'eau dans la réserve sont essentiellement issus du cours d'eau par gravitation,
- **Les Stations de Transfert d'Énergie par Pompage (S.T.E.P.)** aussi connues sous l'appellation centrales hydrauliques à réserve pompée ou centrale de pompage turbinage, qui permettent de pomper l'eau d'un bassin inférieur vers un bassin supérieur. Elles sont souvent utilisées comme une forme de stockage : pompage durant le creux de la demande à partir d'électricité produite par des équipements de base (nucléaire) et production d'électricité par turbinage durant la pointe, plus coûteuse, des équipements de pointe.
- **Les usines marémotrices** au sens large qui utilisent l'énergie du mouvement des mers, qu'il s'agisse du flux alterné des marées (marémotrice au sens strict), des courants marins permanents (dites aussi hydroliennes) ou du mouvement des vagues.

Les centrales gravitaires et celles de transfert d'énergie par pompage peuvent aussi être classées en trois types selon la hauteur de la chute de l'eau :

- Chute haute (> 200 m),
- Chute moyenne (entre 50 et 200 m), - chute basse (< 50 m).

Malgré des coûts de réalisation généralement élevés, les coûts de maintenance sont raisonnables, les installations sont prévues pour fonctionner longtemps et l'énergie de l'eau est gratuite et renouvelable si elle est bien gérée. Donc le bilan est plutôt positif, et les centrales hydrauliques sont parmi les systèmes de production d'électricité les plus rentables.

Les impacts environnementaux varient avec le type et la taille de la structure mise en place : ils sont faibles s'il s'agit des barrages de taille modérée, des courants marins, des vagues, mais ils peuvent devenir importants s'il s'agit de créer des grands barrages. Dans ce dernier cas, la critique est généralement sur la disparition de terres agricoles et de villages, ainsi que la perturbation du déplacement de la faune (pas seulement aquatique) et globalement de l'écosystème environnant [5].

En Algérie, on peut citer le cas de la centrale hydroélectrique de Darguine qui au jour d'aujourd'hui produit 71.5 MW. L'orientation de la société vers cette énergie contribuera à sa remise à niveau et à son développement en construisant d'autres centrales dans le pays.

II. 2 L'énergie solaire (photovoltaïques) :

Le principe de l'obtention du courant par les cellules photovoltaïques (PV) s'appelle l'effet photoélectrique. Ces cellules produisent du courant continu à partir de l'irradiation solaire. La majorité des installations PV sont connectées aux réseaux de distribution (basse tension).

Il existe aussi des grands parcs PV, jusqu'à quelques dizaines ou centaines de MW, connectées au réseau de transmission [6].

L'énergie du rayonnement solaire peut être aussi convertie en chaleur ou indirectement en électricité par la production de vapeur qui entraîne un générateur électrique. Dans ce cas, on parle de solaire thermique. Deux principes de base sont utilisés pour faire cela :

- Capter l'énergie des rayons solaires grâce à un corps noir,
- Concentrer le rayonnement solaire dans un point : four solaire, miroirs paraboliques, concentrateurs.

Cependant, aujourd'hui la forme de conversion de l'énergie solaire en électricité la plus fréquente reste le photovoltaïque. L'évolution de la puissance PV installée dans le monde est présentée sur la fig. (□.2), aujourd'hui elle dépasse 139 GW. L'Europe tient la partie majeure de la puissance installée mondialement.

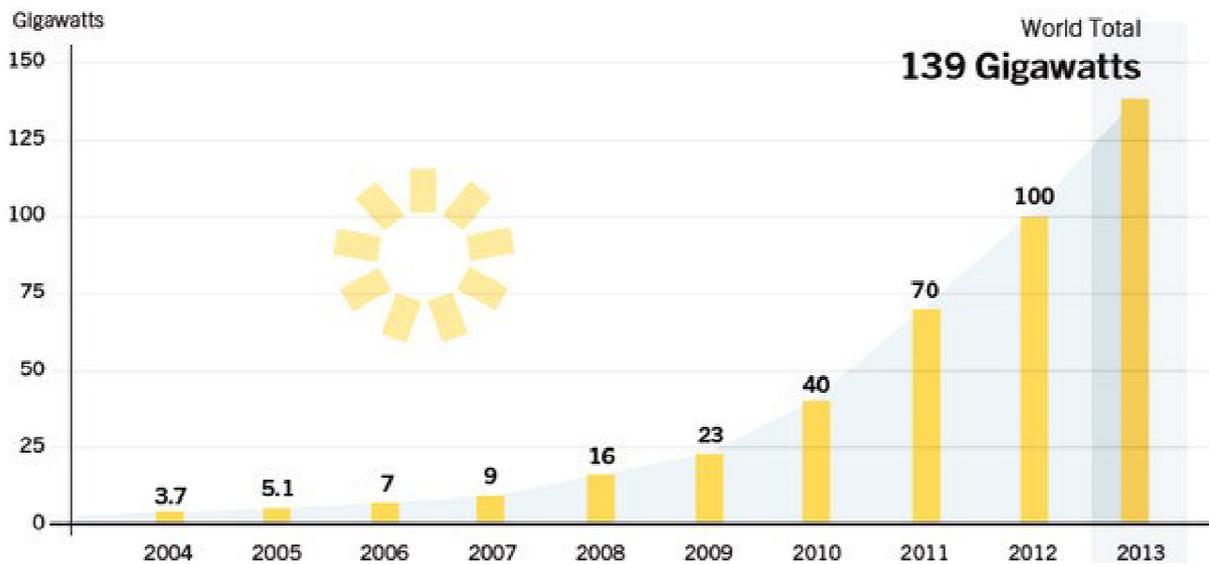


Fig.I.4: Puissance PV installée dans le monde jusqu'en 2013 [7]

Les systèmes PV peuvent être classés en catégories [8] :

- les systèmes autonomes, isolés du réseau,
- les systèmes raccordés au réseau.

En Algérie, cette énergie est à son stade infantile mais l'état a misé sur elle dans son programme ambitieux et sa stratégie énergétique en voie pour le développement durable (2015-2030), de plus que son gisement solaire est vraiment favorable à l'exploitation de cette énergie surtout au sud du pays où seront implantés la majorité de ses projets.

En 2014, Condor (firme investissant dans le domaine des technologies nouvelles) a mis sur le marché des panneaux photovoltaïques mono et poly-cristallin, pour une gamme de produits allant de 70 W à 320 W.

II. 3 Les éoliennes :

Une éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Ensuite cette énergie est transformée en énergie électrique par l'intermédiaire d'une machine électrique. Les termes « parc éolien » ou « ferme éolienne » sont utilisés pour décrire les unités de production groupées, installées à terre « on shore » ou dans la mer « offshore ». Les coûts d'investissement sont relativement élevés, surtout pour le « offshore », mais l'énergie primaire est gratuite et l'impact environnemental est petit [9]. Dans certaines régions, les éoliennes posent quand même quelques problèmes, liés au bruit de basse fréquence, désagréable pour les personnes qui habitent à côté et les impacts avec les troupeaux sur les oiseaux.

Les petites éoliennes peuvent être à axe vertical ou à axe horizontal :



Fig. I.5 : Eolienne à axe horizontal**Fig. I.6 : Eolienne à axe verticale**

La puissance éolienne installée dans le monde est actuellement près de 318 GW (Fig. □.3) [7]. L'éolien peut jouer un grand rôle dans la résolution des problèmes énergétiques de l'humanité, mais le plus grand problème de l'exploitation des éoliennes reste le caractère non-constant de l'énergie produite par ces générateurs [10].

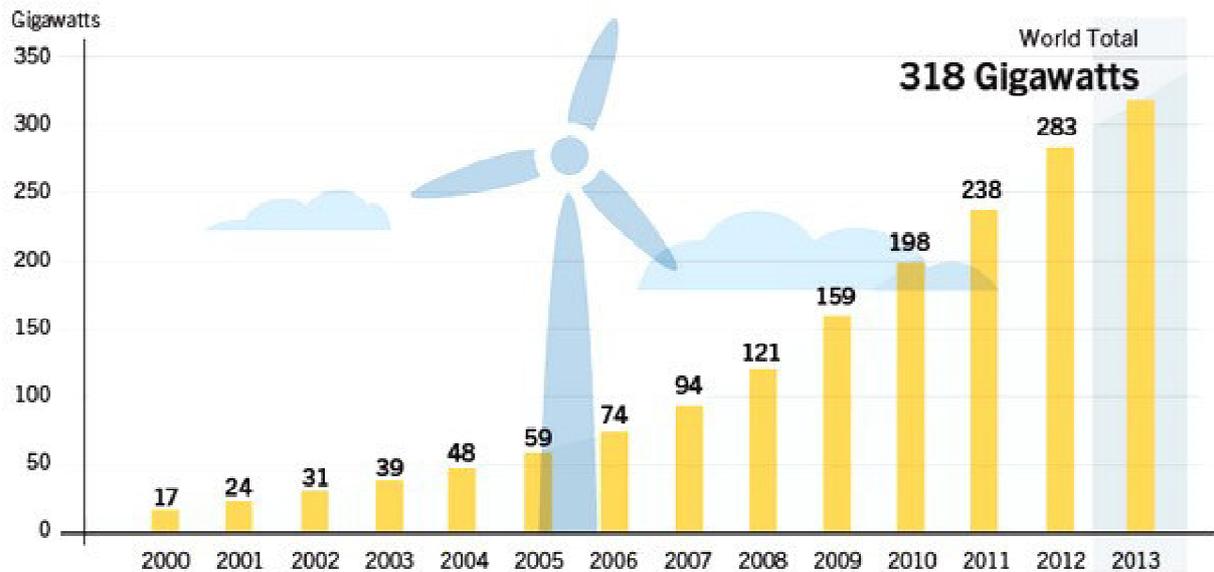


Fig.I.7 : Puissance éolienne installée dans le monde jusqu'à 2013 [7]

L'Algérie dispose d'une ferme éolienne à Adrar avec une capacité 10MW qui a été mise en service en juillet 2014, d'autres projets programmés qui seront concrétisés à l'avenir.

II. 4 La biomasse :

La biomasse est la fraction biodégradable des produits, des déchets et des résidus d'origine biologique provenant de l'agriculture et de l'élevage des animaux, de la pêche et l'aquaculture, ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et municipaux [11]. La biomasse peut être utilisée principalement de deux manières :

- Lors de la fermentation des déchets, le gaz méthane peut être capté et utilisé comme source d'énergie,
- La biomasse elle-même peut être incinérée.

Dans les deux cas, l'énergie thermique peut être utilisée pour produire de l'électricité dans des centrales thermiques. L'intérêt est que le dioxyde de carbone rejeté dans l'atmosphère lors de l'incinération de la biomasse ou le méthane est compensé par celui absorbé par la repousse des plantes qui, entre autre, sont la source principale de biomasse. De cette manière, le bilan carbone peut être proche de zéro [11].

II.5 L'énergie des mers ou énergie marine :

C'est une énergie renouvelable très peu exploitée jusqu'au jour d'aujourd'hui. Elle désigne l'énergie produite par les vagues, par les courants et les marées, ainsi que l'énergie thermique de l'océan chauffé par les rayons du soleil qui travaille sur le gradient thermique entre les couches d'eau de surface et celle des profondeurs. Les océans, qui couvrent presque 70 % de

la surface du globe, pourraient constituer la source d'énergie renouvelable du futur, même si, pour l'instant, leur exploitation pour produire de l'électricité n'est pas rentable [12].

II. Conclusion :

De nos jours le développement durable n'est pas seulement une affaire d'environnementalistes mais aussi celle de tous les acteurs de la société qu'il soit producteur, exploitant ou consommateur. Le domaine des énergies est très prépondérant et crucial, au point qu'il est à l'origine de la majorité des conflits locaux, régionaux et internationaux. Rappelons un exemple du conflit social au sud Algérien, relatif à l'exploitation du gaz de schiste. Néanmoins le développement des énergies propres est pris en charge par la totalité des pays dans le monde mais à des échelles différentes. Contrairement aux idées reçues, où il est souvent dit que ces énergies ne sont pas onéreuses, abondantes et faciles à exploiter, plusieurs problèmes sont à soulever, à l'exemple de l'insertion de ces ressources aux réseaux.

Cette problématique a été prise en charge dans ce travail, tout d'abord en la vulgarisant et en mettant en exergue les différents mécanismes mis ou à mettre en place pour assurer une transition d'une production centralisée à une autre décentralisée. Un état d'art sur les différentes ressources du renouvelable a été présenté. Puis, vient un autre état d'art sur les travaux et les investigations menés dans le sens de faciliter l'intégration de ces dernières aux réseaux. Les développements mathématiques et les simulations seront traités dans le projet de fin d'études qui suivra cette recherche bibliographique.

I. Introduction :

Partout dans le monde, la consommation globale énergétique augmente d'une façon vertigineuse, et ce au détriment de l'environnement qui nous entoure et dont notre survie en dépend. En effet, les sources d'énergies fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel) sont utilisées de manière continuellement abusive.

Ces dernières, en plus d'être extrêmement polluantes quand elles subissent un processus de combustion, possèdent des réserves limitées dans le temps. Ainsi, la communauté scientifique reconnaît aujourd'hui la responsabilité de cette surconsommation sur le réchauffement climatique qui risque d'avoir de dramatiques effets sur les équilibres physiques, politiques et sociaux-économiques de notre planète.

Le recours à des énergies propres pour assurer la sécurité énergétique et le développement des populations devient incontournable, et la recherche dans le domaine des ressources d'énergie alternatives est devenue donc une question cruciale. Les énergies renouvelables et particulièrement l'énergie solaire, sont les seules solutions pour

Sortir de la dépendance envers les sources fossiles et les problèmes qu'elles provoquent.

Ce choix, motivé par le fait que la quantité d'énergie solaire reçue chaque jour par la planète est 5 fois supérieure à la totalité des consommations quotidiennes humaines (nucléaire, charbon, bois, fioul, gaz, hydraulique...), paraît être la solution miracle, surtout dans les pays du Sud qui sont extrêmement bien ensoleillés.

Dans ce cas la solution appropriée c'est d'utiliser la technologie photovoltaïque est une technologie permettant de convertir l'énergie solaire (photons) en énergie électrique par l'intermédiaire de cellules photovoltaïques, disposées en modules appelés panneaux photovoltaïques.

Les systèmes photovoltaïques sont utilisés dans les sites isolés et même dans les villes et les cités avec des puissances crêtes qui varient des centaines à quelques MW.

Mais dans la grande majorité des cas, les générateurs photovoltaïques sont fixes.

L'énergie solaire incidente sur les cellules n'est pas optimale en fonction de l'heure d'une part et de la saison, d'autre part. Le rendement d'un module photovoltaïque est assez faible (autour de 15%), c'est pourquoi, il faut exploiter le maximum de puissance qu'ils peuvent générer en réduisant au maximum les pertes énergétiques reçues du soleil

Les inconvénients des suiveurs programmés c'est les prix de leurs fabrication et d'installation sont assez élevés, et leur rendement énergétique est faible (environ 15%).

II. Caractéristiques du système photovoltaïque :

II.1 Le rayonnement solaire

Le rayonnement émis par le soleil est constitué d'ondes électromagnétiques dont une partie parvient constamment à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre. En raison de la température superficielle du soleil (environ 5800 K°), ce rayonnement électromagnétique se situe dans la gamme de longueur d'onde de la lumière visible (entre 0,4 et 0,75 μm) et dans le proche infrarouge (au-delà de 0,75 et jusqu'à 4 μm environ) [14].

Suite à l'atténuation du rayonnement solaire par les différents phénomènes atmosphériques, le rayonnement solaire sur une surface au sol est composé comme suit :

- Le rayonnement direct :

La conversion du rayonnement direct est une question trigonométrique. Le rayonnement direct, sur le plan horizontal, est la différence entre le rayonnement global et le rayonnement diffus.

- Le rayonnement diffus :

Il est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire global par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages et les aérosols.

- Le rayonnement réfléchi ou l'albédo du sol :

C'est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige, etc....).

- Le rayonnement global :

Le rayonnement global est subdivisé en rayonnements directs, diffus et reflété par le sol.

Dans la figure ci-dessous figure (II.1) est schématisé l'ensemble des rayonnements solaires reçu sur une surface terrestre.

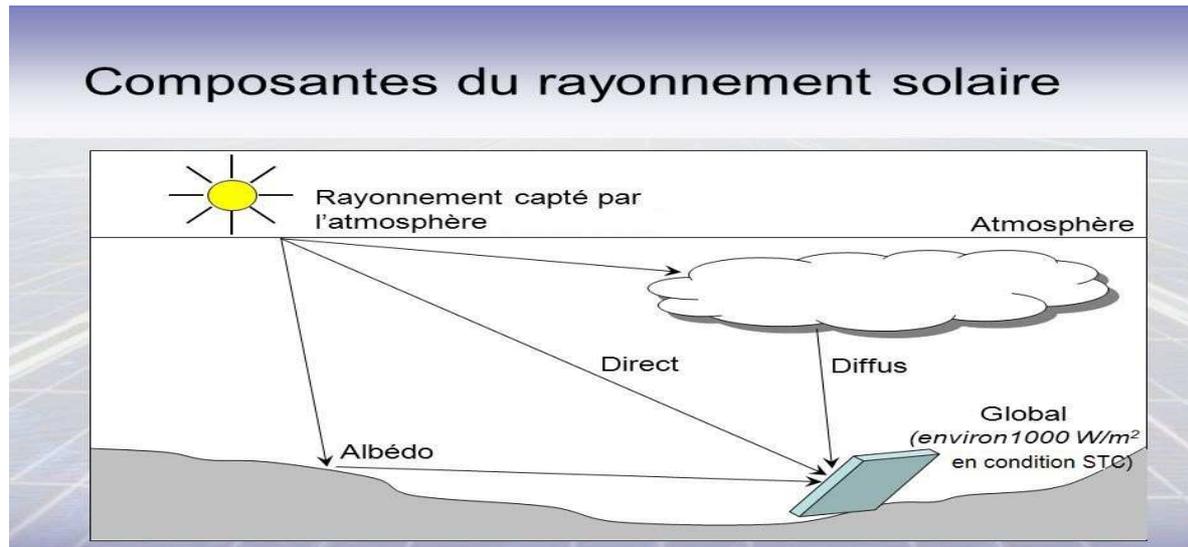


Fig. II.1 : Types de rayonnement solaire reçus au sol

L'intensité du rayonnement solaire reçu sur un plan quelconque à un moment donné et appelée irradiation ou éclairement (noté généralement par la lettre G), il s'exprime en watts par mètre carré (W/m^2). La valeur du rayonnement reçu par la surface du module photovoltaïque varie selon la position de ce dernier. Le rayonnement solaire atteint son intensité maximale lorsque le plan du module photovoltaïque est perpendiculaire aux rayons [15].

II.2 L'effet photovoltaïque

Il s'agit de transformer l'énergie contenue dans la lumière du soleil en énergie électrique à travers d'un capteur constitué de matériaux sensible à l'énergie contenue dans les photons délivrant une tension de l'ordre de 0,4 à 0,7 V. Ce capteur est présenté à l'échelle élémentaire sous forme d'une cellule PV. L'effet photovoltaïque fut observé la première fois en 1839 par le physicien français Edmond Becquerel. Toutefois ce n'est qu'au cours des années 1950 que les chercheurs de la compagnie Bell, aux Etats-Unis parvinrent à fabriquer la première photopile, l'élément primaire ou de base de la conversion photovoltaïque.

II.3 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque:

Les cellules solaires permettent de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement *dopée de type n* et *dopée de type p*. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau *n* diffusent dans le matériau *p*. La zone initialement dopée *n* devient chargée positivement, et la zone initialement dopée *p* chargée négativement [16].

Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone *n* et les trous vers la zone *p*. Une jonction (dite *p-n*) a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones *n* et *p*, une diode est obtenue. Lorsque

la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiels: le courant électrique circule.

Le fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la figure (II.2)

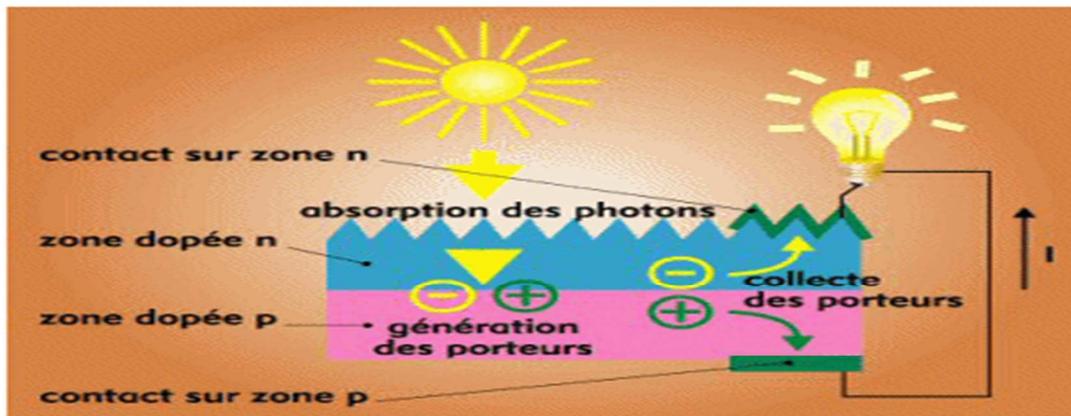


Fig. II.2: Principe de la conversion photovoltaïque

II.4 Type de cellules photovoltaïques

Il existe différents types de cellules photovoltaïques, les plus répandues sont constituées de semi-conducteur, principalement à base de Silicium [17]. On trouve trois principaux types de cellules :

- **Les cellules monocristallines:**

C'est la première génération de photopiles, elles ont un excellent rendement ainsi une méthode de fabrication laborieuse et difficile, donc très chère.

- **Les cellules poly-cristallines:**

Un rendement élevé et un coût de production moins élevé ainsi un procédé nécessitant moins d'énergie.

- **Les cellules amorphes:**

Un rendement faible et un coût de production bien plus bas ainsi une durée de vie plus faible, (cellules de calculatrices par exemple).

Les différents rendements en fonction de technologie des cellules donnée par le tableau II.1

De plus, les cellules mono et poly-cristallines sont les types de cellules les plus répandues sur le marché du photovoltaïque (environ 60% de la production).

Type de cellules	Rendement des cellules(%)		
	Théorique	Au labo	Production
Silicium monocristallin	27	24.7	13-17
Silicium poly cristallin	27	19.8	11-15
Silicium amorphe	25	13	5-9

Tableau II.1 : Rendement

$$\eta_{STC} = \frac{P_m}{E_{STC} \times S_{cellule}}$$

η_{STC} : Le rendement de la cellule photovoltaïque.

P_m : La puissance produite par le générateur PV.

E_{STC} : L'éclairement absorbé par la cellule.

$S_{cellule}$: La surface de la cellule [m²].

Ce rendement dépend de plusieurs facteurs [18]:

- Réflexion à la surface,
- Température de jonction des cellules,
- Type de matériau utilisé et technique de fabrication,
- La résistance série et parallèle responsable des pertes par effet Joule,
- Absorption incomplète et excès d'énergie des photons absorbés.

II.5 .1 Les paramètre des cellules photovoltaïques

- Il existe de nombreux paramètres qui permettent de caractériser une cellule solaire. Ces paramètres sont appelés paramètres photovoltaïques et sont déduits de la caractéristique $I(V)$. Le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque comprend un générateur de courant qui modélise l'éclairement et une diode en parallèle qui modélise la jonction P-N. Mais le schéma équivalent réel tient compte de l'effet résistif parasite dû à la fabrication, il est représenté sur le schéma équivalent par deux résistances.

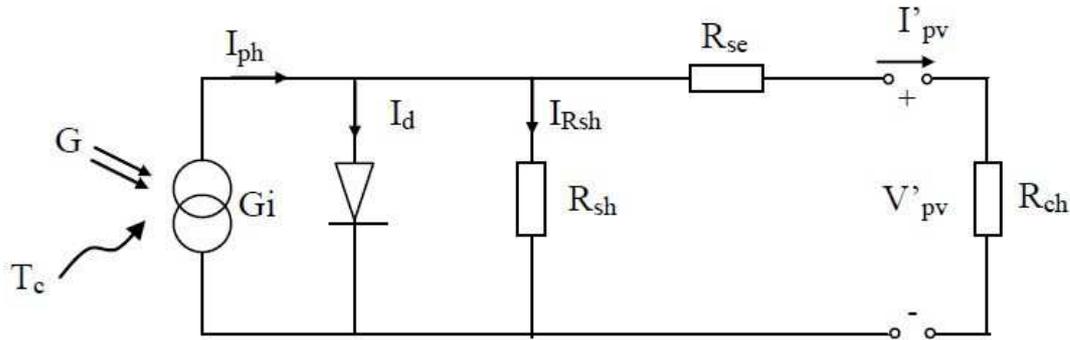


Fig. II.3 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque avec charge

- \$G_i\$: Source de courant parfaite,
- \$R_{sh}\$: Résistance shunt qui prend en compte les fuites inévitables de courant qui intervient entre les bornes opposées positive et négative d'une cellule,
- \$R_{se}\$: Résistance série qui est due aux différentes résistances électriques que le courant rencontre sur son parcours (résistance de contact),
- \$D\$: Diode matérialisant le fait que le courant ne circule que dans un seul sens,
- \$R_{ch}\$: Résistance qui impose le point de fonctionnement sur la cellule en fonction de sa caractéristique courant-tension à l'éclairement considéré [16],
- Une cellule solaire est caractérisée par les paramètres fondamentaux suivants:
- **Courant de court-circuit (\$I_{sc}\$)** : C'est la plus grande valeur du courant générée par une cellule pour une tension nulle (\$V'_{pv}=0\$).
- **Tension en circuit ouvert (\$V_{oc}\$)** : Représente la tension aux bornes de la diode quand elle est traversée par le photo-courant \$I_{ph}\$ (\$I_d = I_{ph}\$) quand (\$I'_{pv}=0\$). Elle reflète la tension de la cellule en absence de lumière, elle est exprimée mathématiquement par :

$$V_{oc} = \frac{mKT_c}{C} \ln\left(\frac{I_{PH}}{I_0}\right) = V_t \left(\frac{I_{PH}}{I_0}\right)$$

Ou : \$V_t = \frac{mKT_c}{e}\$ avec :

\$V_t\$: La tension thermique,

\$T_c\$: La température absolue,

\$m\$: Facteur idéal de la jonction,

\$K\$: Constante de Boltzmann (\$K= 1.38 \cdot 10^{-23}\$ J/k),

\$e\$: Charge de l'électron (\$e=1.6 \cdot 10^{-19}\$).

Point de puissance maximale (\$P_{max}\$): est le point M (\$V_{opt}\$, \$I_{opt}\$) où la puissance dissipée dans la charge est maximale.

$$P_{max} = V_{opt} \times I_{opt}$$

Avec :

V_{opt} : La tension optimale

I_{opt} : Le courant optimal.

Rendement maximum : est le rapport entre la puissance maximale et la puissance à l'entrée de la cellule solaire.

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{IN}} = \frac{V_{OPT} \times I_{OPT}}{A_{PV} \times G}$$

G : l'irradiation qui représente la puissance lumineuse reçue par unité de surface (W/m^2).

A_{PV} : Surface effective des cellules.

Les conditions normalisées de test des panneaux solaires (STC) sont caractérisées par un rayonnement instantané de $1000W/m^2$ d'une température ambiante de $25^{\circ}C$ et d'un spectre AM de 1.5. AM représente l'Air Masse qui est l'épaisseur de l'atmosphère que la lumière doit pénétrer. Ces conditions sont appelées STC (Standard Test Conditions) cela correspond à un ensoleillement assez fort.

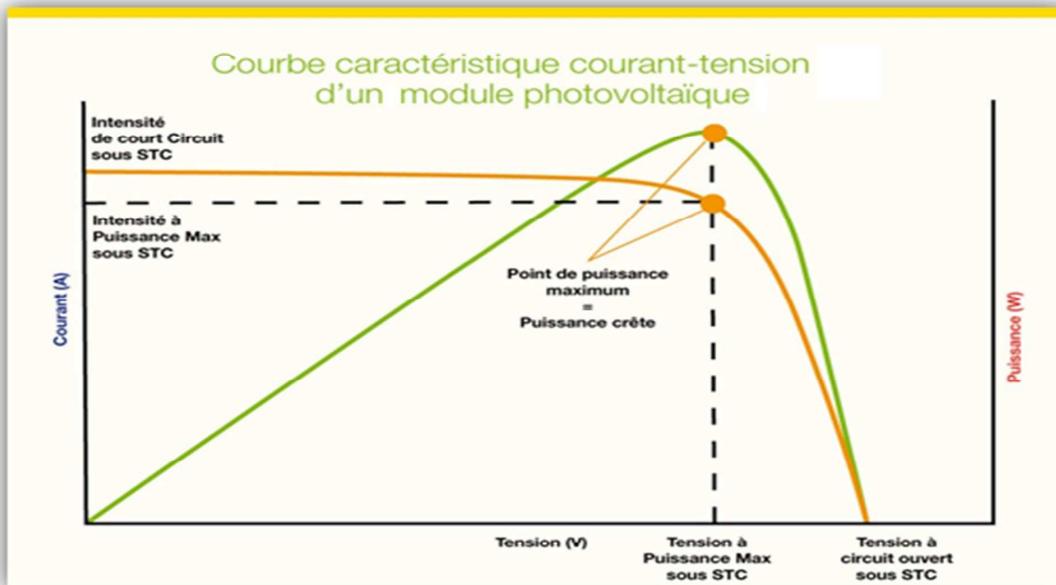


Fig. II.4: Courbe courant -tension d'une cellule photovoltaïque

Facteur de forme FF:

Le facteur de forme détermine la qualité électrique de la cellule, il dépend d'un ensemble de paramètres [19], il est obtenu par l'équation suivante :

$$FF = \frac{P_m}{V_{oc} \times I_{cc}} = \frac{V_m \times I_m}{V_{oc} \times I_{cc}}$$

V_m : Tension maximale,

I_m : Courant maximal.

II.5.2 Influence de l'éclairement

L'augmentation du flux lumineux fait accroître le courant de court-circuit I_{sc} , ainsi qu'une légère augmentation de la tension de circuit ouvert.

II.5.3 Influence de la température

La température est un paramètre important dans le comportement des cellules. La figure (II.7) montre que l'augmentation de la température entraîne une diminution nette de la tension de circuit ouvert, ainsi qu'une légère augmentation de courant de court-circuit.

II.6.1 Le module photovoltaïque

Un générateur photovoltaïque (GPV) est par définition un ensemble de photopiles (cellules solaires) assemblées pour générer une puissance électrique exploitable lors de son exposition au rayonnement solaire utile. En effet, une photopile élémentaire ne produit qu'une très faible puissance électrique moins de 3 W avec une tension de l'ordre d'un volt (1 V) : entre 0,5V et 1,5 V selon les technologies. Afin de produire plus de puissance, les cellules sont assemblées en série et en parallèle pour former un module photovoltaïque

[20].



Fig. II.5 : Module photovoltaïque

II.6.2 Association des cellules photovoltaïques

- **Association en série:**

L'association des cellules photovoltaïques en série permet d'atteindre une tension désirée (Figure II.9). Le courant de la branche reste le même, mais la tension augmente proportionnellement selon le nombre de cellules mises en série. Les fabricants trient les cellules de même courant pour les mettre en série par ce que si une

d'elles était d'un faible courant elle imposerait son courant aux autres. Cette technique est appelée l'appairage en courant.

- **Association en parallèle:**

L'association des cellules photovoltaïques en parallèle permet d'avoir le courant voulu (Figure II.10). La tension de la branche est égale à la tension de chaque cellule et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de cellules en parallèle. On trie aussi les cellules de même tension (l'appairage en tension) pour avoir un module robuste.

II.6.3. Protection d'un module photovoltaïque

Lorsque nous concevons une installation photovoltaïque, nous devons assurer la protection électrique de cette installation afin d'augmenter sa durée de vie en évitant notamment des pannes destructrices liées à l'association des cellules et de leurs fonctionnements. Pour cela, deux types de protection sont classiquement utilisés dans les installations actuelles :

- La protection en cas de connexions en parallèle de cellules photovoltaïques pour éviter les courants négatifs dans les GPV (diode anti-retour).
- La protection lors de la mise en série de cellules photovoltaïques permettant de ne pas perdre la totalité de la chaîne (diode by-pass).

II.7 Différents types de systèmes photovoltaïques

On rencontre généralement trois types de systèmes photovoltaïques, les systèmes **autonomes**, les systèmes **hybrides** et les systèmes **connectés à un réseau** qu'on a défini ci-dessous. Les deux premiers sont indépendants du système de distribution d'électricité, en les retrouvant souvent dans les régions éloignées [16].

•Système photovoltaïque connecté au réseau électrique

Dans ce genre de système, l'électricité est produite en courant continu par les capteurs, puis transformée en courant alternatif par un onduleur. Ce dernier contrôle la puissance injectée au réseau, le courant alternatif (converti par l'onduleur) est identique à celui qui circule sur le réseau et peut, soit être consommé sur place, soit être injecté sur le réseau.

La connexion GPV-charge via un étage d'adaptation (continu-alternatif)

Il existe différentes topologies de gestion de ces installations. Néanmoins, toutes ces approches reposent sur un GPV raccordé au réseau par le biais d'onduleurs qui transfèrent et mettent en forme l'énergie solaire électrique. Les progrès effectués ces dernières années dans le développement des onduleurs dédiés aux photovoltaïques ont permis de faire évoluer grandement ces systèmes de gestion.

Les onduleurs ne se limitent plus seulement à transformer la puissance continue (DC) générée par les panneaux solaires en puissance alternative sous forme d'une tension sinusoïdale de fréquence souhaitée (par ex. 230V/400V - 50Hz) mais ils exploitent également la puissance délivrée par le GPV en le forçant à fonctionner à son point de puissance maximum.

De plus, ils assurent une surveillance fiable du réseau pour protéger ce dernier contre les pannes et interrompre l'alimentation en cas de problèmes survenant soit du réseau soit de l'installation. Actuellement, il existe principalement trois architectures d'onduleurs donnant de bonnes solutions techniques : l'onduleur central, les onduleurs strings et les onduleurs intégrés aux panneaux. Nous décrivons brièvement leur propriété ci-dessous [19].

L'onduleur central

Dans le cas d'onduleur central, les divers panneaux solaires pour une grande installation (>10kW) sont montés en rangées pour former une chaîne (String en anglais), elle-même couplée en parallèle avec des diodes anti-retours à plusieurs autres (Figure II.7). Le générateur PV de forte puissance ainsi structuré est relié du côté DC à un seul onduleur. Cet onduleur central présente une grande efficacité énergétique à des coûts réduits. La fonction principale de cet appareil est de créer une tension alternative à partir d'une tension continue la plus compatible avec le réseau et d'examiner en permanence la présence ou non du réseau pour autoriser l'injection du courant. La structure classique de l'onduleur est souvent un circuit en pont permettant de relier chacun des deux pôles d'entrée à chacun des deux pôles de sortie par le biais d'interrupteurs de puissance.

Le couplage direct des installations PV avec des onduleurs sans transformateur gagne en importance. En effet, ils sont peu onéreux et offrent un rendement énergétique imbattable (entre 95% et 97% pour les fortes puissances). Pour pouvoir alimenter le réseau, la tension d'entrée doit toujours dépasser la tension crête de la tension réseau redressée. Soit, pour une valeur de tension efficace réseau de 250V, une source de tension minimale de 354V est nécessaire pour pouvoir injecter un courant sinusoïdal dans le réseau. Par conséquent, un panneau mal adapté ou encore un ombrage partiel porte préjudice à une exploitation optimale de chaque chaîne PV et entraîne une réduction du rendement énergétique. L'onduleur central possède de plus en plus souvent au moins un système de contrôle MPPT lui permettant de fonctionner à son PPM. Cela marche parfaitement tant que les panneaux sont identiques et qu'ils fonctionnent sous un ensoleillement homogène. Mais lorsque les caractéristiques électriques entre les panneaux diffèrent, dues à des ombrages, des salissures, au vieillissement ou au stress, la commande MPPT devient incertaine et le champ photovoltaïque ne produit pas autant qu'il le pourrait. En outre, la fiabilité de l'installation est limitée parce qu'elle dépend d'un seul onduleur. Ainsi, lorsqu'une panne de l'onduleur central se produit, elle entraîne l'arrêt complet de l'installation et donc de la production.

Les onduleurs string

De même que pour l'onduleur central, le champ PV est, ici aussi constitué de strings (chaînes). Chaque string est toutefois relié à un onduleur (Figure II.7). Chaque string peut ainsi fonctionner à son PPM. Cette technologie réduit considérablement le risque de problèmes d'adaptation ainsi que les pertes dues aux effets d'ombrage, tout en éliminant celles occasionnées par les diodes anti-retour et un câblage prolongé vers le générateur DC. Ces propriétés techniques avantageuses accroissent la fiabilité de l'installation ainsi que sa production énergétique. Mais il faut prendre en compte l'augmentation du nombre d'onduleurs de moyenne puissance disposant de rendement compris entre 92% et 96% nécessaires pour calculer le surcoût d'une telle architecture par rapport à la précédente [19].

Les onduleurs intégrés aux panneaux photovoltaïques:

Chaque panneau dispose ici de son propre onduleur (Figure II.7), ce qui permet théoriquement d'éviter toutes pertes liées à la différence de puissance entre chaque module quelle que soit l'origine du défaut. Le rendement des onduleurs intégrés aux panneaux reste cependant en-deçà de celui de l'onduleur string à cause de la grande différence des tensions entre les GPV et la charge. De plus, les onduleurs intégrés aux panneaux induisent des coûts de câblage supplémentaires du côté AC, étant donné que chaque panneau de l'installation doit être relié au réseau 230 V. Le nombre nettement supérieur d'onduleurs intégrés aux panneaux nécessaires dans cette architecture entraîne un travail de couplage nettement plus conséquent. Ce concept ne s'applique donc généralement qu'aux installations PV d'une puissance modeste allant de 50 W à 400 W[19].

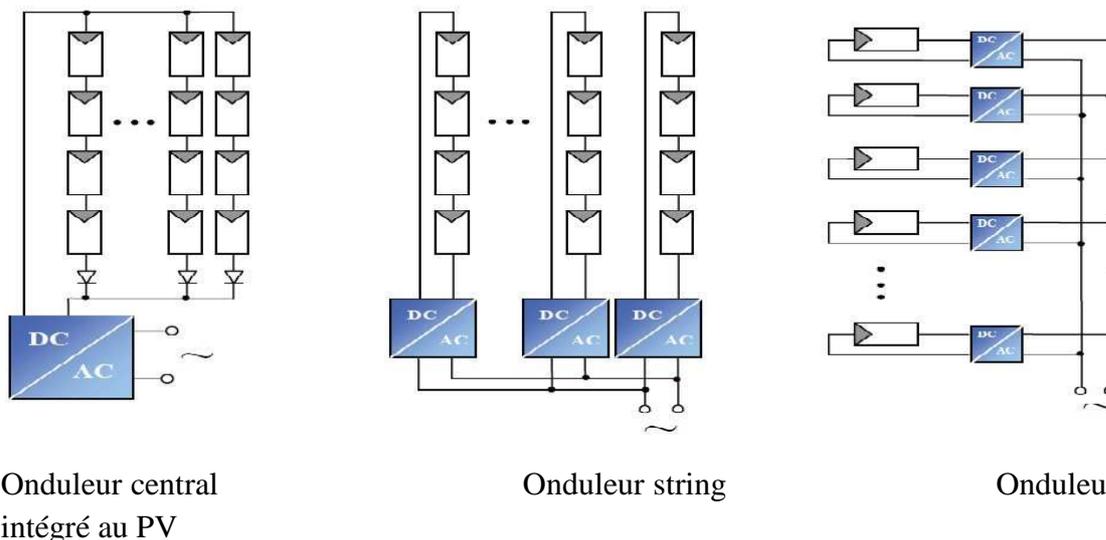


Fig II.7.1: Schémas de principe de différentes topologies d'installations PV connectés à un Réseau électrique.

La conversion multi-string:

En fait, la gestion multi-string est née de la combinaison entre la gestion par onduleur central et la gestion par strings. Comme illustré en (Figure II.8), le principe

de la conversion multi-string est basé sur de nombreux convertisseurs DC-DC modulables connectés à un onduleur central via un bus continu. Chaque convertisseur DC-DC dispose de sa propre commande MPPT permettant à chaque string de fonctionner à son PPM. Par conséquent, le dysfonctionnement d'un GPV peut être rapidement détecté et localisé. Le fonctionnement de l'ensemble du champ ne sera donc pas affecté par le dysfonctionnement d'un seul GPV. Grâce aux convertisseurs DC-DC, il est possible de travailler sur une plus large gamme de tension PV (tension plus faible en entrée des DC/DC) optimisant ainsi la production photovoltaïque.

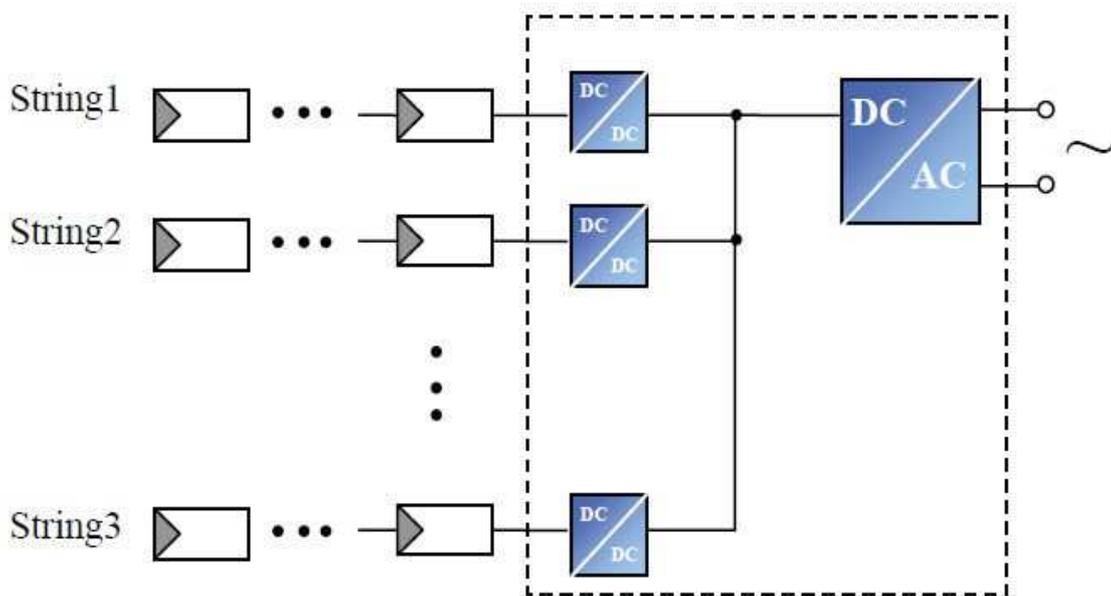


Figure II.7: structure de conversion multi-string mixte.

III. Conclusion :

Après avoir établi l'état de l'art sur les ressources du renouvelable en général dans le chapitre I, nous avons développé les caractéristiques de trois principales ressources, à savoir : le photovoltaïque, l'éolien et l'hydro-électrique. Cela nous permet d'introduire en premier lieu les avantages et les inconvénients de ces différentes ressources et puis de mettre en exergue les problèmes de leur insertion dans les réseaux. Cette thématique fera l'objet du troisième chapitre.

I. Introduction :

Après avoir étudié et citer les différents composants du système photovoltaïque, aussi que l'influence des paramètres de ses composants sur le système, nous procédons à la modélisation du système.

La modélisation nécessite un ensemble d'équations caractérisant tous les éléments du système étudié. A ce niveau, la condition qui s'impose c'est de connaître les critères d'entrées (donnée de base) c'est-à-dire les données météorologiques au site, les données relatives aux utilisations, et les données relatives aux équipements.

De nombreux articles publiés dans la littérature scientifique portent sur le développement de modèles pour chacun des composants du système.

Dans ce chapitre, nous représenterons d'abord le modèle de rayonnement solaire sur un plan horizontal, et sur un plan incliné ; champ photovoltaïque, le modèle du système de stockage (batterie) et finalement le modèle de conversion (onduleur).

II. Modélisation d'une cellule photovoltaïque :

II. 1. Modèle mathématique :

Le modèle mathématique associé à une cellule se trouve à partir de celui d'une jonction PN. On y ajoute le courant I_{PV} proportionnel à la quantité de photons reçus par la cellule [20], ainsi qu'un terme modélisant les phénomènes internes. Le courant I issu de la cellule s'écrit alors.

$$I = I_{pv\text{cell}} - I_{sat\text{cell}} \left(\exp \left(\frac{q \cdot V}{a \cdot k \cdot T} \right) - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_p} \tag{.....1}$$

$$I_D = I_{sat\text{cell}} \left(\exp \left(\frac{q \cdot v}{a \cdot k \cdot T} \right) - 1 \right) \tag{.....2}$$

Avec :

$$I = I_{pv\text{cell}} - I_D$$

$V_T = kT / q$: le potentiel thermodynamique à une température donnée

$I_{PV\text{cell}}$: photo courant (A)

I_D : le courant d'une jonction PN (A)

I_{sat} : le courant de saturation(A)

R_s : résistance série (Ω)

R_p : résistance parallèle (shunt)(Ω)

K : la constante de Boltzmann ($k=1.38*10^{-3}(j / ^\circ k)$)

q : la charge de l'électron ($q=1.6*10^{-19}(c)$)

T : la température de la cellule ($^\circ k$)

a : le facteur d'idéalité ($1 \leq a \leq 2$, $a=2$ pour une diode en silicium)

On peut déduire de cette expression un schéma équivalent comme le montre la figure.III.1

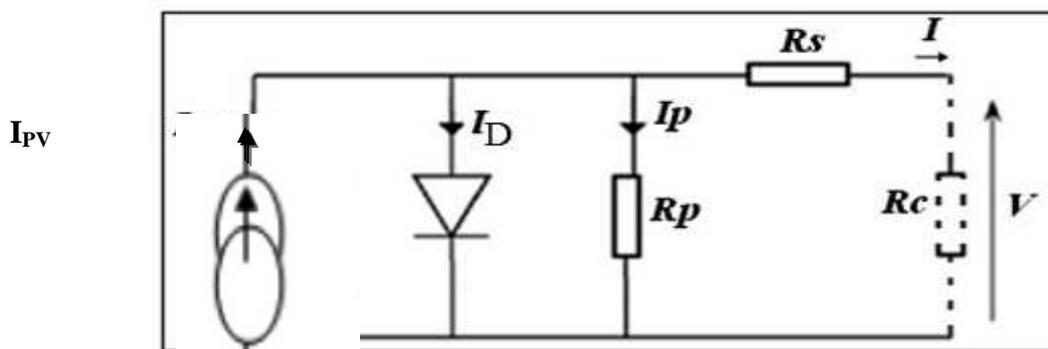


Fig.III.1 Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle

Les valeurs respectives de ces éléments déterminent les performances de la cellule réelle en particulier les caractéristiques courant-tension $I = f(V)$ comme le montre la figure II.2

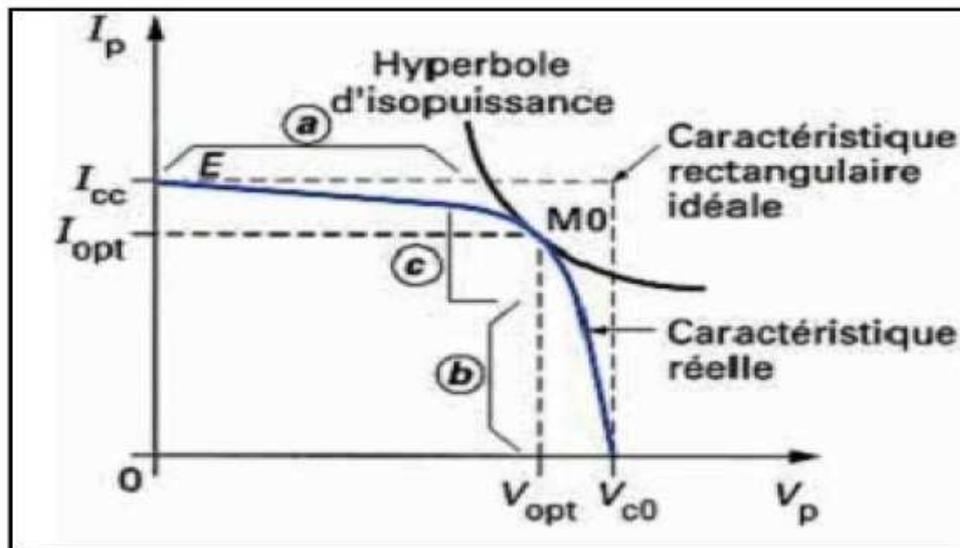


Fig.III.2 les différentes zones de la Caractéristique d'une cellule photovoltaïque réelle

La caractéristique se divise en trois parties :

- **La zone (a)** : où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.
- **La zone (b)** : correspondant au coude de la caractéristique, la région intermédiaire entre les deux zones, représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.
- **La zone (c)** : qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension

La diode modélise le comportement de la cellule dans l'obscurité. Le générateur de courant modélise le courant I_{pv} .

Enfin les deux résistances modélisent les pertes internes :

R_s (résistance série) : modélise les pertes ohmiques du matériau.

R_p (résistance parallèle) : modélise les courants parasites qui traversent la cellule.

III. Modélisation d'un panneau photovoltaïque :

III. 1. Caractéristique d'un panneau photovoltaïque :

Une fois que l'on a caractérisée la cellule photovoltaïque, on modélise le module PV comme une association de n cellules en série, en supposant qu'elles sont identiques. Le courant de court-circuit du module est égal à celui de la cellule, tandis que la tension à circuit ouvert du module se multiplie par le nombre de cellules en parallèle.

La caractéristique d'un module qui comporte N_s cellules connectées en série et N_p cellules connectées en parallèle est donnée par :

$$I = I_{pv} - I_{sat} \left[\exp \left(\frac{V + R_s I}{a \cdot V_T} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p} \dots\dots\dots(3)$$

Avec : $I_{pv} = I_{pvcell} * N_p$ et $I_{sat} = I_{satcell} * N_p$

Et $V_T = N_s k T / q$: la potentielle thermodynamique d'un panneau photovoltaïque.

Les équations du modèle sont présentées en détails et le modèle

Est validé avec les données expérimentales

Le courant généré de la cellule photovoltaïque dépend linéairement de l'irradiation solaire et est également influencé par la température selon l'équation suivante :

$$I_{pv} = (I_{pvn} + K_I \Delta T) G / G_n \dots\dots\dots 4$$

Avec : $I_{pvn} = \frac{R_p + R_s}{R_p} I_{ccn}$

$I_{pv,n}$: est le courant généré par la lumière à la valeur nominale. (Généralement de 25°C et 1000w /m²),

$\Delta T = T - T_n$: (T et T_n étant la température réelle et nominale [K]),

G [w/m²] : est l'irradiation sur la surface du dispositif,

G_n : est l'irradiation nominale.

L'hypothèse $I_{cc} \approx I_{pv}$ est généralement utilisée dans les modèles photovoltaïques, car dans les dispositifs pratiques la série la résistance est faible et la résistance parallèle est élevée

$$I_{cc} = (I_{ccn} + k_I \Delta T) G / G_n$$

I_{cc} : courant de court-circuit

Le courant de saturation Isat de diode et de sa dépendance sur la température peut être exprimée par :

$$I_{sat} = I_{satn} \left(\frac{T_n}{T} \right)^3 \exp \left(\frac{qE_g}{ak} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right) \dots\dots\dots 5$$

Avec

$$I_{satn} = \frac{I_{ccn}}{\exp \left(\frac{V_{ccn}}{aV_T n} \right) - 1} \dots\dots\dots 6$$

E_g : l'énergie de la bande interdite du semi-conducteur (E_g ≈ 1,12eV pour le silicium à 25°C)

I_{sat,n} : le courant de saturation nominale

V_{T,n} : la tension thermique à la température nominale .

IV. Modèles de coordonnées soleil :

IV. -1 Angle solaire :

Les angles solaires sont des facteurs intéressants pour le calcul de rayonnement solaire

- **La latitude** (φ) : est l'angle formé par le plan équatorial et la direction reliant le lieu considéré, au centre de la terre. Les latitudes de l'hémisphère Nord sont affectées d'un signe positif et celles de l'hémisphère Sud d'un signe négatif. Nous prenons celle de Bechar [33] : φ=31.63° N
- **La longitude** (λ) : représente l'angle formé par le plan méridien de lieu considéré et le plan méridien origine. Ce dernier passe par l'observatoire de Greenwich et a pour longitude 0°. Les longitudes situées à l'est de ce méridien sont positives et celles situées à l'Ouest négatives. Nous prenons celle de Bechar [33] : λ=2.40° W

- **La déclinaison** (ω) : set l'angle entre la direction du soleil et le plan équatorial Elle traduit l'inclinaison du plan équatorial par rapport au plan écliptique. Sa valeur varie entre $-23^{\circ}7'$ (Au solstice d'hiver) st $+23^{\circ}7'$ (au solstice d'été) et s'annule aux équinoxes de printemps et d'automne (figure 1-9). Cet angle varie très peu pendant une journée, ce qui permet d'approcher le mouvement quotidien du soleil par une rotation sur cône d'axe l'équateur, de demi angle au sommet $\omega = 90^{\circ} - \omega$. L'ange ω sera donc fonction du jour de l'année.

$$\omega = +23.45^{\circ} * \sin\left(\frac{360}{365} * N - 80\right) \dots\dots\dots 7$$

N est le nombre de jours de l'année compté à partir du 1^{er} janvier, il varie de 1 à 365 ou 366 Selon l'année :

Année civile : 365 jours

Année bissextile : 366 jours.

- **L'angle horaire du soleil** (δ) : repère la position du soleil dans sa rotation journalière sur le cône d'ouverture δ' . C'est l'angle entre le plan méridien passant par l'observateur et le plan méridien contenant le soleil. En principe, un jour solaire (δ variant de -180° à $+180^{\circ}$) correspond à 24h :

$$\delta = 15 \left(heuresUTC - 12 + \frac{\lambda}{15} \right) \dots\dots\dots 8$$

La position apparente du soleil est déterminée par ses coordonnées angulaires par rapport à au plan horizontal (figure 1-10), l'azimut et la hauteur angulaire.

- **L'azimut** ψ : qui est l'angle formé par projection de la direction du soleil et la direction du Sud. Il est comté positif à l'Ouest (le matin) et négatif à l'Est (le soir). Sa valeur est obtenue lorsque le soleil se couche (suivant la hauteur angulaire du solaire, et l'inclinaison du panneau). Dans notre cas, nous écrètons ψ lorsque $\sin\gamma$ passe en négatif si le panneau est horizontal (le soleil se couche), ou lorsque $\psi > 45^{\circ}$ dans le cas où le panneau est incliné à 45° (le soleil passe derrière le panneau) :

$$\tan(\psi) = \frac{\sin \delta}{\sin \varphi \cos \delta - \cos \varphi \sin \omega} \dots\dots\dots 9$$

- **La hauteur angulaire** (γ) : Qui détermine la longueur de la traversée de la l'atmosphère est l'angle formé par la direction de soleil et le plan horizontal. Sa valeur sera comprise entre 0° (au lever et au coucher) et maximum γ_m au zénith (midi en temps solaire vrai).

Quand le sinus est négatif, c'est que le soleil n'est pas encore levé (la durée des journées varie dans l'année). Il fout donc écrêter cette variable

$$\text{Sin}(\gamma) = \sin(\varphi) \sin(\omega) + \cos(\alpha) \cos(\omega) \cos(\delta) \dots\dots\dots 10$$

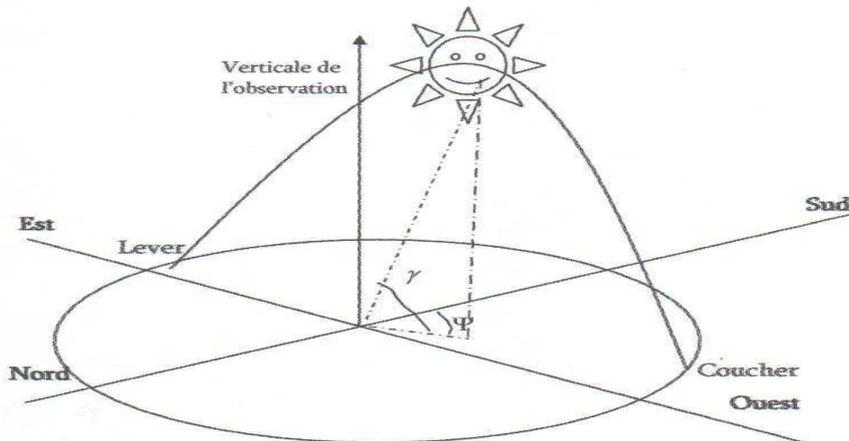


Fig.III.3 : Coordonnées angulaires de soleil [32].

Afin d'obtenir l'angle d'incidence des rayons sur le capteur, une représentation schématique (figure1-11) nous permet de visualiser clairement les différents angle pris en compte dans l'étude du rayonnement arrivant dans le plan d'un capteur. L'angle (γ , hauteur dans l'étude) et (ψ , azimut) que nous venons de définir dans le positionnement horaire et spatial de soleil, son lié directement relatif du soleil par rapport à l'emplacement géographique du capteur

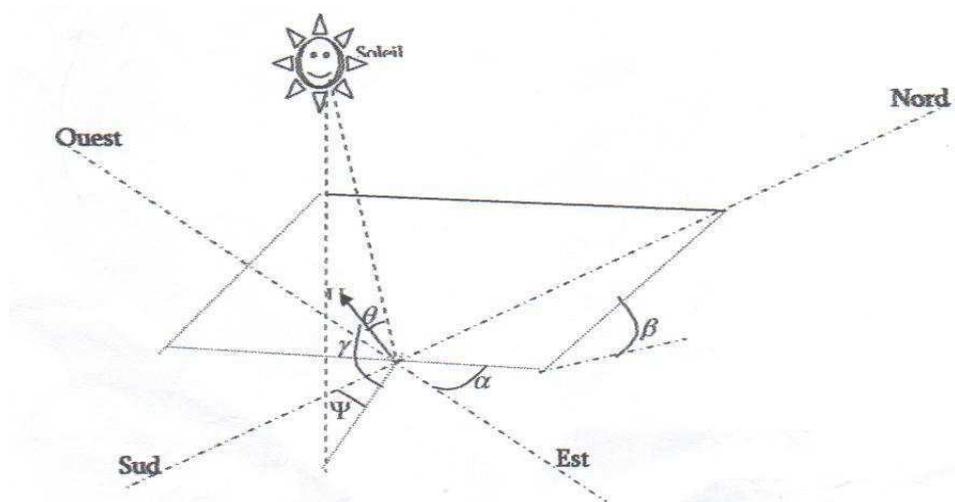


Fig.III.4 : Représentation de l'éclairement d'un capteur plan incliné [32].

Les autres angles sont liés directement au positionnement du capteur, et permettent de corriger les pertes liées au trajet optique des rayons lors de la traversée de l'atmosphère, ils correspondent à :

- **L'orientation (α)** : du capteur par rapport au sud, (0° au sud, 180° au nord, $+90^\circ$ à l'ouest et -90° à l'est. Dans notre cas, cette variation est mise à zéro.

- **L'inclinaison** (β) : du capteur par rapport au sol ($0^\circ < \beta < 90^\circ$). Elle est nulle pour ce qui est du plan horizontal dans le calcul du premier angle d'incidence puis de 45° pour le second.
- **L'angle d'incidence** (θ) : des rayons solaires par rapport à la normal au capteur.

Une relation trigonométrique permet de déterminer sa valeur en fonction des autres angles :

$$\cos(\theta) = \cos(\gamma) \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\psi - \alpha) + \sin(\gamma) \cdot \cos(\beta) \dots\dots\dots 11$$

V. Modèle de rayonnement solaire :

V. 1 Rayonnement solaire sur un plan horizontal :

Au niveau du sol le rayonnement global reçu par une surface plane d'inclinaison quelconque est constitué de trois composantes principales :

- a) **Rayonnement direct** : Flux solaire sous forme de rayons parallèles provenant de disque soleil sans avoir été dispersé par l'atmosphère. Après des mesures pour des heures (i) nous avons l'équation statique pour le rayonnement direct [26].

$$S_H(i) = 1367 * C(j) * \sin\left(h(i) * \exp\left(\frac{-T_L}{0.9 * 9.41 * M(i)}\right)\right) \dots\dots\dots 12$$

Avec :

S_H : Flux direct horizontal.

$C(j)$: La correction de la distance terre soleil.

$h(i)$: Hauteur du soleil.

T_L : Facteur de trouble.

$M(i)$: Nombre d'aire masse.

- b) **Rayonnement diffus** : C'est la partie du rayonnement provenant du soleil, ayant subi multiples réflexions (dispersions), dans l'atmosphère. Pour un observateur le rayonnement diffus (D) par l'heur i est statistiquement donné par [26].

$$D_H(i) = \frac{1367}{3} * C(j) - \sin(h(i) - 2) * \exp\left[-0.5 * \log^2\left(\frac{T_c}{22 * M(i)^{-0.65}}\right)\right] \dots\dots\dots 13$$

- c) **Rayonnement réfléchi** : C'est la partie de l'éclairement solaire réfléchi par le sol, ce rayonnement dépend directement de la nature du sol (nuage, sable...). Il se caractérise par un coefficient propre de la nature de lien appelé Albédo (ξ)

$$0 \leq \xi \leq 1$$

- d) **Rayonnement global** (ϕ_G) : un plan reçoit de la part du sol un rayonnement global qui est le résultat de la superposition des trois compositions direct, diffus et réfléchi :

$$\phi_G = S + D + R \dots\dots\dots 14$$

V. 2 Rayonnement solaire sur un plan incliné :

Une surface inclinée rapport à l'horizontale avec l'angle B reçoit une puissance Énergétique répartie entre le direct ; le diffus, et le réfléchi [26].

a) Rayonnement direct :

Soit un lieu de latitude φ , le flux est défini par :

$$R_b = \frac{S_R}{S_H} = \frac{\cos(\varphi-\beta)*\cos(\delta)*\cos(\omega)+\sin(\varphi-\beta)*\sin(\delta)}{\cos \varphi * \cos \delta * \cos \omega + \sin \varphi * \sin \delta} \dots\dots\dots 15$$

R_b : Rapport de flux direct

S_B : Flux direct pour un plan d'inclinaison

S_H : Flux direct horizontale ω :

Déclinaison du soleil. δ : Angle

horaire du soleil.

Alors le flux direct pour le plan incliné B

$$S_B = R_b.S_H$$

$$R_b = \frac{\cos(\varphi-\beta)*\cos(\delta)*\cos(\omega)+\sin(\varphi-\beta)*\sin(\delta)}{\cos(\varphi)*\cos(\delta)*\cos(\omega)+\sin(\varphi)*\sin(\delta)} \dots\dots\dots 16$$

b) Rayonnement diffus : Le flux à une inclinaison B et l'attitude φ capté par une surface orientée face au Sud-Est donné par le modèle suivant :

Pour l'heure i : utilisons le modèle « WILLMOTT »

$$D_b = D_H \left[F(i) * \frac{1 + \cos \beta}{2} + (1 - F(i)) * \frac{\cos \theta(i)}{\sin h(i)} \right] \dots\dots\dots 17$$

Avec

$$F(i) = 1 - K_T(i) * \left[1 - \frac{S_H}{G_H} \right] \dots\dots\dots 18$$

$$K_T(i) = \frac{[\theta_{GH}(i)]}{\theta(i)} \dots\dots\dots 19$$

$K_T(i)$: Coefficient de sérénité

$\theta(i)$ Angle d'incidence du rayon direct par rapport au incliné.

c) Rayonnement réfléchi : la fraction du flux réfléchi par le sol sur la surface inclinée est proportionnelle au flux global horizontal.

$$R_B = \varphi_{GH} * \left[\varepsilon \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \right] \dots\dots\dots 20$$

Avec

φ_{GH} : Flux global horizontal.

ξ : Albédo du sol

d) **Rayonnement global incliné** ; il est la superposition des flux direct, réfléchi et refus dont il est la somme des trois composantes :

$$\phi_{GB} = S B + D\beta + RB$$

On peut calculer le flux solaire global par la relation suivante pour un plan incliné D'angle B

$$\phi_{GB} = R \cdot \phi_{GH}$$

R : Rapport du flux global.

D'où

$$R = \frac{\phi_{GB}}{\phi_{GH}} = \left(1 - \frac{D_H}{\phi_{GH}}\right) * R_b + \frac{D_H}{\phi_{GH}} * \left(\frac{1 + \cos \beta}{2}\right) + \xi * \left(\frac{1 - \cos \beta}{2}\right) \dots \dots \dots 21$$

Avec :

R_b : Rapport du flux direct

En connaissant le flux global et les composantes du flux pour un plan horizontal on peut déterminer le flux global incliné reçu par un plan :

$$\phi_G = R \cdot \phi_{GH}$$

VI. 1. Modélisation du champ photovoltaïque :

Nous avons utilisé le modèle électrique de littérature de Kaiser et Reiser [25]. La figure suivante (figure II-3) représente le modèle électrique d'une cellule solaire qui consiste en une source de courant idéale, branchée avec une ou deux diodes en parallèle et une résistance série R_s . La première diode D1 décrit les propriétés de semi-conducteur de la cellule et la seconde D2 modélise le phénomène de recombinaison des porteurs de charge.

Le modèle à une diode (empirique) est actuellement le plus utilisé en raison de sa simplicité. Il permet d'exprimer l'intensité d'un module PV en fonction de la tension à ses bornes et des conditions climatiques (ensoleillement et température ambiante) [27].

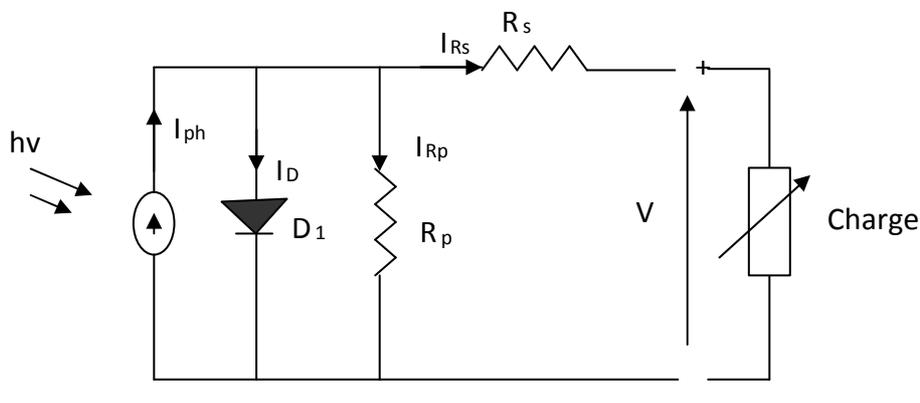


Fig.III.5: Schéma électrique équivalent d'une cellule PV.

L'intensité I en fonction de la tension V aux bornes d'une cellule est [24]:

$$I = I_{ph} - I_0[\exp(C_1(V + R_s I) - 1)] - \frac{V + R_s I}{R_p} \dots \dots \dots \mathbf{22}$$

Avec :

$$C_1 = \frac{q}{A * K * T} \dots \dots \dots \mathbf{23}$$

A : le facteur d'idéalité de la jonction (1 < A < 3).

I_{ph} : photo courant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident).

I₀ : courant de diode, représente le courant de fuite interne à une cellule causée par la jonction p - n de la cellule.

R_{sh} : résistances shunt représente les fuites autour de la jonction p-n dues aux impuretés et sur les coins de cellule.

R_s : résistance série symbolise la résistance de masse du matériau semi-conducteur, ainsi les résistances ohmiques et de contact au niveau des connexions des cellules.

q : la charge de l'électron (1,6.10⁻¹⁹ C)

K : constant de Boltzmann (1,38.10⁻²³J/K).

T_c : température de jonction (K).

Un bilan électrique sur le schéma (II-1) permet de calculer l'intensité I en fonction de la tension V aux bornes d'un module PV [1] :

$$I_{module} = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q}{NAKT_j} (V + R_{se} I) - 1 \right) \right] - \frac{V + R_{se} I}{R_{pe}} \dots \dots \dots \mathbf{24}$$

$$R_{se} = N.R_s \text{ et } R_{pe} = N.R_p$$

Le calcul de la géométrie optimale du champ photovoltaïque consiste à modifier es configurations des associations série des modules PV de façon à faire fonctionner la charge dans la zone de puissance maximale. Un calcul de la géométrie optimale du champ photovoltaïque doit effectuer à chaque changement du point de fonctionnement dû aux variations des conditions météorologiques. Pour atteindre les valeurs nominales requises pour un fonctionnement optimal, il faut brancher les modules PV selon la relative à un groupement mixte formé de la mise en série de N modules et M en parallèle [28] figure (II-4). On obtient dans ce cas :

$$I_g = M.I_{module} \text{ et } V_g = N.V_{module}$$

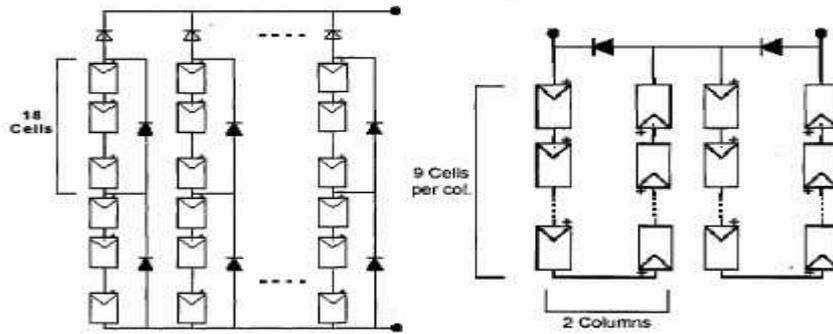


Fig.III.6: Configurations des associations série parallèle des modules PV [28].

En pratique la résistance shunt (parallèle) est très grande, à partir de ça le terme

$$\frac{V + R_s}{R_{sh}} \rightarrow 0$$

La relation du courant lié à une tension

$$I = M * I_{ph} - M * I_0 * [\exp(C_2 * (V * M + N * R_{se} * I) - 1)] - \frac{V + R_{se}I}{R_{pe}} \dots \dots \dots 25$$

$$C_2 = \frac{C_1}{M * N} \dots \dots \dots 26$$

Cette relation est vraie si toutes les cellules solaires constituante le générateur sont identiques.

a) Tension de circuit ouvert :

La tension de circuit ouvert est déterminée pour un courant de sortie nul (I=0) on peut déduire :

$$V_{co} = \frac{I}{M * C_2} * \log \left[\frac{I_{cc} + I_0}{I_0} \right] \dots \dots \dots 27$$

b) Courant de court-circuit :

Lorsque le générateur PV est en court-circuit, la tension de sortie devient nulle (V=0) et Le courant de court-circuit est considéré égale au photo courant I_{ph}

$$I_{ph} = I_0 * \exp(C_2 * M * R_s * I_{cc}) + \frac{I_{cc}}{M} - I_0 \dots \dots \dots 28$$

VI. 2 Modèle de la température :

a) Température de jonction :

La température du jonction T_c de la cellule est donnée par la relation suivant [29]

$$T_c = T_a + \frac{NOCT - 2}{800} E_G \dots\dots\dots 29$$

Avec NOCT : la température nominale de fonctionnement de la cellule solaire (Nominal operating cell temperature) et T_a est La température ambiante.

b) Température ambiante :

Le modèle de la température ambiante est représenté grâce aux données de température maximale et minimale de la journée. Nous supposons que la température maximale se produit toujours deux heures après midi et la température minimale quand il commence à faire jour (levé de soleil). Entre ces deux points extrêmes, une fonction a été utilisée pour

Caractériser la variation de cette température.

Le profil journalier de température ambiante est déterminé à partir des températures minimale et maximale de la journée, cette température s'exprime à une heure TL de la journée par l'équation suivante [30] :

$$T_a = \frac{T_{max} - T_{min}}{2} * \cos\left(\frac{14 - T * L}{14 - T * L_L} * \pi\right) + T_{moy} \dots\dots\dots 30$$

TL_L : l'heure du lever de soleil et T_{moy} : la température moyenne journalière

T_{max} : la température maximale journalière et T_{min} : la température minimale journalière cette relation valable avec les grandeurs moyennes mensuelles d'un site.

c) Variation du courant de saturation :

Le courant de saturation I_0 dépend de la température de jonction et peut être exprimé par la relation suivant [30].

$$I_0 = A_0 * T_c^3 * \exp\left(\frac{-Eg}{K * T_c}\right) \dots\dots\dots 31$$

Pour le silicium monocristallin $A_0 = 2.110.10^3$

d) Variation du courant court-circuit :

La variation de courant de court-circuit I_{cc} dépend de la température de jonction, de ce fait elle est représentée par la relation empirique suivante [30]

$$I_{cc} = K_1 * G * [1 + K_2 (G - G_0) + K_3 (T_c - T_0)] \dots\dots\dots 32$$

Avec :

G_0 : l'éclairement de référence (1000 w/m²)

T_0 : la température de référence (298 K)

K_1 , K_2 et K_3 sont des constantes dépendant de la nature de matériau de la cellule et déterminées expérimentalement par le constructeur.

e) Variation de la tension à circuit ouvert :

La variation de la tension de circuit ouvert dépend de la température du module et de L'éclairement, elle donnée par l'équation suivant [30] :

$$V_{CO} = V_{CO0} + \beta \cdot \Delta T + \alpha (G - G_0) \dots\dots\dots 33$$

Avec :

V_{CO0} : la tension à circuit ouvert de référence (V).

α : coefficient de variation de courant à circuit ouvert en fonction de la température (A/°C).

β : coefficient de variation de la tension de court-circuit en fonction de la température (V/°C).

ΔT : la variation de la température (°C).

VI. 3 Caractéristiques I-V d'un module

La figure (II-5) présente la courbe I-V d'un module typique de 125 Wcrête en fonction de l'irradiation solaire. La valeur de 125 Wcrête est une mesure sous une irradiation de 1 kW/m2, spectre AM 1.5 et de température de 25°C. Ces valeurs sont appelées STC (Standard Test Conditions) et elles sont utilisées par tous les fabricants pour définir leurs produits. Mais ces conditions sont rarement rencontrées dans la réalité (sauf en hiver) parce que la température d'un module au soleil est en général plus élevée que 25°C [31]. Pour tenir compte de conditions plus réalistes et habituelles, les fabricants donnent une valeur de température typique des cellules lorsque la température ambiante est de 20°C, l'irradiation de 800 W/m2 et le vent de 1m/sec. Cette valeur est appelée NOCT (Nominal Operating Celle Température [31].

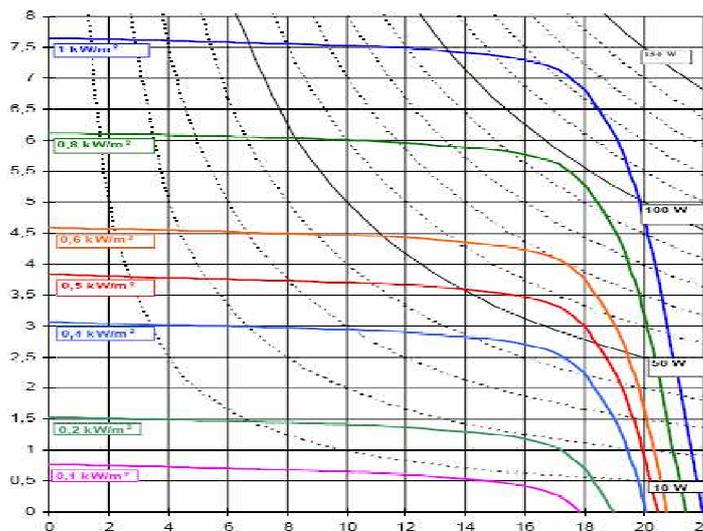


Fig.III.7 : Caractéristiques I-U d'un module Photo watt PW 6-110 pour différentes Irradiations solaires, à 25 °C [34].

Pour différents niveaux d'éclairement figure (II-5), on remarque que le courant est directement proportionnel à l'irradiation à ces niveaux d'éclairement. La tension par contre n'est pas très dégradée lorsque l'irradiation baisse ;

La figure II-6 présente le comportement du même module sous une lumière de 1 kW/m² et à des températures entre 0 et 60°C. On remarque l'importance des variations de la tension. Et le courant gagne un petit peu d'intensité lorsque la température augmente; ceci peut être expliqué par une meilleure absorption de la lumière, le gap baissant lorsque la température augmente. L'accroissement du courant peut être négligé au point de puissance maximale et le comportement global de la cellule.

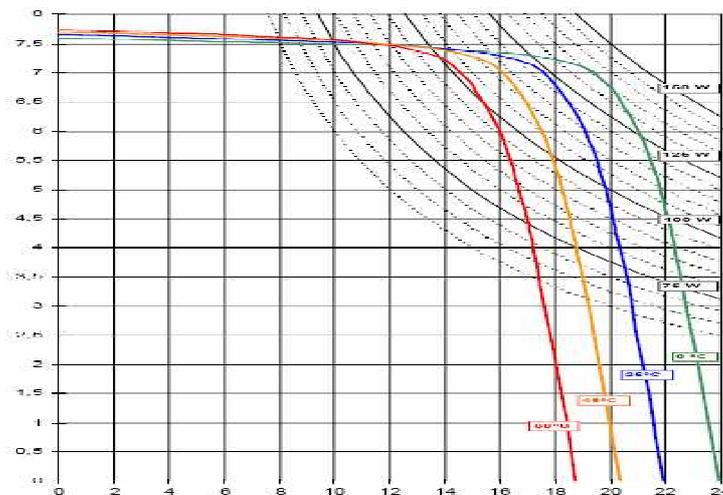


Fig.III.8 : Caractéristiques I-U d'un module Photo watt PW 6-110 pour différentes Températures [34].

a) Point de fonctionnement optimal

Un générateur délivre une puissance $P=I.V$ qui varie avec la charge à alimenter par le système. Cette puissance passe par un point maximum pour une seule valeur de la résistance chargée. Le point optimal varie avec le flux et la température au point maximum. En ce point la dérivée de la puissance est nulle :

$$\partial P = I.\partial I + V.\partial V$$

$$\partial P \implies \begin{cases} I * \partial I = 0 \\ V * \partial V = 0 \end{cases}$$

b) Rendement énergétique maximum :

Le rendement énergétique maximum d'un générateur photovoltaïque est le rapport de la puissance P_m maximale dissipée dans la charge et la puissance du rayonnement solaire incident.

$$\eta_{pv} = \frac{P_m}{\varphi_G * S}$$

Avec :

φ_G : Flux globale [W/m^2].

S : Surface de générateur [m^2].

Ce rendement dépend plusieurs facteurs :

- Réflexion à la surface
- Température de jonction des cellules.
- Type de matériau utilisé et technique de fabrication.
- La résistance série et parallèle responsables des pertes par effet Joule.
- Absorption incomplète et excès d'énergie des photons absorbés.

VII. Conclusion :

Ce chapitre a été consacré à la modélisation des panneaux PV. Nous avons d'abord caractérisé la cellule PV à partir de celui d'une jonction PN, puis nous avons décrit le modèle mathématique associé à un panneau PV, qui nous permet de tracer la caractéristique courant-tension à la sortie du module.

Conclusion générale

Le premier chapitre nous avons allé les différents types d'énergie renouvelable avons ou qu'elles constituent une alternative, aux énergies fossiles, car elles sont moins perturbatrices de l'environnement, inépuisable et n'émettent pas de gaz à effet de serre.

Le deuxième chapitre c'est articulé sur le principe de la production de l'énergie solaire notamment l'étude de la cellule PV.

Dans le chapitre 3 a été consacré à la modélisation d'un panneau PV afin d'analyser son fonctionnement et l'influence des conditions climatiques sur les caractéristiques de sortie.

Références bibliographiques

- [1] : J. BELLALA, « Contribution à l'optimisation des systèmes de conversion d'énergie : Application aux systèmes photovoltaïques », thèse de Doctorat en science, faculté des sciences de l'ingénieur, Département Génie industriel, Université de BATNA, 2008, 163p.
- [2] : A. Gama et all « Etude et réalisation d'un concentrateur cylindro-parabolique avec poursuite solaire aveugle, Revue des énergies renouvelables » Vol 11, N°3, page 437-451, septembre 2008.
- [3] : P. Roth, A. Georgiev and H. Boudinov "Design and construction of a system for suntracking, Renewable Energy », N 29, pages 393-402, June 2003.
- [4] : True Thomas B. Greenslade, Jr., « Heliostats », Jules-Célestin Jamin — « Cours de physique de l'École polytechnique. Tome 3 - Fasc. 2 » Gauthier-Villars et fils (Paris) - 1885-1906
- [5]: Statistical review of world energy 2014, British Petroleum (BP), <http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-worldenergy/electricity.html>
- [6] : Source SOeS 2014 (Service de l'observatoire et des statistiques).
- [7] : Riffonneau, Y., « Gestion des flux énergétiques dans un système photovoltaïque Avec stockage, connecte au réseau », Thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier, G2ELAB, Grenoble, France, soutenue en 2009
- [8] : Hydro power, Alternative Energy News, 2010, [réf de janvier 2013], disponible Sur : <http://www.alternative-energy-news.info/technology/hydro/>
- [9] : <http://www.futura-sciences.com/energie-renouvelable-energie-hydroelectrique>
- [10] : Mehdi Merad-Boudia, « Injection de l'électricité produite par les énergies renouvelables dans le réseau électrique », Université de Tlemcen Abou Berk Belkaid, 2010
- [11] : dd magazine le développement durable en pratique
- [12]: Luque, A. and Hegedus, S., « Handbook of Photovoltaic Science and Engineering », John Wiley & Sons.
- [13] : Agence régionale de l'environnement et des nouvelles énergies Ile-de-France.
- [14] : www.planete-energies.com
- [15] : Direction Générale de l'Energie et du Climat, L'industrie des énergies décarbonées en 2010. http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Biomasse_energie.pdf
- [16] : http://www.energies-renouvelables.org/energies_marines.asp
- [17] : José Miguel Navaro « Cellules organiques transparentes dans le visible » Thèse de Doctorat. Université de Toulouse III, 2008.
- [18] : Z. Benjellouli « Contribution à la modélisation d'une cellule solaire » mémoire de magistère université de Bechar .Algérie 2009.
- [19] : Dr. Belaid Lalouni Sofia « Cours Energie Solaire Photovoltaïque » Université de Bejaia, <http://elearning.univ-bejaia.dz/2015>
- [20] : N. Debili « Etude et optimisation en environnement Matlab/Simulink d'un système de pompe photovoltaïque » mémoire magister université Constantine I
- [21] : F. Slama ; « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique » Mémoire de magister ; université Ferhat Abbas, Sétif. 2011.

- [22] :S.Petibon «Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques» Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2008 .
- [23] : A. Labouret, M. Villoz « Energie solaire photovoltaïque » Edition Dunod, 2006.
- [24]: R.P. Mukund, « Wind and solar Power Systems »,Ph.D,P.e U.S merchant Marine Academy,Kings Point, New York, CRC Press LLC 1999.
- [25]: I. Tsuda, K.Kurokawa, K.Nozaki, «Annual simulation results of photovoltaic system with redox flow battery », solar Energy Materials and solar cells 35,pp 503 – 508,1994.
- [26] : M. Gapderou, « Atlas Solaire de L'algérié », Tomel,2, OPU 1983.
- [27] : A. Bentaïllah, « étude expérimental et de simulation des performance d'une installation PV de faible puissance », mémoire de Magister en physique énergétique, Tlemcen, 1994.
- [28]Tahar Taeticht, Analyse et commande d'un système hybride photovoltaïque éoliendécembre 2006.
- [29]: Chedid, R., Saliba, Y., 1996. «Optimization and control of autonomous renewable energy systems ». International Journal of Energy Research 20, 609–624.
- [30] :F.Benyarou, « Conception Assistée Par Ordinateur des Système PV Modélisation, dimensionnement et simulation », thèse de doctorat en physique énergétique, Tlemcen, 2004.
- [31] : Julien LABBÉ, « l'hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'electricite pour systèmes photovoltaïques isoles », thèse de doctorat de l'école des mines de paris,
- [32] : M. Dahbi « Etude et optimisation d'une installation Hybride PV-Eolienne Autonome », mémoire de magister, option physique énergétique 2007.
- [33] :M.Chegaar, A Lamir, A Chibani « Estimation global Solar rasiation Using Sunshine Hours» 4^{ème} séminaire international Physique Énergétique, Bechar 2000.
- [34] : J. LABBÉ « l'hydrogene electrolytique comme moyen de stockage d'electricite pour systèmes photovoltaïques isoles », thèse de doctorat de l'Ecole des Mines de Paris,21 décembre 2006.