

1110

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8Mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrotechnique et Automatique



Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Electrotechnique
Spécialité : Réseaux Electriques

Mémoire de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme de master académique

Etude des Performances d'un Générateur Photovoltaïque

Présenté par :

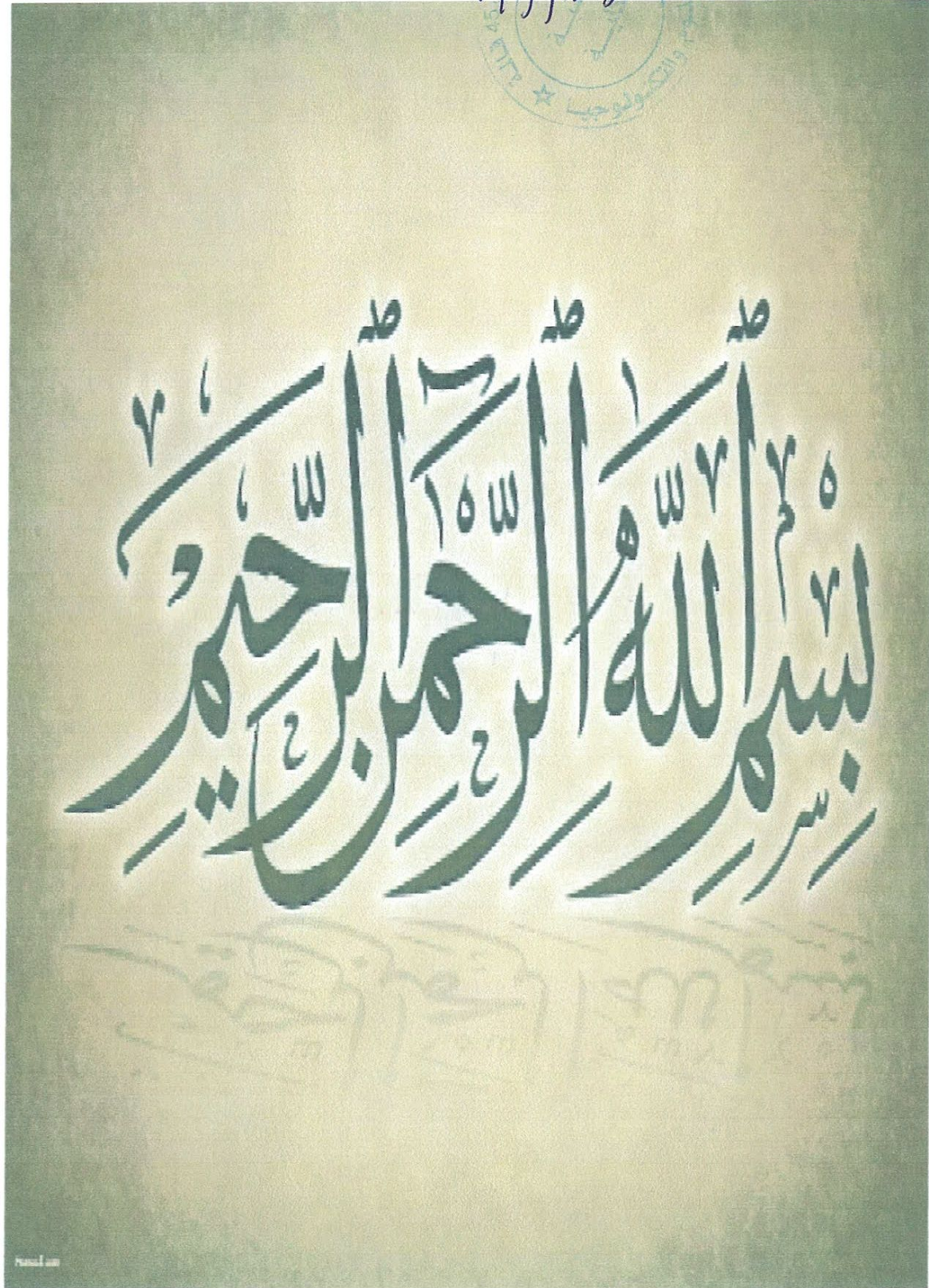
HARRIDE HADDA

Sous la direction de :

Dr : FERAGA CHAMS EDDINE

MAI 2013





Dédicace

*Je dédie les fruits de mon travail à mon cher père **AHMED**
Et ma chère mère **Hadjla** qui se sont sacrifiés pour moi et je tiens
À les remercier de m'avoir soutenu durant mes longues années d'études
Et d'avoir dépensé tout précieux pour mon succès, que le dieu tout
Puissant les protège pour moi.*

*À ma épouse : **Yassine***

*À mon fils : **Yahya***

*Et à toute la famille **Harride** et **Hammidi** et ses proches*

*À : **OUZA***

À toute la promotion 2013 Guelma

HADDA

Remerciement

*Nous remercions le bon dieu qui nous a conduits sur le bon
Chemin de la bienfaisance et de la sienne également, nous
Présentons.*

*Nos remerciements chaleureux à Nos chers parents qui ont été
Très patient avec nous et à toute personne nous a aidé à
Réaliser notre mémoire modeste directement ou
Indirectement.*

*Nous insistons à remercier notre aimable encadreur
Dr : FERAGA CHAMS EDDINE pour ses bonnes orientations
et*

Ses recommandations de valeur.

*Nous remercions tous qui nous ont aidés dans ce travail chacun
De son nom.*

HADDA

Titre : Etude des Performances d'un Générateur Photovoltaïque

Résumé :

Le travail actuel, traite l'étude des performances d'un générateur photovoltaïque. Le premier chapitre traite l'énergie solaire du point de vue installation photovoltaïque dans le monde ces dernières années, l'évolution des technologies des cellules solaires dans le monde ainsi que les installations photovoltaïques futures. Dans le deuxième chapitre on décrit les éléments essentiels d'un générateur photovoltaïque à savoir ; la cellule solaire, le module, et les panneaux. De plus, la modélisation et les caractéristiques I-V et P-V du générateur photovoltaïque, sont aussi présentés afin d'analyser son comportement en fonction des conditions externes tels que : l'éclairement et la température. L'architecture d'une installation photovoltaïque ; ainsi que le principe de protection contre les surtensions et les surintensités sont traité dans le troisième chapitre. Le quatrième chapitre traite la simulation dans l'environnement de programmation Matlab du générateur photovoltaïque. L'effet de l'ensoleillement et de la température a été considéré.

Mots clés :

- **Energies renouvelables, Energie solaire**
- **Générateur photovoltaïque**
- **Modélisation**
- **Simulation**
- **protection d'une installation photovoltaïque**

SOMMAIRE

Général Introduction générale.....01

Chapitre I : Principe et utilisation de l'énergie solaire

I.1. Introduction.....	05
I.2. Les moyens de production d'énergies.....	05
I.2.1. Les piles à combustibles (PAC).....	05
I.2.2. Les moteurs à combustibles fossiles.....	06
I.2.3. Les éoliennes.....	06
I.2.4. Les panneaux photovoltaïques.....	06
I.3. Historique du photovoltaïque.....	06
I.4. Les composantes de la lumière solaire.....	07
I.4.1. Spectre du rayonnement.....	10
I.4.2. Durée d'insolation.....	11
I.5. Evaluation de L'énergie solaire photovoltaïque en Algérie.....	12
I.5.1. LA répartition de la puissance installée par applications.....	12
I.5.2. Potentiel solaire.....	13
I.6. Les applications de l'énergie photovoltaïques.....	14

I.6.1 Les applications télécoms.....	14
I.6.2 Les applications fixes d'aide aux transports.....	15
I.6.3 Les applications de l'agriculture et de la gestion de l'eau.....	15
I.6.4 Les applications dans les pays en voie de développement.....	16
I.7. Production mondiale des cellules photovoltaïques.....	17
I.8. Les avantages et les inconvénients d'énergie photovoltaïques.....	18
I .8.1.Les avantages.....	18
I .8.2. Les inconvénients.....	19
I.9. Conclusion.....	20

Chapitre II : Générateur Photovoltaïque

II.1. Introduction.....	22
II.2. structure et Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	22
II.2.1.Modèle De La Cellules Photovoltaïques.....	23
II.2.1.1. Modèle simplifié à une diode.....	25
II.2.2. Zones de fonctionnement du module solaire.....	26
II.2.3. Paramètres De La Cellules Photovoltaïques.....	27
II.2.3.1. Courant de Court -Circuit, I_{cc}	28
II.2.3.2. Tension de Circuit Ouvert, V_{oc}	28

II.2.3.3. Facteur De Forme, F_F	28
II.2.3.4. Le Rendement De La Cellule η	29
II.3. Module photovoltaïque.....	30
II.3.1.Effet De L'éclairement.....	31
II.3.2. Effet De La Température.....	32
II.3.3. Effet de l'éclairement et de la température sur la caractéristique I-V.....	33
II.4.L'architecture photovoltaïque.....	34
II.5.Conclusion.....	36

Chapitre III : Architecture d'une installation photovoltaïque

III.1.Introduction.....	38
III.2.Différents types d'installations photovoltaïques.....	38
III.2.1 Installations onduleur centralisé.....	39
III.2.2 Installations multi-onduleurs.....	39
III.2.2.1 Multi-onduleurs à gestion individuelle.....	39
III.2.2.2 Multi-onduleurs à gestion centralisée.....	40
III.3. Séparation galvanique continu- alternatif (DC /AC).....	40
III.4. Coupure d'un générateur photovoltaïque.....	42
III.4.1. Sectionnement.....	42
III.4.2. Coupure d'urgence.....	42

III.5. Protection d'un générateur photovoltaïque.....	43
III.5.1. Protection d'un générateur photovoltaïque contre les chocs électriques.....	43
III.5.1.1 Protection contre les contacts direct	43
III.5.1.2 Protection contre les contacts indirects.....	43
III.5.2. Protection d'un générateur photovoltaïque contre les sur tensions	44
III.5.2.1 Protection contre les surtensions liées à la foudre.....	44
III.5.2.2 Mise en œuvre ou dispense des parafoudres DC	44
III.5.2.3 Conditions de mise en œuvre des parafoudres côté AC et DC....	45
III.5.3 Les surintensités d'un générateur photovoltaïque.....	45
III.5.3.1 Ombrage d'un générateur	45
III.5.3.1.1 Ombrage partiel.....	45
III.5.3.1.2 Ombrage total.....	47
III.5.3.2 Court-circuit total d'un générateur photovoltaïque.....	47
III.5.3.3 Court-circuit partiel du générateur.....	48
III.5.4. Protection d'un générateur photovoltaïque contre les surintensités.....	49
III.6. Conclusion.....	50

Chapitre IV : Simulation des performances d'un générateur Photovoltaïque

VI.1. Introduction.....	53
-------------------------	----

VI.2. Modélisation du système photovoltaïque	53
VI.3. Simulation du système Photovoltaïque.....	55
IV3.1. performances électriques aux conditions standards de fonctionnement...55	
VI.3.1.1.Caractéristique courant tension (I-V)	55
VI.3.1.2.Caractéristique de puissance (P-V)	56
IV3.2. performances électriques à éclairement et température variable	57
VI.3.2.1.Effet de l'éclairement	57
VI.3.2.2. Effet de la température	58
VI.3.3. Effet de la température et de l'éclairement.....	60
VI.4. système Photovoltaïque en association série et Parallèle	62
VI.5.Conclusion	63
Conclusion générale.....	65

Introduction générale

La consommation mondiale d'électricité observée durant ces dernières décennies est fortement liée au développement de l'industrie, du transport et des moyens de communications. De nos jours, une grande partie de la production électrique est produite à partir de ressources non renouvelables comme le charbon, le gaz naturel, le pétrole et l'uranium. Leur vitesse de régénération est extrêmement lente à l'échelle humaine. Ce qui entraînera à plus ou moins courte échéance un risque non nul d'épuisement de ces ressources. D'autant plus que la demande ne cesse de croître et tant dès à présent à être supérieure à l'offre, se traduisant par exemple par une forte fluctuation du prix mondial du pétrole.

D'autre part, ce type de consommation énergétique n'est pas neutre sur l'impact environnemental. Pour les hydrocarbures et le charbon par exemple, d'importantes émissions de gaz à effet de serre sont générées quotidiennement jouant un rôle prépondérant au niveau du dérèglement climatique et de l'augmentation de la pollution. Ce constat pousse à rechercher de plus en plus de solutions innovantes palliant le déficit énergétique et limitant l'impact négatif sur l'environnement. Ainsi, le développement des sources non polluantes à base d'énergie renouvelable est de plus en plus sollicité à la fois par les producteurs d'énergie et les pouvoirs publics.

L'énergie solaire en Algérie représente un potentiel significatif. En effet, le pays reçoit plus que 3000h de soleil par an avec un niveau d'ensoleillement élevé. La moyenne annuelle d'ensoleillement solaire quotidienne varie de 5 à 7 KWh/m² dans la mesure où des surfaces inclinées aux angles optima sont considérées. La distribution des systèmes photovoltaïque est due aux programmes nationaux qui ont été entrepris et financiers par le gouvernement.

Le premier programme qui a été lancé en 1985 s'appelle 'le grand programme du sud d'énergie solaire'. Son but était d'installer les unités photovoltaïques autonomes pour différentes applications. La réalisation de ce programme a permis ce qui suit:

- L'électrification de petits villages isolés dans le désert du Sahara.
- L'installation des systèmes photovoltaïques de pompage de l'eau.
- L'alimentation des répéteurs de télécommunication par des modules photovoltaïques dans les emplacements lointains.

Le deuxième programme qui a commencé en 1995 est 'le programme du sud d'électrification. Cela fait partie du programme national d'électrification qui a couvert la période: 1995-1998. Le but de ce programme était de fournir de l'électricité aux 216.000 maisons rurales recueillies à 4000 centres. En outre ce programme a visé à fournir de l'électricité à 300 emplacements agricoles placés près des centres considérés. En 1999, le programme national d'énergie renouvelable pour la recherche a été adopté.

L'énergie photovoltaïque fait partie significative de ce programme. Les matières principales sont:

- Technologie des cellules solaires cristallines.
- Systèmes photovoltaïques et ces composants.
- Applications photovoltaïques.

Dans ce contexte général, le travail actuel, traite l'étude des performances d'un générateur photovoltaïque.

Le premier chapitre traite l'énergie solaire du point de vue installation photovoltaïque dans le monde ces dernières années, l'évolution des technologies des cellules solaires, la production des cellules solaires dans le monde et des installations photovoltaïques futures dans le monde.

Le deuxième chapitre décrit la cellule solaire, le module, et les panneaux dont le générateur photovoltaïque se compose. Modélisation et les caractéristiques I-V et P-V du générateur photovoltaïque, sont aussi présentés afin d'analyser son comportement en fonction des conditions externes tels que : l'éclairement et la température.

Le troisième chapitre présente l'architecture d'une installation photovoltaïque ; ainsi que le principe de protection contre les surtensions et les surintensités.

Le quatrième chapitre est concerné par la simulation dans l'environnement de programmation Matlab du générateur photovoltaïque. L'effet de l'ensoleillement et de la température a été considéré.

Enfin, le manuscrit se termine avec une conclusion générale.

Chapitre I :

Principe et utilisation de l'énergie solaire

I.1. Introduction :

Les systèmes photovoltaïques sont utilisés depuis 40 ans. Les applications ont commencé avec le programme spatial pour la transmission radio des satellites. Elles se sont poursuivies avec les balises en mer et l'équipement de sites isolés dans tous les pays du monde, en utilisant les batteries pour stocker l'énergie électrique pendant les heures sans soleil [2]. Dans ce présent chapitre nous présentons le principe de l'énergie photovoltaïque ainsi que son utilisation dans le monde et en Algérie.

I.2. Les moyens de production d'énergies :

Il existe plusieurs technologies natives de production de l'énergie électrique raccordé au réseau de distribution. Celle-ci diffèrent cependant de par leur puissance ou encore de par le type de carburant qu'elles utilisent comme le gaz naturel, l'hydrogène, le diesel ou encore des énergies dites renouvelables comme le soleil ou le vent.

Ces technologies de production se différencient également par leur méthode de raccordement au réseau. D'une part il y a les (PDE) utilisant un alternateur synchrone ou asynchrone directement connecté au réseau, d'autre part celles utilisant un interfaçage d'électronique de puissance, comme dans le cas des piles à combustibles ou des panneaux solaires [1].

I.2.1. Les piles à combustibles (PAC) :

Les piles à combustibles (PAC) est un système de production permettant de convertir l'énergie chimique en énergie électrique. Aucune masse tournante n'est présente dans ce système.

En effet, l'énergie est produite grâce à une réaction d'électrochimie comme dans le cas d'une pile classique. Cependant une (PAC), comme son nom l'indique, nécessite l'apport d'un combustible pour fonctionner, l'hydrogène. Elle réalise donc une oxydation entre son carburant l'hydrogène, et son carburant

L'oxygène. Ce système n'émet aucun gaz à effet de serre et produit de l'eau ainsi que de l'électricité [1].

I.2.2. Les moteurs à combustibles fossiles :

Les turbines à gaz et les groupes diesel sont les moyens de production utilisant une génératrice synchrone pour transformer l'énergie mécanique en énergie électrique. Ce type de production est le plus souvent à envisagé pour des cogérations de quelques mégawatts [1].

I.2.3. Les éoliennes :

Une éolienne convertie une énergie cinétique du vent en énergie électrique. Pour ce faire l'énergie du vent est captée par les pales qui transforment l'énergie cinétique en couple mécanique que la génératrice convertie ensuite en électricité. Ce type de production est intermittent et ne permet pas de fournir une puissance constante. La puissance délivrée par une éolienne est de l'ordre de mégawatt et il est d'usage d'exploiter cette énergie en mutualisant les puissances fournies par plusieurs éoliennes voisines , on parle alors de « ferme » éoliennes ou de « parc » éolien .Un parc éolien peut fournir une puissance de quelque mégawatts [1].

I.2.4. Les panneaux photovoltaïques :

Les photons présents dans le rayonnement transportent l'énergie de celui-ci. Le principe d'une cellule photovoltaïque est donc de convertir cette énergie à travers un matériau semi-conducteur en énergie électrique. Ainsi les propriétés diélectriques du semi-conducteur, généralement du silicium font que l'énergie solaire est captée entraînant la mise en mouvement d'électrons dans le matériau la quantité de puissance produite par des panneaux solaires dépend de variation de l'éclairement cette production est donc intermittente et ne permet pas de fournir une puissance constante sans utiliser d'organe de stockage [1].

I.3. Historique du photovoltaïque :

Les différentes dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque sont :

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

- **1875:** Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.
- **1954:** trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.
- **1958:** une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.
- **1973:** la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.
- **1983:** la première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 km en Australie.

La première cellule photovoltaïque (ou photopile) a été développée aux Etats-Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell, qui ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés". C'est une technique appelée le "dopage" qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs[2].

I.4. Les composantes de la lumière solaire :

Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. Il a un diamètre de 1390000km, soit environ 50 fois celui de la terre. Il est composé à 80% d'hydrogène, 19 % d'hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus depuis que Langevin et Perrin, s'appuyant sur la théorie de la relativité d'Einstein, ont émis l'idée il y a une soixantaine d'années que c'est l'énergie de fusion nucléaire qui fournit au soleil sa puissance, il est aujourd'hui admis que le soleil est une bombe thermonucléaire hydrogène-hélium transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions tonnes d'hélium, la réaction se faisant dans son noyau à la température d'environ 25 millions de degrés Celsius. Ainsi, à chaque seconde, le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement [3].

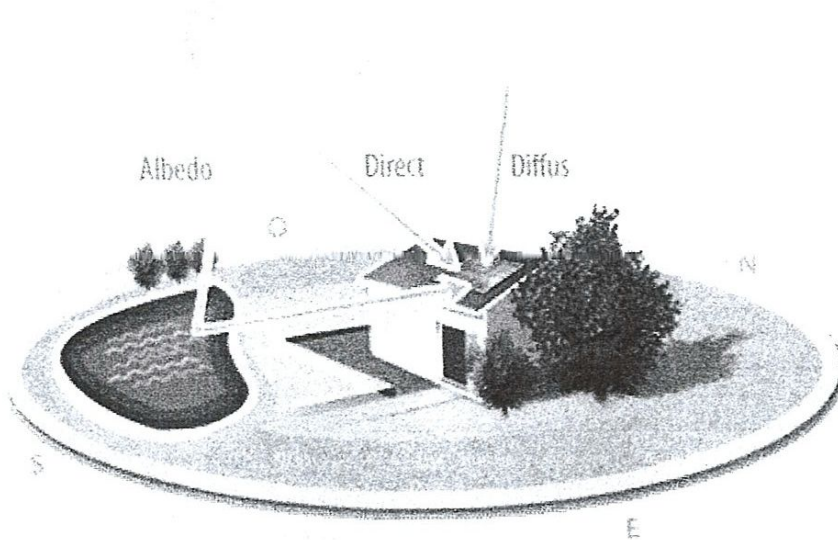
Sa lumière, à une vitesse de 300000 km/s, met environ 8 minutes pour parvenir à la terre, sa distribution spectrale de l'atmosphère présente un maximum pour une longueur d'onde d'environ $0.5\mu\text{m}$, la température de corps noir à la surface du soleil est d'environ 5780°k [4] :

- Diamètre de soleil : $D_s = 1\,391\,000\text{ Km}$.
- Diamètre de la terre : $D_t = 1\,274\,200\text{ Km}$.

La partie du rayonnement solaire exploitée par les systèmes photovoltaïques se limite à la **lumière**, mais elle peut elle-même être décomposée en trois éléments dont la proportion est variable suivant le lieu et le moment [5] :

- **Le rayonnement direct**, le plus puissant, qui provient directement du soleil sans subir d'obstacle sur sa trajectoire (nuage, immeubles...). C'est lui qui nous aveugle lorsque l'on cherche à regarder le soleil "droit dans les yeux" par temps découvert.
- **Le rayonnement diffus** provient des multiples diffractions et réflexions du rayonnement solaire direct par les nuages. C'est à lui que nous devons la "lumière du jour" qui nous permet d'y voir clair même quand le temps est couvert.
- **Le rayonnement dû à l'albédo**, résulte de la réflexion du rayonnement solaire direct par le sol, qui est d'autant plus important que la surface est claire et réfléchissante (neige, étendue d'eau, ...). C'est lui qui peut nous faire attraper des coups de soleil à la montagne ou à la mer sans qu'on le sente venir.

Bien que son intensité soit moins forte, le rayonnement diffus représente généralement une part significative du rayonnement total, parfois même majoritaire, 60% par exemple en Allemagne ou à Lille contre 40% dans le Sud de la France. Il est également important dans les zones intertropicales [5].



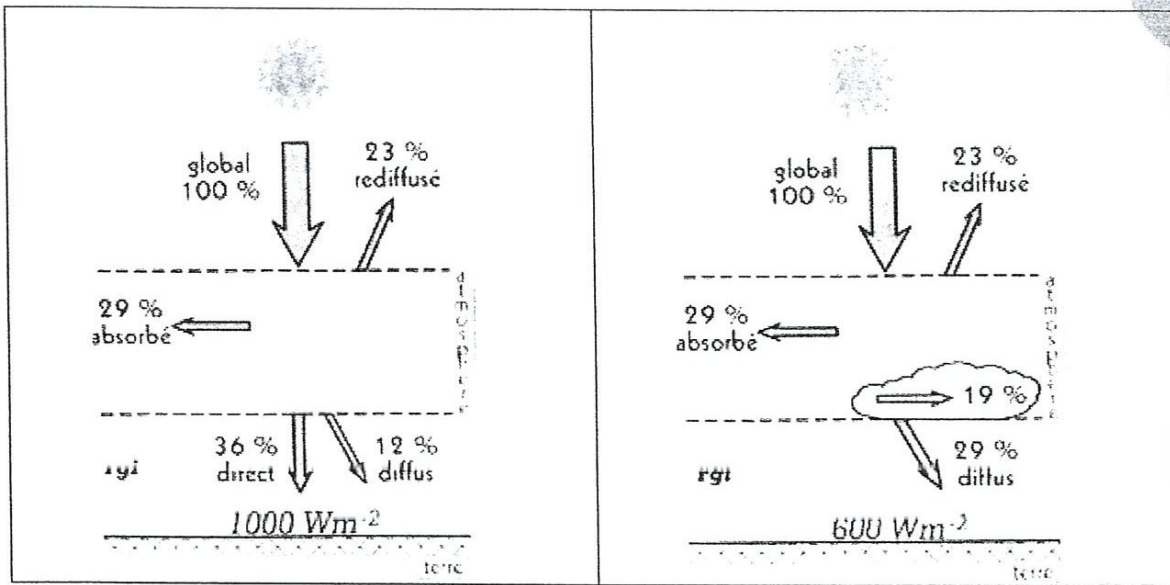
Figure(I.1) : Les 3 différents types de rayonnement solaire

Le rayonnement solaire traverse l'atmosphère, qui :

- absorbe une partie (29%).
- rediffuse vers l'espace une partie (23%).

Le rayonnement solaire diffus et direct est appelé rayonnement global incident arrivant au sol.

<p>Par temps clair, le rayonnement global incident représente 48% du rayonnement global (de l'ordre de 1000W.m^{-2})</p>	<p>Par ciel très nuageux, il n'y a pas de rayonnement direct, 19% du rayonnement est absorbé par les nuages et 29% du rayonnement atteint le sol sous forme diffuse (de l'ordre de 600W.m^{-2}).</p>
--	--



I.4.1. Spectre du rayonnement :

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

Le spectre du rayonnement extraterrestre correspond environ à l'émission d'un corps noir porté à 5800° K . Une courbe standard, compilée selon les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom de AM0.

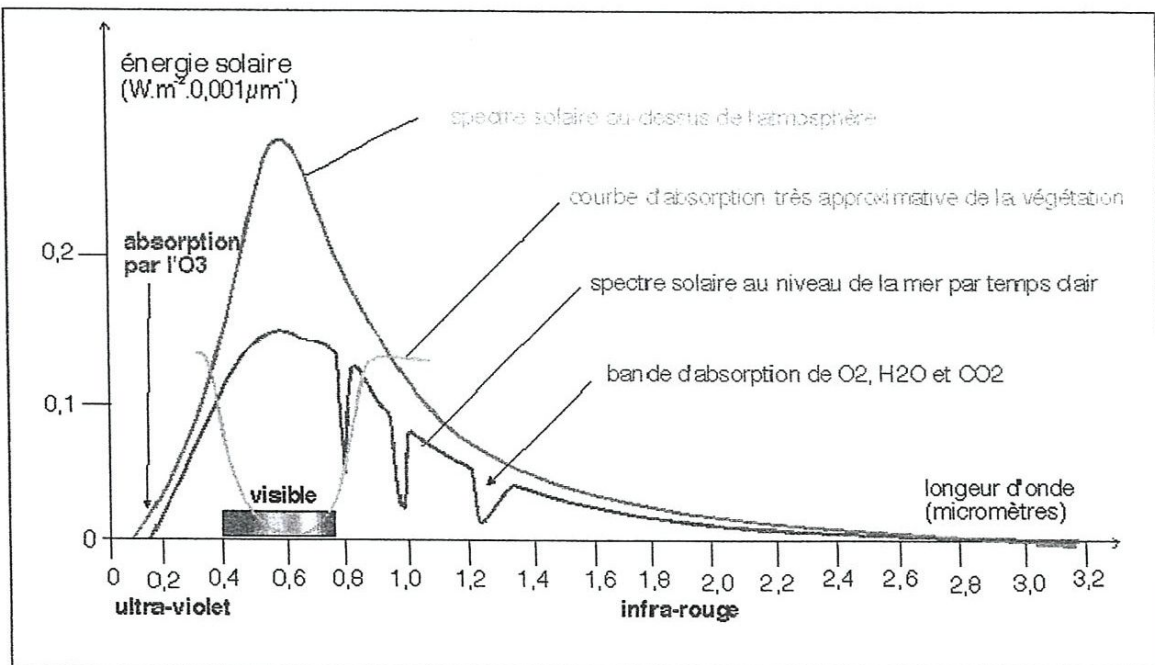


Figure (I.2) : spectre solaire hors atmosphère [6].

Les longueurs d'ondes du rayonnement solaire terrestre sont comprises entre 0,2 μm (ultra-violet) et 4 μm (infrarouge) avec un maximum d'énergie pour 0,5 μm . 97,5% de l'énergie solaire est comprise entre 0,2 μm et 2,5 μm . De 0,4 μm à 0,78 μm , le spectre correspond au domaine du visible. Les capteurs d'énergie solaire doivent donc être compatibles avec ces longueurs d'ondes pour pouvoir piéger les photons et les restituer sous forme de chaleur ou d'électrons.

Le tableau I.1 donne les valeurs énergétiques caractéristiques des photons pour diverses longueurs d'ondes, ainsi que les zones correspondantes au spectre lumineux [7].

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

Tableau(I.1) : Valeurs énergétiques des photons issus du spectre solaire.

Pour que le rayonnement solaire produise un courant électrique dans un matériau donné, faisant alors office de capteur, il faut que les photons soient tout d'abord absorbés par un ou plusieurs matériaux sensibles à la longueur d'onde des photons. Puis, l'énergie des photons excite des électrons, qui sont ensuite collectés afin de constituer un courant électrique global[7].

I.4.2. Durée d'insolation :

La durée d'insolation correspond au nombre d'heures dans la journée, entre le lever et le coucher du soleil, où celui-ci est bien visible. Le relevé est fait au moyen de l'héliographe de Campbell– Stokes dans lequel une sphère de cristal concentre les rayons du soleil sur un papier qu'il brûle en se déplaçant. Ainsi, seuls les moments où le soleil est bien visible sont enregistrées ; on parle alors de durée d'insolation réelle ou effective et dépend du fait que le soleil levé soit visible du point d'observation ou caché par les nuages. Au défaut de l'héliographe, il est possible à partir du calcul du

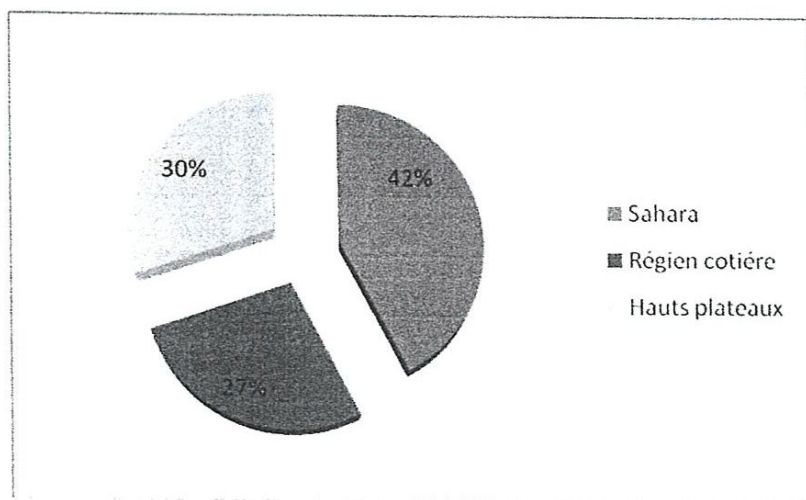
mouvement astronomique relatif du soleil et de la terre d'évaluer la durée théorique du jour ; c'est-à-dire, celle qu'il y aurait si les nuages ne cachaient pas le soleil.

I.5. Evaluation de L'énergie solaire photovoltaïque en Algérie :

Le potentiel de L'énergie solaire photovoltaïque en Algérie est le plus important d'Afrique du Nord. Le marche des énergies solaire photovoltaïque est prometteur et leur promotion constitue l'un des axes de la politique énergétique et environnementale du pays. Parmi les objectifs affichés par les pouvoirs publics, le marche local doit atteindre 500 MW cette année 2010, amenant la part de l'électricité produite par les énergies solaires photovoltaïques a 5% de l'électricité totale produite [8].

I.5.1. LA répartition de la puissance installée par applications :

Application	Puissance installée (KW)	Pourcentage
Electrification	1353	58%
Télécommunication	498	21%
Pompage	288	12%
Eclairage public	48	02%
Autres	166	07%

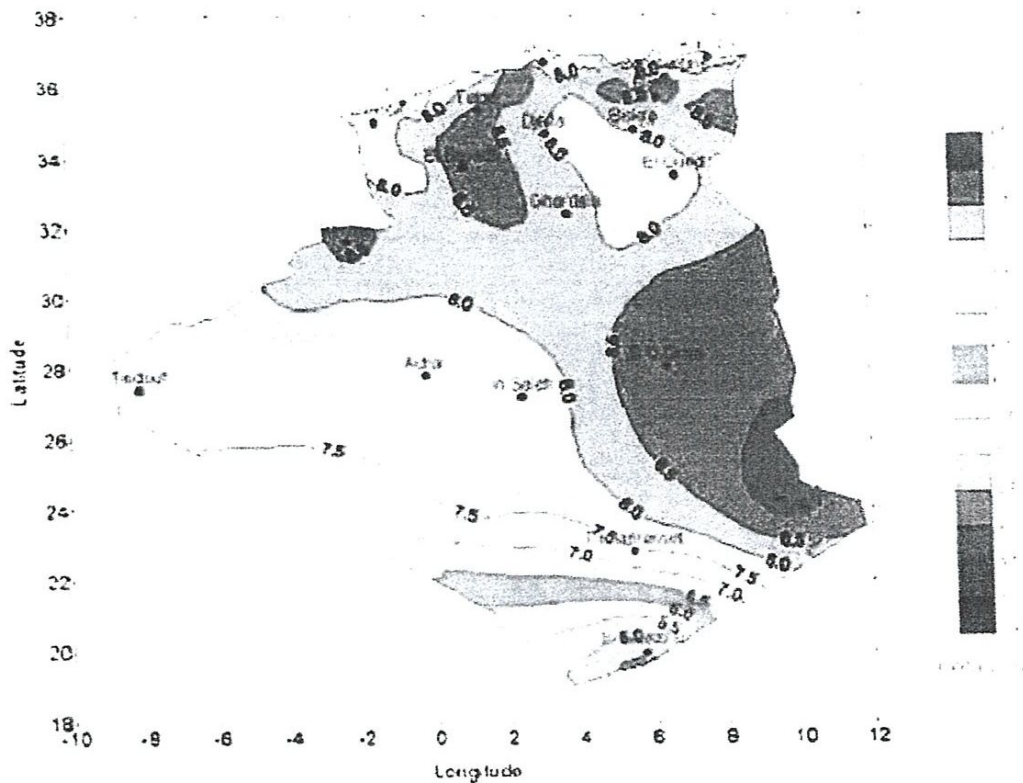


Figure(I.3). Répartition des usages de la filière ER en Algérie

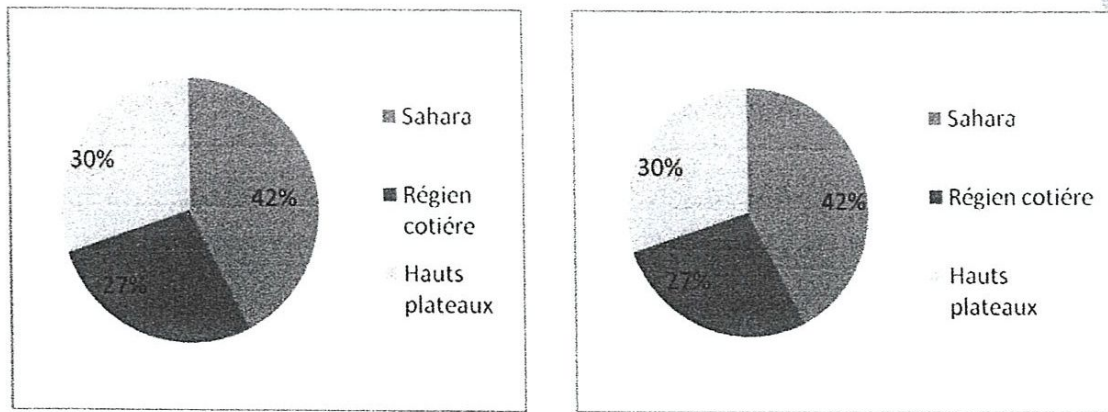
1.5.2. Potentiel solaire :

Part sa situation privilégiée, l'Algérie dispose du plus grand gisement solaire du bassin méditerranéen. La durée moyenne d'ensoleillement du territoire algérien dépasse les 2000 heures annuelles, pour atteindre près de 3500heures d'ensoleillement dans le désert du Sahara. Le total d'énergie reçue est estimé à 169 400 TWh/an, soit 5000 fois la consommation d'électricité annuelle du pays [8].

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Durée moyenne d'ensoleillement (heurs/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m ² /an)	1700	1900	2650



Figure(L4) : Carte de l'irradiation solaire en Algérie (mois de juillet)



Figure(I.4. a). Durée moyenne d'ensoleillement Figure (I.4.b). Energie moyenne reçue

En Algérie

En Algérie

I.6. Les applications de l'énergie photovoltaïques :

L'utilisation de l'énergie photovoltaïque ne se résume pas à alimenter des maisons en site isolé ou à produire pour les particuliers de l'électricité vendue sur le réseau à des tarifs intéressants. Historiquement, des applications de solarisation autonome ont été développées pour le domaine professionnel, télécoms, météorologie, sécurité maritime, agriculture, gestion de l'eau. Dans les pays chauds, où on ne manque pas de soleil et où le réseau est absent pour des raisons financières, le photovoltaïque devient essentiel. Avec ce petit article, nous espérons vous donner des idées pour, qu'après avoir équipé votre logement en photovoltaïque, vous prolongiez votre démarche durable à d'autres applications qui influencent votre vie.

I.6.1 Les applications télécoms

Bien avant l'essor des systèmes photovoltaïques domestiques, les professionnels avaient compris l'intérêt du solaire pour fournir de l'énergie autonome. C'est dans le domaine des télécommunications que le photovoltaïque a fait ses premiers pas au début des années 1970. C'était la suite logique du développement des panneaux solaires pour les satellites. L'intérêt dans ce secteur, c'est de trouver une solution qui permette d'éviter la maintenance, voire de la supprimer pendant quelques années.

Les relais hertziens qui transmettent des signaux téléphoniques, radiophoniques et télévisuels, sont des gros utilisateurs de photovoltaïque. Pour maximiser la portée des signaux et l'étendue de la couverture, ces relais sont souvent en hauteur, sur des crêtes ou sommet de montagnes difficiles d'accès et donc souvent, pas desservis par le réseau électrique. Au début, des engins

à combustibles (groupes électrogènes) ou des piles non rechargeables garantissaient leur fonctionnement, avec toute la maintenance que cela supposait, parfois en hélicoptère.

Ces installations sont souvent d'une puissance installée élevée avec une surface importante de panneaux, mais la place est rarement un problème. L'équation est simple : investissement important avant, frais de fonctionnement minimes après et tranquillité pour l'exploitant [9]

I.6.2 Les applications fixes d'aide aux transports

Ce sont souvent des dispositifs fixes mais isolés [9] :

- Signalisation routière et ferroviaire.
- Balisage aérien et maritime (bouée).
- Téléphonie de secours sur les autoroutes.
- Stations météorologiques.
- Télésurveillance véhicules, wagons, canalisations de transport de gaz ou de pétrole.

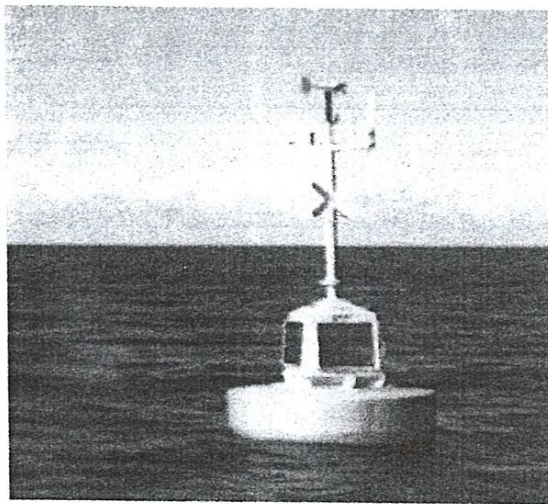


Figure (1.5) Les bouées de signalisation maritime sont aujourd'hui autonomes

I.6.3 Les applications de l'agriculture et de la gestion de l'eau

Une des plus anciennes applications du photovoltaïque dans l'agriculture, est sans conteste, la clôture électrique pour contrôler les bêtes dans les pâturages. Les autres applications sont [9]:

- L'arrosage automatique programmable.

- L'abreuvement automatique en plein champ.
- Les effaroucheurs d'oiseaux.
- Les machines à traire en zones isolées.

La gestion de l'eau est un secteur professionnel où le solaire rend bien des services :

- Pompage en profondeur.
- Traitement d'eaux usées (petites stations d'épuration).

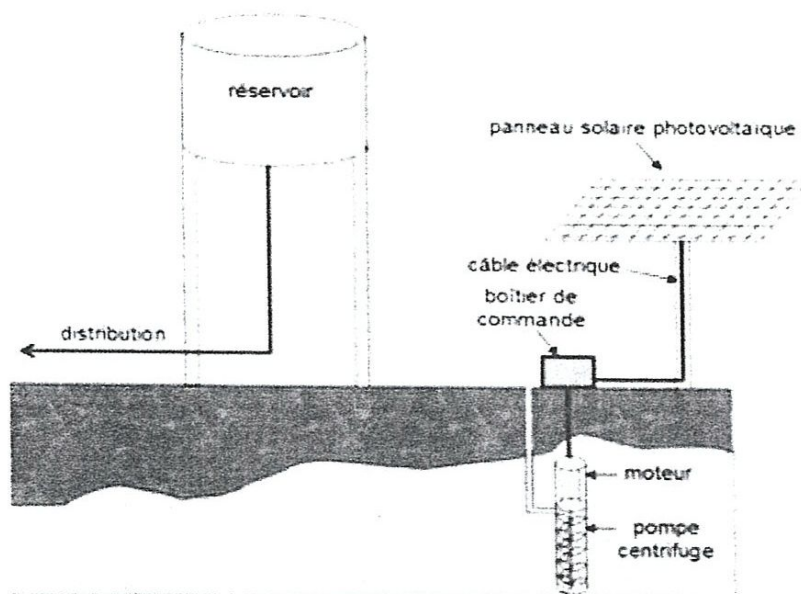


Figure (1.6) système de pompage photovoltaïque.

I.6.4 Les applications dans les pays en voie de développement

Plus de deux milliards d'êtres humains ne sont pas raccordés à un réseau électrique. Là encore, le photovoltaïque est bien adapté à sa fonction décentralisée d'apport d'énergie. Pour ces pays, chauds en général, où il n'y a pas de problème de saison d'ensoleillement, les besoins prioritaires sont [9]:

- La production de lumière.
- La ventilation.
- Les besoins de réfrigération, notamment pour la conservation des médicaments dans les dispensaires.
- Le pompage et le traitement de l'eau.

- Le fonctionnement des petites machines agricoles (moulins à céréales, machines à traire).
- L'accès à l'information (radio, télévision).

Le problème majeur dans ces pays chauds, est la maintenance des batteries qui se détériorent vite (un à deux ans) et qu'il faut changer. Les utilisateurs n'ont pas toujours la formation et les moyens financiers pour entretenir et renouveler ces composants. Le photovoltaïque est partout et le sera de plus en plus, la technique évoluant et devenant de plus en plus performante.

I.7. Production mondiales des cellules photovoltaïques :

La plupart des cellules solaires disponibles sur le marché mondial, sont à base de silicium, soit du type mono ou poly cristallin. D'autres types de cellules solaires, qui peuvent être moins chères, ont été récemment développés ou en cours de développement. Il y a eu des avancées significatives du développement des techniques qui emploient les couches minces des matériaux de semi-conducteurs tels que le silicium amorphe. D'autres techniques efficaces employant des cellules de couche mince sont intensivement recherchées, par exemple, de Cuivre-indium-diselenide (CIS) ou de cadmium-Telluride (CdTe). La technologie de production de l'énergie solaire tirera bénéfice certainement de ces développements à l'avenir. La fabrication mondiale des cellules solaires se développe plus rapidement ces dernières années, particulièrement par des compagnies Japonaises. Par exemple, la figure (I.7) montre l'évolution des cellules solaires fabriquées dans le monde de 2001 à 2005. Les pourcentages à droite de la figure indiquent que le Japon est le premier jusqu'ici avec 47 % du total de la production de cellule solaire dans le monde. La compagnie Japonaise Kyocera a fabriqué les cellules poly cristallines dans l'année 2006 avec un rendement de 18,5% [10].

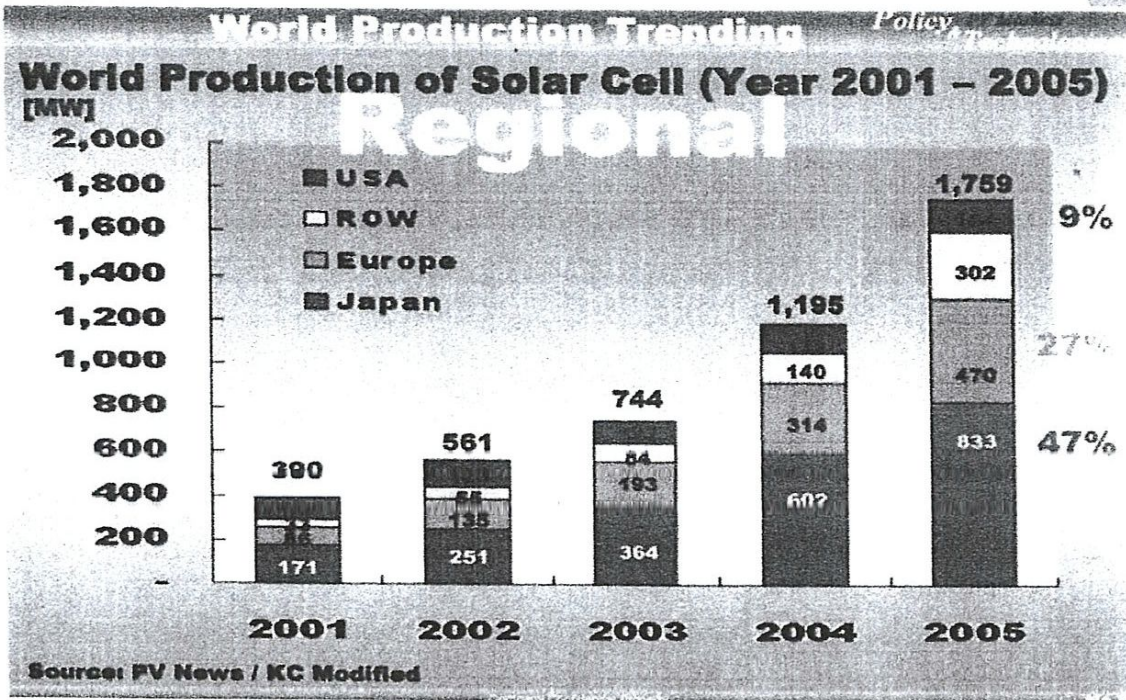


Figure (I.7): Production mondiale des cellules solaires (2001-2005) [10].

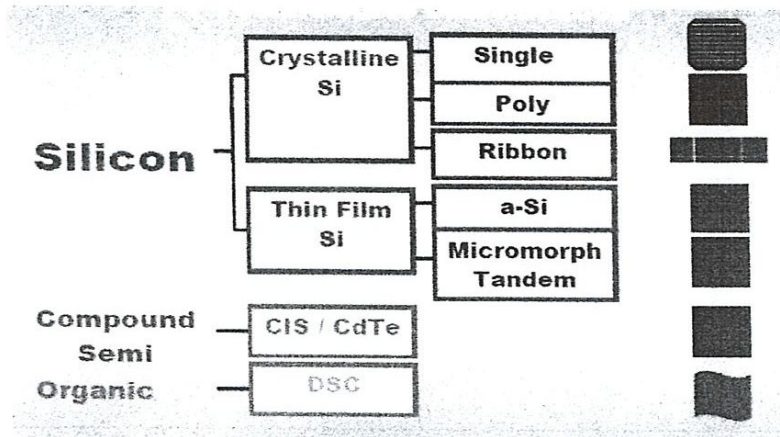


Figure (I.8): Classification des technologies photovoltaïques [10].

I.8. Les avantages et les inconvénients d'énergie photovoltaïques :

I.8.1. Les avantages :

1-Le soleil est une source d'énergie propre et renouvelable, qui ne produit ni le gaz ni le déchet toxique par son utilisation.

2- Le processus photovoltaïque est complètement à semi-conducteurs et d'un seul bloc. Il n'y a aucune pièce mobile et aucun matériau n'est consommé ou émis.

3- Les systèmes photovoltaïques ont les avantages suivants par rapport aux options de concurrence de puissance:

- Ils ne font pas de pollution, sans émissions ou odeurs discernables.
- Ils peuvent être des systèmes autonomes qui actionnent sûrement sans surveillance pendant de longues périodes.
- Ils ne consomment aucun carburant, leur carburant est abondant et libre.
- Ils peuvent être combinés avec d'autres sources d'énergie pour augmenter la fiabilité de système.
- Ils n'exigent aucun raccordement à une source d'énergie ou un approvisionnement en carburant existant.

I.8.2. Les inconvénients :

➤ Prix: les cellule solaires sont encore lointaines pour produire une fraction significative de l'énergie du monde requise en raison de la charge de placement initiale. Cependant, le prix diminue considérablement par rapport à la puissance maximale en Watt, depuis les années '70' [11].

➤ Un rayonnement du soleil: l'intensité d'irradiante du rayonnement du soleil en un jour, toujours, change et flotte. La figure (I.9) [8] est un exemple de l'irradiation du mauvais temps. L'irradiation commence autour de 6 heures et augmente à la valeur maximale (se rapproche de 900 W/m²) à 12 AM après que 11 AM, l'irradiation flotte parce que le ciel est plus tardif, nuageux et pluvieux.

Ensuite l'intensité d'éclairement diminue graduellement. Au tour 18h l'éclairement nulle. Le rayonnement du soleil est une source principale pour le système photovoltaïque, ainsi l'exécution du système photovoltaïque dépend de l'intensité d'éclairement. Le rendement de la cellule solaire est relativement bas, 15 % [10] pour le silicium monocristalline et 12 % pour le silicium poly-cristal. En conséquence, pour obtenir la grande capacité du générateur solaire, le grand secteur de la cellule solaire et les endroits sont nécessaires. De nouveaux matériels et

processus sont recherchés pour remplacer le silicium qui est le matériel principal pour la cellule en silicium mais reste toujours à prix élevé et rendement bas.

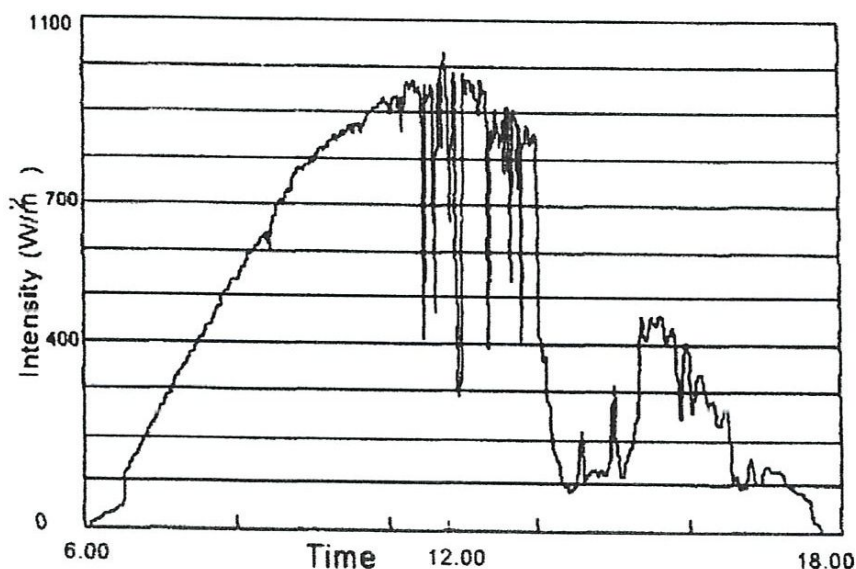


Figure (I.9) : Intensité du rayonnement du soleil dans un jour [10].

I.9. Conclusion

Depuis le début de son développement commercial dans les années 70, le photovoltaïque a vu ses coûts de production divisés par 40. Ces coûts diminuent désormais en moyenne de 5% par an. Beaucoup considèrent que d'ici une dizaine d'années, le coût du kWh photovoltaïque pourrait être compétitif avec le prix de l'électricité livrée au consommateur. Le photovoltaïque ne dépendra alors plus des programmes de soutien au marché mis en place par les gouvernements et connaîtra un développement exponentiel [12]. On peut très bien imaginer dans le futur qu'il reviendra à tout un chacun d'assumer une partie de sa consommation d'énergie en devenant auto producteur et en maîtrisant ses consommations. Le photovoltaïque, qui est aussi utilisable en matériau de construction, semble être tout à fait adapté à la révolution à venir des maisons et bâtiments à énergie positive. Le deuxième chapitre sera consacré à l'étude des caractéristiques d'un générateur photovoltaïque.

Chapitre II

Structures et caractéristique d'un générateur photovoltaïque

II.1. Introduction :

Ce chapitre est consacré aux principes généraux de la conversion photovoltaïque, les cellules solaires, et les différents organes constituant un système photovoltaïque. L'influence du rayonnement, de la température sur les performances des générateurs photovoltaïques (GPV) sont aussi envisagées.

II.2 structure et Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

Les cellules photovoltaïques sont composées de matériaux semi-conducteurs qui produisent un courant électrique sous l'effet de photons lumineux. Les cellules photovoltaïques sont raccordées entre elles pour former des modules photovoltaïques pouvant convertir en environ 15 % de l'énergie solaire reçue. Un panneau de 1 m² fournit une puissance de 100 W et produit de 80 à 150 kWh/an. Son impact sur l'environnement est minime, avec un temps de retour énergétique faible : suivant la technologie utilisée, un capteur photovoltaïque met entre 1,5 à 3 ans pour produire l'énergie nécessaire à sa fabrication, ce qui est négligeable par rapport à sa durée de vie (Estimée entre 25 et 35 ans selon les fabricants.)[13].

Une cellule photovoltaïque est constituée de plusieurs couches. Sa structure peut être illustrée par la figure II.1, qui présente le cas d'une cellule au silicium :

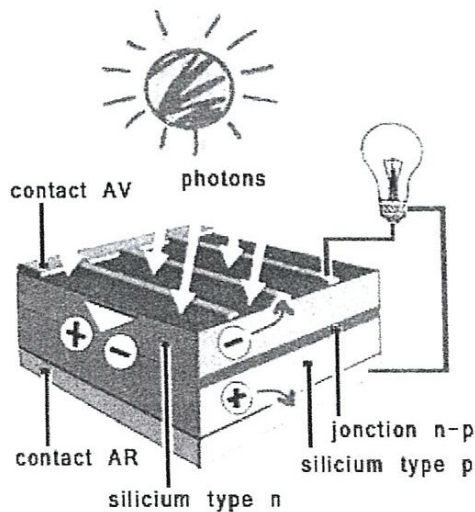


Figure (II.1): Structure d'une cellule photovoltaïque (présence d'une jonction)[13].

La couche supérieure de la cellule est composée de silicium dopé par un élément de valence supérieure dans la classification périodique, c'est à dire qui possède plus d'électrons sur sa couche de valence que le silicium. Le silicium possède 4 électrons sur sa couche de valence :

on peut donc utiliser des éléments de la colonne de l'oxygène, par exemple le Phosphore P. Cette couche possédera donc en moyenne une quantité d'électrons supérieure à une couche de silicium pur. Il s'agit d'un semi-conducteur de type N.

La couche inférieure de la cellule est composée de silicium dopé par un élément de valence inférieure au silicium. Il peut s'agir de Bore B. Cette couche possédera donc en moyenne une quantité d'électrons inférieure une couche de silicium pur. Il s'agit d'un semi-conducteur de type P.

Lorsqu'on met ces deux semi-conducteurs en contact (de manière à ce qu'il puisse y avoir conduction), on crée une jonction PN, qui doit permettre le passage des électrons entre les deux plaques. Cependant, dans le cas d'une cellule photovoltaïque, le gap du semi-conducteur de type N est calculé de manière à ce que le courant ne puisse pas s'établir seul : il faut qu'il y ait un apport d'énergie, sous forme d'un photon de lumière, pour qu'un électron de la couche N soit arraché et vienne se placer dans la couche P, créant ainsi une modification de la répartition de la charge globale dans l'édifice. Deux électrodes sont placées, l'une au niveau de la couche supérieure et l'autre au niveau de la couche inférieure : une différence de potentiel électronique et un courant électrique sont créés. En effet, le déplacement d'électrons, créé par l'énergie des photons, est synonyme de production d'électricité. Une tension se crée alors en présence de lumière aux bornes de la cellule. Si l'on ferme le circuit à l'aide de n'importe quel dipôle telle une lampe, le courant circule dans le circuit. Il est important de noter que la tension est presque constante tandis que l'intensité varie proportionnellement à la quantité de lumière reçue [13].

II.2.1. Modèle De La Cellules Photovoltaïques :

Les circuits équivalents traditionnels de la cellule solaire, représentés par une source de courant parallèlement à une ou deux diodes comme monter sur la figure (II.2.a). Le modèle simple de diode comprend quatre composants: une source de courant-photo, une diode parallèle à la source, une résistance en série R_s et une résistance de shunt R_p . Comme montré dans la figure (II.2.b). Le modèle de double diode inclut une diode additionnelle pour un meilleur ajustement de courbes. Ce modèle exige la connaissance de quatre paramètres aux conditions standards de l'éclairement et de la température. Les paramètres sont généralement donnés par le fabricant ou peuvent être obtenus à partir des essais de module sous trois conditions: courant à court-circuit (I_{cc}), tension à circuit

ouvert (V_{oc}) et la tension (V_{mpp}) et le courant (I_{mpp}) au point maximum de puissance. Des coefficients de la température sont également nécessaires dans cette technique de modélisation pour considérer l'effet de la température sur les paramètres importants de la cellule solaire.

Le modèle mathématique associé à une cellule se trouve à partir de celui d'une jonction PN. On y ajoute le courant I_{ph} proportionnel à l'éclairement, ainsi qu'un terme modélisant les phénomènes internes. Le courant I issu de la cellule s'écrit alors [14,15]:

$$I = I_{ph} - I_o \left(\exp \frac{q(V + R_s I)}{AKT} - 1 \right) - \frac{(V + R_s I)}{R_p} \quad (II.1)$$

Avec :

I_{ph} : photo-courant, ou courant généré par l'éclairement (A).

I_o : courant de saturation de la diode (A).

R_s : résistance série (ohm) .

R_p : résistance shunt (ohm).

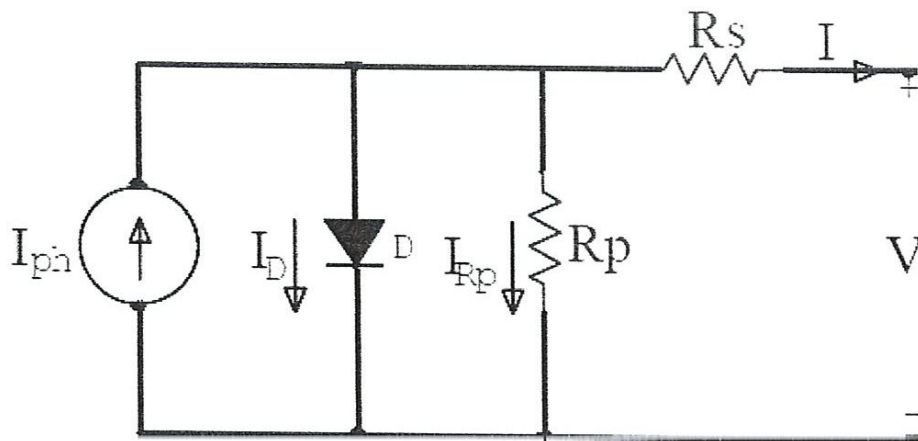
A : facteur de qualité $1 \leq A \leq 1.5$.

K : constante de Boltzmann ($K = 1,38.10^{-23}$).

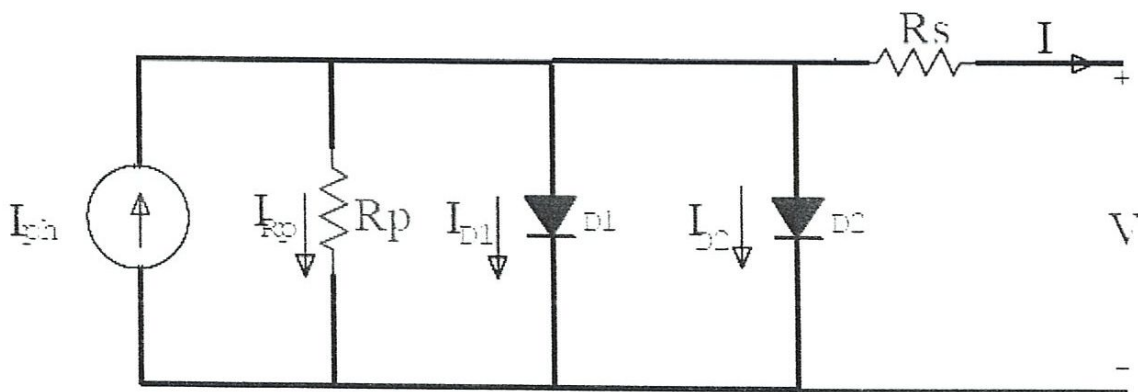
q : charge de l'électron ($q = 1,602.10^{-19}$ C).

T : température de la cellule (°K).

On peut déduire de cette expression un schéma équivalent, comme le montre la figure(II.2):



figure(II.2.a) Le modèle d'une diode



figure(II.2.b) Le modèle de double diode

II.2.1.1. Modèle simplifié à une diode :

La diode modélise le comportement de la cellule dans l'obscurité. Le générateur de courant modélise le courant I_{ph} généré par un éclairage. Enfin, les deux résistances modélisent les pertes internes :

- Résistance série R_s : modélise les pertes ohmiques du matériau.
- Résistance shunt R_{sh} : modélise les courants parasites qui traversent la cellule.

Le schéma équivalent de la figure (II.3) correspondant est celui de la cellule idéale :

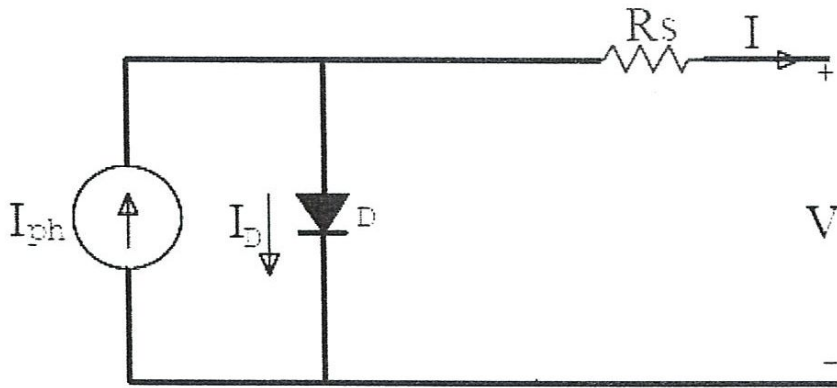


Figure (II.3) : la cellule idéale.

Idéalement, on peut négliger R_s et I devant V , puis travailler avec un modèle Simplifié:

$$I = I_{ph} - I_o \left(\exp \frac{qV}{AKT} - 1 \right) - \frac{V}{R_p} \quad (\text{II.2})$$

Comme la résistance shunt est beaucoup plus élevée que la résistance série, on peut encore négliger le courant dévié dans R_{sh} . On obtient [6],[7],[14],[15],[16] :

$$I = I_{ph} - I_o \left(\exp \frac{qV}{AKT} - 1 \right) \quad (\text{II.3})$$

II.2.2. ZONES DE FONCTIONNEMENT DU MODULE SOLAIRE

La caractéristique fondamentale du générateur photovoltaïque, pour un éclairement et une température donnée, n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement; seule la courbe I-V est fixée. C'est la valeur de la charge aux bornes du générateur qui va déterminer le point de fonctionnement du système photovoltaïque.

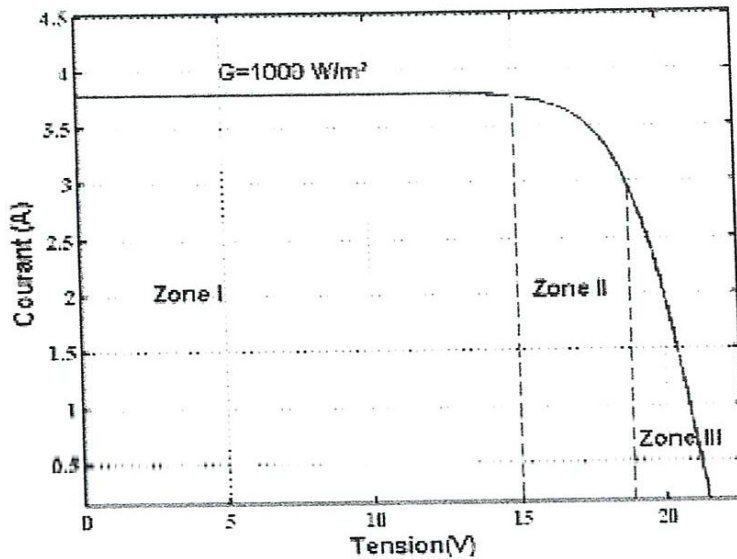


Figure (II.4): Différentes zones de la caractéristique I (V), $T = 25^\circ\text{C}$ [7].

La figure (II.4) représente trois zones essentielles:

- fonctionnement comme générateur de courant: le point de fonctionnement appartient à la zone(I)
- fonctionnement comme générateur de tension : le point de fonctionnement appartient à la zone (III). La tension est proche de la tension à vide V_{oc} et le courant est faible,
- fonctionnement optimal: quand le point de fonctionnement appartient à la zone (II), l'utilisation est meilleure; la puissance absorbée est maximisée.

II.2.3. Paramètres De La Cellules Photovoltaïques:

La cellule solaire est caractérisée par le rendement de conversion η_n , une tension à circuit ouvert V_{oc} , un courant à court-circuit I_{cc} et un facteur de forme F_F . Ces paramètres sont déterminés à partir des caractéristiques courant-tension. Leurs déterminations permettent les comparaisons de différentes cellules éclairées en conditions identiques [8].

II.2.3.1. Courant de Court -Circuit, I_{cc} :

Il est obtenu pour une tension de sortie nulle à partir de l'équation (II.2):

$$I_{cc} = I_{ph} - I_o \left(\exp \frac{qR_s I_{cc}}{AKT} - 1 \right) - \frac{R_s I_{cc}}{R_p} \quad (II.4)$$

Tenant compte de l'effet des résistances R_s et R_p ; le courant de court-circuit varie en fonction de ces deux résistances et est proportionnel au flux incident.

Dans le cas d'une cellule idéale ($R_s \rightarrow 0$ et $R_p \rightarrow \infty$)

II.2.3.2. Tension de Circuit Ouvert, V_{oc} :

Elle est obtenue pour un courant de sortie nul à partir de l'équation (II.2):

$$0 = I_{ph} - I_o \left(\exp \frac{qV_{oc}}{AKT} \right) - \frac{V_{oc}}{R_p} \quad (II.6)$$

Dans le cas d'une cellule idéale ($R_s \rightarrow 0$, $R_p \rightarrow \infty$, $I_{ph} = I_{cc}$ et $A=1$)

$$V_{oc} = \frac{AKT}{q} \log \left(1 + \frac{I_{cc}}{I_o} \right) \quad (II.7)$$

II.2.3.3. Facteur De Forme, F_F :

Le facteur de forme (FF) indique le degré d'idéalité de la caractéristique Correspondant au rapport suivant :

$$F_F = \frac{P_m}{P_{op}} = \frac{P_m}{V_{oc} \cdot I_{cc}} \quad (II.8)$$

C'est le rapport entre la puissance maximale que peut fournir une cellule et la puissance qu'il est théoriquement possible d'obtenir (puissance optimale), Il caractérise l'influence mixte des résistances série et parallèle sur la caractéristique $I = f(V)$.

Avec :

- F_F : facteur de forme qui indique le degré d'idéalité de la caractéristique ;
- P_m : puissance maximale mesurée dans les conditions de référence (STC : *Standard Test Condition*), c'est-à-dire sous l'ensoleillement de $1\,000\text{ W/m}^2$, à la température de 25°C sous un spectre AM 1,5.
- V_{co} : tension du circuit correspondant à la tension qui apparaît aux bornes de la cellule quand le courant débité est nul (V).
- I_{cc} : courant de court circuit correspondant au courant débité par la cellule quand la tension à ses bornes est nulle (en pratique, ce courant est très proche du photo courant I_{ph}) (A).

II.2.3.4. Le Rendement De La Cellule η :

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

$$\eta = \frac{P_m}{E \cdot S} \quad (\text{II.9})$$

Avec :

- η : rendement énergétique ;
- E : éclairement (W/m^2) ;
- S : surface active de la cellule (m^2) ;
- P_m : puissance maximale mesurée dans les conditions de référence (STC : *Standard Test Condition*), c'est-à-dire sous l'ensoleillement de $1\,000\text{ W/m}^2$, à la température de 25°C sous un spectre AM 1,5.

L'énergie électrique disponible aux bornes d'une cellule photovoltaïque dépend des caractéristiques du type de rayonnement : répartition spectrale (réponse spectrale), quantité d'énergie, température, surface, surface de la cellule et de ses caractéristiques dimensionnelles, forme de la cellule et conditions ambiantes de fonctionnement de la cellule (température extérieure, vitesse du vent, etc.). Le rendement d'une cellule photovoltaïque est généralement assez faible (10 à 20 %). De meilleurs rendements peuvent être obtenus à l'aide de nouveaux matériaux (arséniure de gallium donne des rendements supérieurs à 25 % en laboratoire) ou de techniques expérimentales (technologies multicouches) souvent difficiles et coûteuses à mettre en œuvre. Cependant, le matériau photovoltaïque le plus utilisé est le

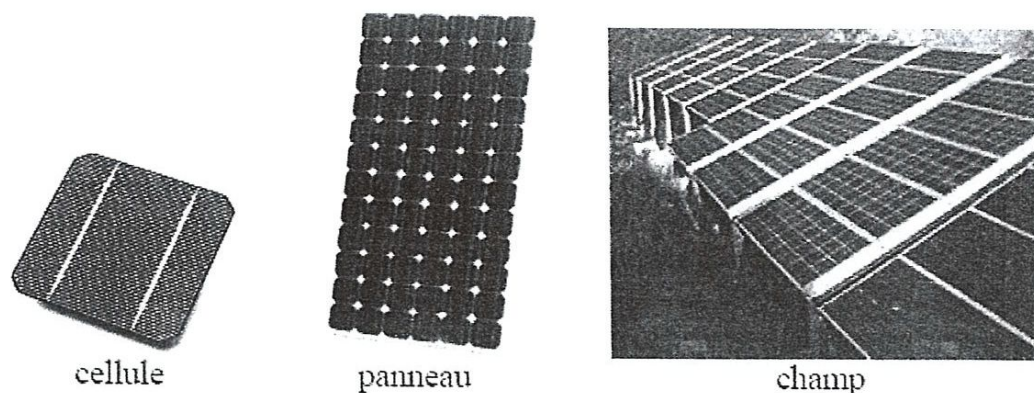
silicium qui représente une solution économique : son rendement énergétique ne dépasse pas les 15 %. Le tableau 1 indique le coefficient de performance des trois types de cellules les plus utilisées [14], [15].

Type de cellule	Cellule à base de silicium monocristallin	Cellule à base de silicium polycristallin	Cellule à base de silicium amorphe
Coefficient de performance de la cellule (%)	15 - 18	13 - 15	5 - 8

Tab. 1. Rendement énergétique des trois principales technologies.

II.3. Module photovoltaïque :

La **cellule photovoltaïque** est l'unité de base qui permet de convertir l'énergie lumineuse en énergie électrique. Un **panneau photovoltaïque** est formé d'un assemblage de cellules photovoltaïques. Parfois, les panneaux sont aussi appelés **modules photovoltaïques**. Lorsqu'on regroupe plusieurs panneaux sur un même site, on obtient un **champ photovoltaïque** (Figure (II.5)) [9].



Figure(II.5): Module photovoltaïque.

Les modules sont généralement entourés d'un cadre rigide en aluminium anodisé comprenant des trous de fixation. A l'arrière de chaque module se trouve une boîte de jonction contenant 2 diodes antiparallèles **Figure (II.6)**. Ces diodes antiparallèles permettent d'éviter qu'un module au soleil ne se décharge dans un module à l'ombre.

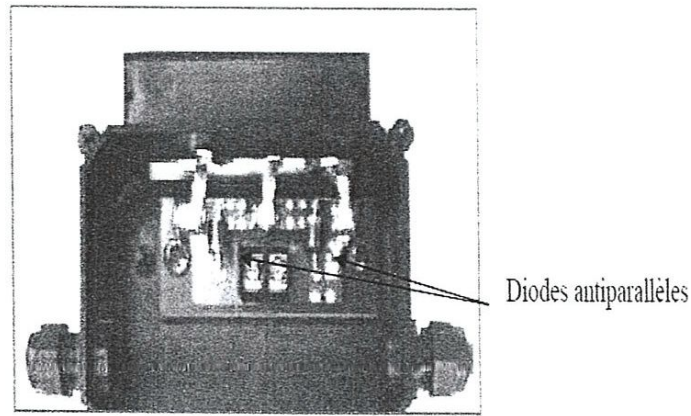


Figure (II.6): Boite de jonction.[10]

II.3.1. Effet De L'éclairement :

L'énergie électrique produite par une cellule dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface. La figure II.7.a, représente la caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement, à une température et une vitesse de circulation de l'air ambiant constantes : le courant est directement proportionnel au rayonnement, contrairement à la tension qui ne varie que très peu en fonction de l'éclairement. Toutefois, cette augmentation est assez considérable au point de puissance maximale (figure II.7.b).

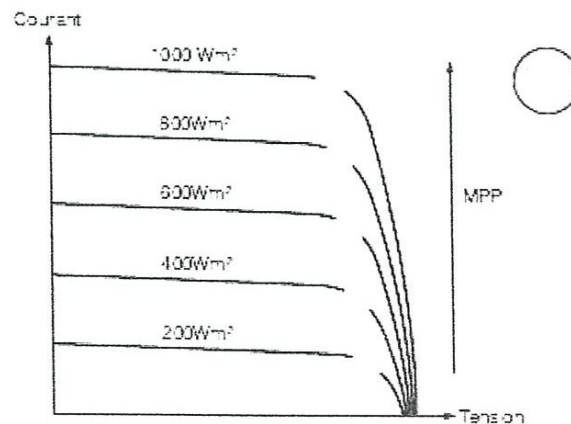


Figure (II.7.a): Caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement.

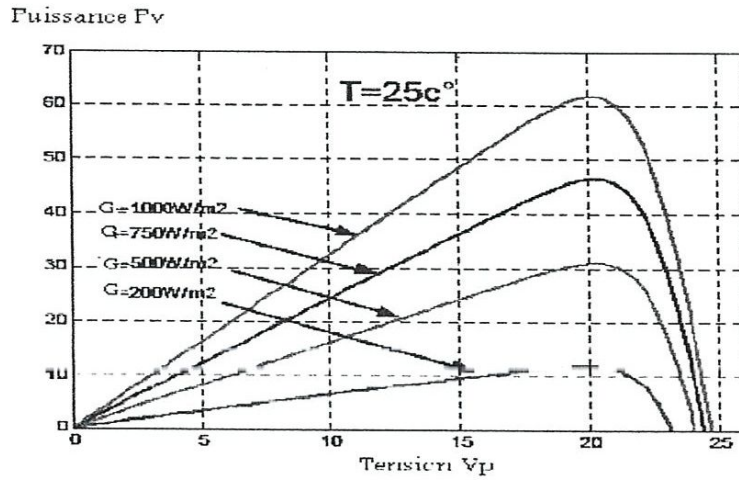


Figure (II.7.b): Caractéristique de puissance en fonction de l'éclairement[11].

II.3.2. Effet De La Température:

Le graphe de la figure II.8.a, montre que la tension d'une cellule baisse fortement avec la température. Plus la température augmente et moins la cellule est performante. En revanche, le courant augmente légèrement en intensité : cette augmentation reste néanmoins négligeable au point de puissance maximale (figure II.8.b).

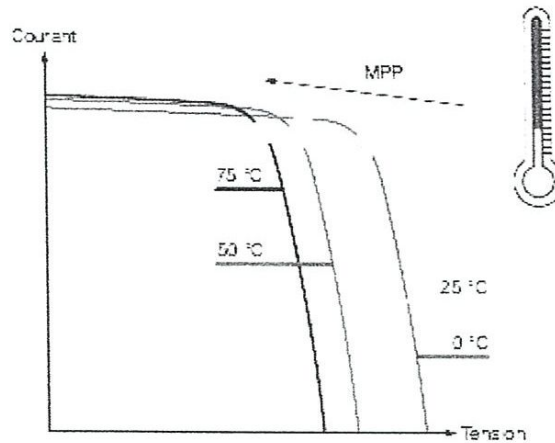


Figure (II.8.a): Caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de la température.

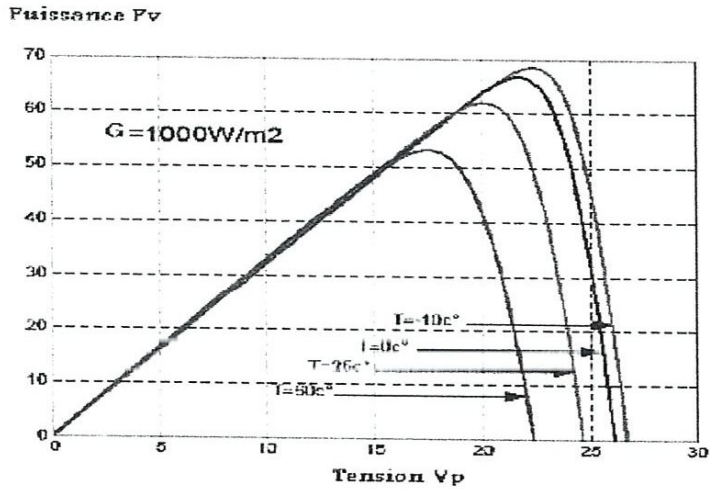


Figure (II.8.b): Caractéristique de puissance en fonction de la température[11]

II.3.3. Effet de l'éclairement et de la température sur la caractéristique I-V :

L'effet double de l'éclairement et de la température de cellules sur les caractéristiques I-V, est montré sur la figure(II.13).On peut observer que la tension de circuit ouvert diminue légèrement avec l'augmentation de la température de cellules de 25°C à 50°C , tandis que le courant augmente à mesure que l'ensoleillement augmente de 400 W/m^2 à 1000 W/m^2 .

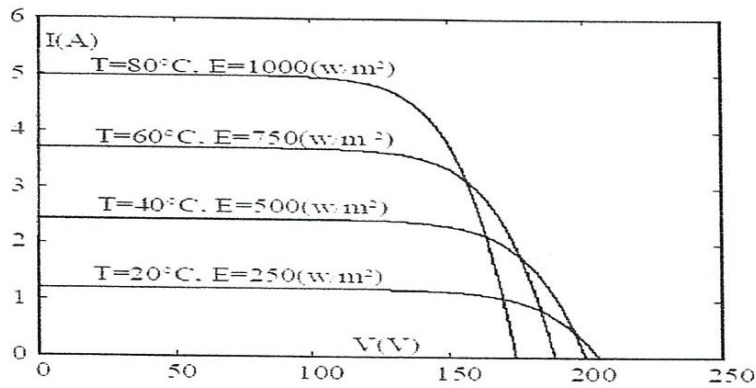


Figure (II.9): Variation des caractéristiques I-V avec l'éclairement et la température [14].

II.4.L'architecture photovoltaïque :

La mise en série de cellules va permettre d'augmenter la tension disponible d'un module, et la mise en parallèle des cellules va permettre d'augmenter le courant disponible de ce module.

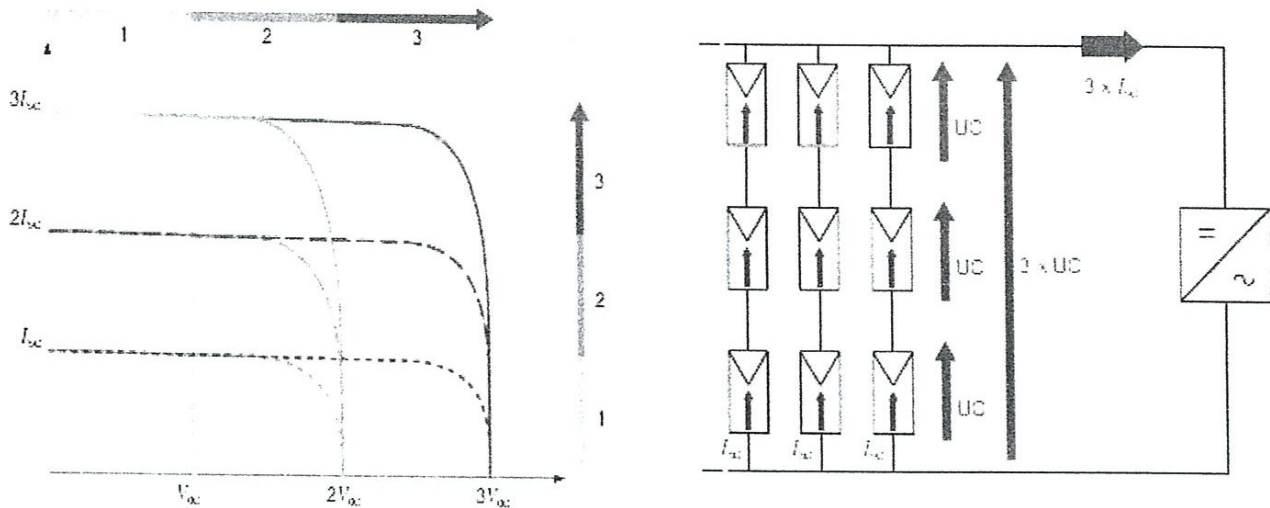


Figure (II.10): Caractéristique résultante d'un groupement de N_s cellule.

- Une association de (N_s) cellule en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenues par addition des tensions élémentaires de chaque cellule. Un tel regroupement est représenté par la figure (II.9). Cette équation résume les caractéristiques électriques d'une association série de (N_s) cellule.

En effet ; pour un groupement de N_s cellules montées en série la tension de sortie a pour expression générale :

$$V_{ocN_s} = N_s \times V_{oc}; \quad I_{cc} = I_{ccN_s} \quad (II.10)$$

V_{ocN_s} : la somme des tensions en circuit ouvert de N_s cellule en série.

I_{ccN_s} : courant de court-circuit de N_s cellule en série.

Pour ce groupement, le courant est commun à toutes les cellules.

- Une association parallèle de (N_p) cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un regroupement de cellules identiques connectées en

parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultant du regroupement est obtenue par addition des courants. L'équation (II.11) et la figure (II.9): résumant les caractéristiques électriques d'une association parallèle de (N_p) cellules.

Pour un groupement de N_s cellules montées en parallèle le courant de sortie a pour expression générale :

$$I_{ccNp} = I_{cc} \times N_p ; V_{oc} = V_{ocNp} \quad (II.11)$$

I_{ccNp} : la somme des courants en court-circuit de N_p cellule en parallèle.

V_{ocNp} : tension en circuit ouvert de N_p cellule en parallèle [8].

Pour ce groupement, la tension est commune à toutes les cellules.

La mise en série de cellules va permettre d'augmenter la tension disponible d'un module, et la mise en parallèle des cellules va permettre d'augmenter le courant disponible de ce module.

Les modules mis en série vont créer la tension utile d'une chaîne. Le couplage en parallèle de chaînes de même tension va créer des groupes permettant d'augmenter le courant, donc la puissance du générateur.

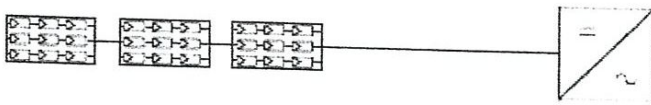


Figure (II.11): Exemple d'un générateur d'une chaîne de 3 modules.

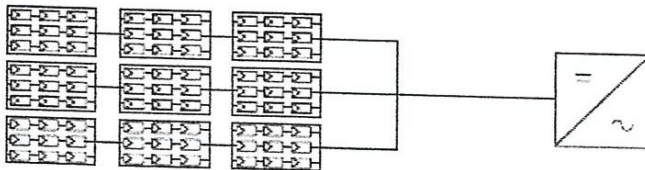


Figure (II.12): Exemple d'un générateur d'un groupe de 3 chaînes de 3 modules.

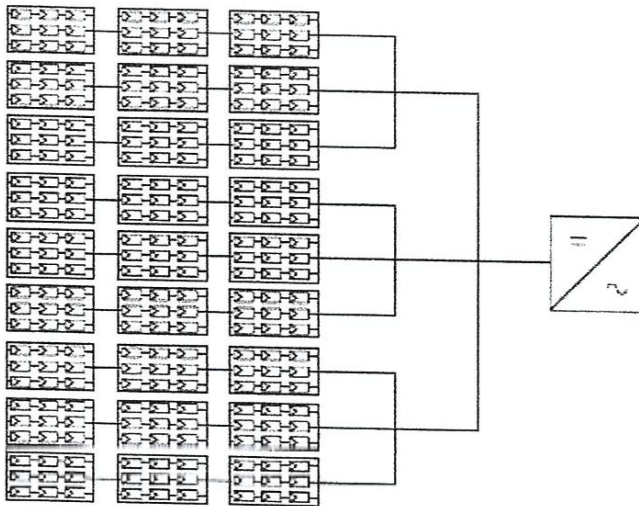


Figure (II.13): Exemple d'un générateur de 3 groupes de 3 chaînes de 3 modules.

II.6.Conclusion :

Dans ce chapitre, le comportement électrique du module, générateur et cellule solaire photovoltaïque, est présenté. En effet, les caractéristiques principales du générateur photovoltaïque, à savoir I-V et P-V, ont montrées l'influence de l'ensoleillement et de la température de façon différente. L'analyse de ces caractéristiques montre que la tension d'une cellule baisse fortement avec la température. Plus la température augmente et moins la cellule est performante. En revanche, le courant augmente légèrement en intensité : cette augmentation reste néanmoins négligeable au point de puissance maximale. Par contre, le courant est directement proportionnel au rayonnement, contrairement à la tension qui ne varie que très peu en fonction de l'éclairement.

Chapitre III :

Architecture d'une installation photovoltaïque





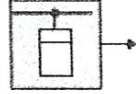


III.1 Introduction

La puissance issue du générateur PV est transmise vers le réseau via un onduleur. Ce dispositif électronique joue un rôle primordial dans le fonctionnement du système PV raccordé au réseau. Dans ce contexte, Nous allons décrire dans ce chapitre les différentes configurations d'onduleurs des systèmes PV. Dans la suite de ce chapitre, nous présentons le principe de protection d'un système photovoltaïque contre les surtensions et les surintensités.

III.2. Différents types d'installations photovoltaïques

Une installation photovoltaïque est constituée de façon générique des fonctions [17] :

1- De génération de l'énergie à courant continu avec les panneaux photovoltaïques,	 Produire
2- De protection côté continu (DC), avec des appareillages : de coupure, de protection contre les surintensités, de protection contre les surtensions (atmosphériques ou d'exploitation), de surveillance complémentaire de dégradation de l'isolement.	 Protéger en d.c.
3- de conversion continu -alternatif (DC / AC), avec les onduleurs,	 Convertir
4- De protection côté alternatif (AC), avec des appareillages : de coupure, de protection contre les surintensités, de protection contre les surtensions (atmosphériques ou d'exploitation), de contrôle ou protection des défauts d'isolement.	 Protéger en a.c.
5- De connexion au réseau avec les appareillages : de comptage, et en fonction de la puissance : de déconnexion externe éventuel, de transformation de basse tension en haute tension, de coupure et protection haute tension.	 Connecter au réseau

Le raccordement des strings formant le champ solaire de l'installation PV peut être réalisé en utilisant :

- un seul onduleur pour toutes les installations (onduleur simple ou central) (Figure III.1) ;
- un onduleur pour chaque string (Multi-onduleurs à gestion individuelle) (Figure III.2) ;
- un onduleur pour plusieurs strings (installations multi onduleurs à gestion centralisée) (Figure3.6).

III.2.1 Installations onduleur centralisé

Ces installations sont caractérisées par le fait qu'un défaut risque d'arrêter toute la production. Ce type d'architecture est utilisé en application domestique avec une puissance limitée à 3 kWc en France et 6 kWc dans d'autres pays. Avec une à trois chaînes en parallèle, cette configuration permet de limiter la fonction de protection côté continu (DC) à la coupure amont de l'onduleur

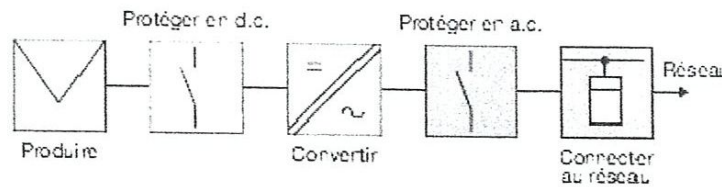


Figure (III.1). Architecture utilisée en application domestique

III.2.2 Installations multi-onduleurs

En cas de défaut ou de maintenance, la perte de production est limitée à la machine concernée. Ce choix est fait pour les installations industrielles dont la puissance peut aller à plusieurs centaines de kWc pour les grandes toitures et à plusieurs MWc pour les centrales au sol. Au-delà de 250kWc, le raccordement au réseau sera réalisé au travers d'un transformateur élévateur BT-H [18].

III.2.2.1 Multi-onduleurs à gestion individuelle

Ce type d'architecture a l'avantage de la simplicité avec l'utilisation d'onduleurs plus petits que celui qu'il aurait fallu installer en regroupant les générateurs en parallèle.

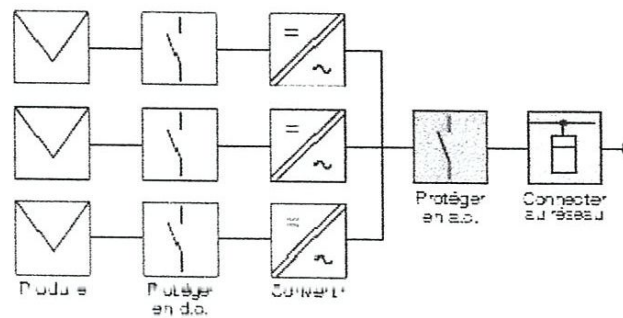


Figure (III.2) Architecture multi-onduleurs à gestion individuelle

III.2.2.2 Multi-onduleurs à gestion centralisée

Ce type d'architecture va permettre une grande flexibilité de maintenance et une gestion du temps d'utilisation des machines en n'utilisant que le nombre d'onduleurs nécessaire. Cette gestion assure aussi l'utilisation des onduleurs à leur puissance optimale en fonction de l'ensoleillement.

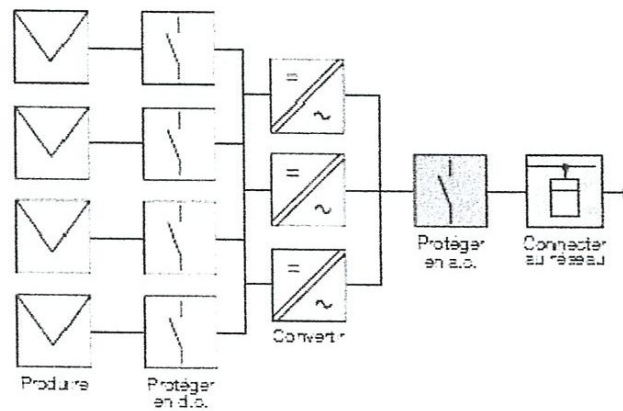


Figure (III.3) Architecture multi-onduleurs à gestion centralisée

III.3. Séparation galvanique continu- alternatif (DC /AC)

Le choix de mettre en œuvre ou pas une séparation galvanique va conditionner le choix des principes de protection et de surveillance, tant du côté DC que du côté AC le tableau ci-après regroupe les possibilités[18] :



Côté DC :

- la classe de tension (TBT ou BT),
- d'installation « flottante ou isolée »,
- la polarisation fonctionnelle directe ou au travers d'une résistance.

Côté AC :

- le choix des régimes de neutre TT, TN ou IT

Côté d.c.	Schéma de principe		Côté a.c.
Udc	Principe de protection contre les contacts indirects		Principe de protection contre les contacts indirects: IT, TN ou TT
≤120 V	TBTB		Nécessité d'une séparation galvanique pour garantir le principe de protection par TBTB ou TBTP.
≤120 V	TBTP		
>120 V	Classe I		Sans isolation galvanique, la polarisation d.c. n'est pas envisageable.
			Séparation galvanique obligatoire en raison de la polarisation d.c.

Tableau.1



III.4. Coupure d'un générateur photovoltaïque

III.4.1 Sectionnement

Le sectionnement a pour objectif d'assurer la sécurité des intervenants en garantissant la séparation effective de la source. Cette fonction doit être assurée sur les deux raccordements du ou des onduleurs côté d.c. et a.c. Si le générateur est constitué de plusieurs groupes de chaînes, cette fonction est à prévoir également par groupe afin de permettre d'intervenir individuellement sur chaque groupe. Ce sectionnement doit répondre aux trois fonctions suivantes[17] :

Fonction	Caractéristique	Valeur
Garantir la distance de coupure dans l'air	Tension de choc (U _{imp})	5x U _{oc}
Garantir les valeurs de lignes de fuite	Tension d'isolement (U _i)	1,2 U _{oc}
Garantir la certitude de l'indication de position ouverte et assurer la consignation	Coupure soigneusement apparente	3 F ou coupure visible

Tableau.2

III.4.2 Coupure d'urgence

La coupure d'urgence a pour objectif d'assurer la sécurité des exploitants en cas de choc électrique, de brûlure, d'incendie sur ou dans l'équipement. La commande de ces appareils doit être rapidement et facilement accessible, située à proximité du ou des onduleurs tant du côté d.c que du côté a.c. Cette coupure doit répondre aux quatre fonctions suivantes :

Fonction	Caractéristique	Valeur
Garantir la coupure en charge	Tension d'emploi (U _e) Courant d'emploi (I _e) Cette caractéristique va demander au constructeur de s'engager, en plus des données de la norme CEM 60 947-3, sur toutes les valeurs de courant (petit courant, courant critique de l'appareil) Constante de temps (L/R)	1,2 U _{oc} De 0 à 1,25 I _{ac} (non normalisée) 1 ms
Assurer une coupure omnibinaire	Simultané Isolation galvanique	Coupure dans l'air
Permettre l'accès aux commandes	Directement, dans le domaine domestiques Directement, ou par télécommande dans les domaines autres que domestiques	Action manuelle directe Action manuelle directe, ou télécommande à émission de courant ou manqué de tension
Regroupement des commandes	Commandes d.c. et a.c. sont si possible regroupées dans la même localisation	

Tableau.3



III.5 Protection d'un générateur photovoltaïque

Lors de la définition de la configuration d'une installation photovoltaïque, il convient de prévoir, si nécessaire, la protection des différentes sections de l'installation contre les surintensités et les surtensions d'origine atmosphérique. Nous indiquerons les conditions de protection contre les surtensions de l'installation PV du côté alimentation (côté DC) et du côté charge (côté AC) de l'onduleur, aussi les méthodes de protection de l'installation contre les dommages causés par une éventuelle fulmination directe ou indirecte sont cités.

III.5.1 Protection d'un générateur photovoltaïque contre les chocs électriques

III.5.1.1 Protection contre les contacts directs

Les matériels PV partie courant continu doivent toujours être considérés comme sous tension et disposer de protection par isolation des parties actives ou par enveloppe. Cette disposition n'est pas nécessaire si la tension PV reste limitée respectivement à 60 et 30 V DC. en TBTS et TBTP.

III.5.1.2 Protection contre les contacts indirects

Les modes de protection doivent intégrer les dispositions mises en œuvre côté DC et AC , ainsi que la présence ou non d'une séparation galvanique par transformateur entre les parties DC et AC
Les dispositions de protection doivent également intégrer quatre contraintes :

- l'impossibilité technico-économique de surveiller et de pouvoir isoler individuellement chaque générateur (un module PV) en cas de besoin comme dans une installation BT alimentée des sources centralisées (poste HT/BT, groupe tournant, ASI...),
- le niveau de courant de court-circuit des générateurs photovoltaïques, proche de leur courant nominal rendant la détection des défauts complexe,
- l'exposition aux intempéries avec les contraintes cycliques de jour/nuit,
- la présence d'une tension continue qui peut dégrader dans le temps les isolants et les canalisations de façon plus forte qu'une tension alternative.

Les dispositions de protection contre les contacts indirects sont assurées par la mise en œuvre dans toute la partie d'installation d.c. de la classe II ou de l'isolation renforcée. Cette disposition n'est pas nécessaire si la tension PV est réalisée en TBTS et TBTP (< 120 V DC). Dans le cas



d'installation d'armoires d.c. dans un local ou un emplacement de service électrique avec accès réservé à du personnel qualifiée, cette armoire peut être de classe I dans la mesure où la protection contre les contacts indirect est complétée par une LES dans ce local.

III.5.2 Protection d'un générateur photovoltaïque contre les surtensions

III.5.2.1 Protection contre les surtensions liées à la foudre

Les surtensions sont présentes de plusieurs manières dans une installation PV. Elles peuvent être :

- transmises par le réseau de distribution et être d'origine atmosphérique (foudre) et/ou dues à des manœuvres,
- générées par des coups de foudre à proximité des bâtiments et des installations PV, ou sur les paratonnerres des bâtiments,
- générées par les variations de champ électrique dues à la foudre[19].

III.5.2.2 Mise en œuvre ou dispense des parafoudres DC

La mise en œuvre ou non de parafoudres va dépendre de la longueur des installations exposée au risque et du niveau céramique (Nk) de l'endroit. Cette longueur critique varie en fonction des types d'installation.

Pour un onduleur, la longueur des installations à considérer pour déterminer L est :

$$L = Lc1 + Lc2 + Lc3.$$

Pour une installation à plusieurs onduleurs individuels, la longueur à considérer est la longueur par onduleur ; pour une installation à plusieurs onduleurs à gestion centralisée, la longueur à considérer est la somme de toutes les longueurs[19].

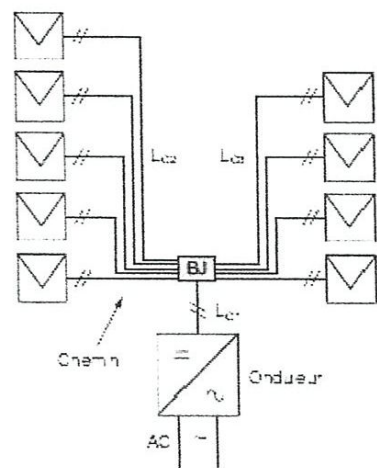


Figure (III.4). Installation à un onduleur



III.5.2.3 Conditions de mise en œuvre des parafoudres côté AC et DC

Suivant la NT C15-100 et le guide UTE C 15-712-1, les conditions d'installation des parafoudres côté DC et AC dépendent des différents critères suivants :

- Coté DC, un parafoudre est obligatoire au niveau de l'onduleur :
 - soit en présence de paratonnerre,
 - soit lorsque la longueur L entre les panneaux PV et l'onduleur est $> L_{crit}$.

Un deuxième parafoudre est recommandé pour protéger les panneaux PV si $L > 10$ m.

- Côté AC, un parafoudre est obligatoire au niveau du TGBT (ou de l'AGCP) :
 - soit en présence de paratonnerre,
 - soit lorsque le niveau kéraunique est > 25 .

Un deuxième parafoudre est nécessaire pour protéger l'onduleur si la distance entre le TGBT (ou l'AGCP) et l'onduleur $D > 10$ m.

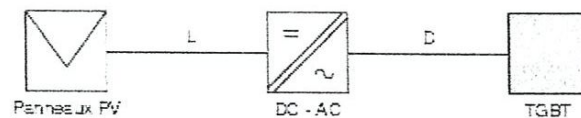


Figure (III.5). Conditions d'installation des parafoudres

		DC		AC	
		Panneaux PV	ond. DC	ond. AC	TGBT
		L < 10 m	L > 10 m	D < 10 m	D > 10 m
Installation avec paratonnerre	Non isolé	— T1	T1 — T1	— T1	T2 — T1
	Isolé	— T2	T2 — T2	— T1	T2 — T1
Installation sans paratonnerre		— T2	T2 — T2	— T2	T2 — T2

Remarque: T1 = parafoudre type 1 ou class 1, T2 = parafoudre type 2 ou class 2.

III.5.3 Les surintensités d'un générateur photovoltaïque

III.5.3.1 Ombrage d'un générateur

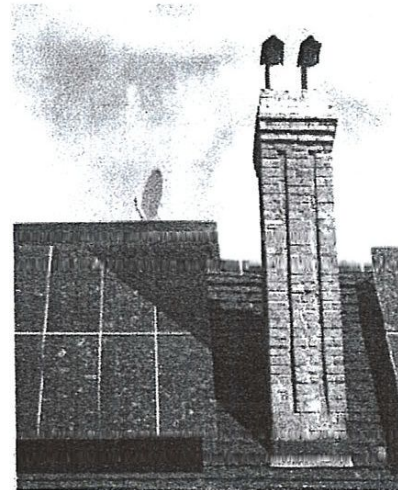
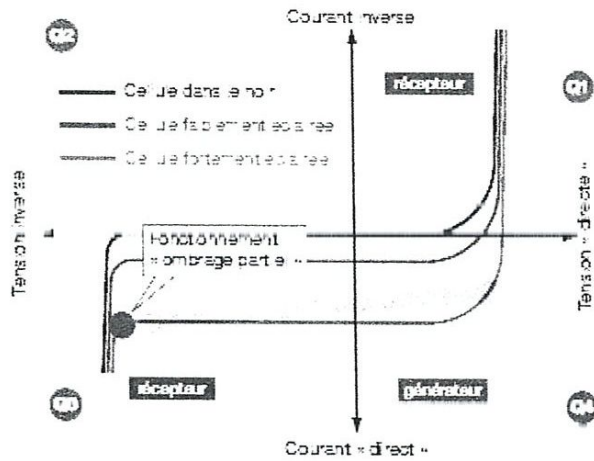
III.5.3.1.1 Ombrage partiel

Ombrage partiel sur un générateur photovoltaïque L'ombrage partiel d'une cellule va forcer cette dernière à travailler dans le quadrant Q3 (voir figure III.5), c'est-à-dire d'inverser la polarité de la tension de l'élément et de l'élever au seuil tension inverse de la jonction ($U_C \approx -15$ V à -25 V).

La puissance absorbée par les cellules à l'ombre dépasse très nettement la puissance normalement dissipée et provoque des points chauds. Les points chauds peuvent endommager définitivement le module PV. Une protection contre les surintensités est sans effet, car l'augmentation de la



puissance à dissiper est liée à l'apparition d'une tension inverse dans la cellule affectée et non à une augmentation significative du courant I_{sc} .



Figure(III.5). Effet de l'ombrage partiel sur la caractéristique I-V

Une diode By-pass va, en permettant au courant des autres éléments en série de contourner la cellule « ombrée » :

- éviter la surtension inverse ainsi que les points chauds liés à cet ombrage,
- laisser les autres cellules non ombragées de la chaîne générer leur courant normal, à la place du courant sensiblement égal au courant réduit fourni par la cellule ombragée

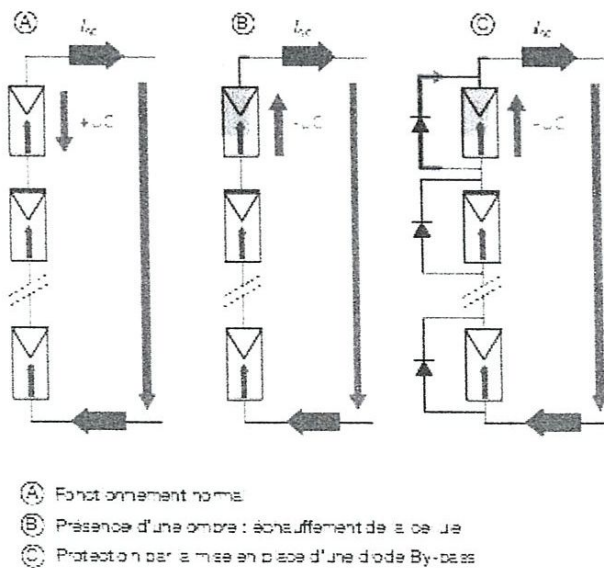


Figure (III.6) Ombrage partiel



III.5.3.1.2 Ombrage total

Ombrage total d'une chaîne sur un générateur photovoltaïque Les courants inverses peuvent être imposés à un module présentant une tension plus faible, comme par exemple un module complet à l'ombre par les modules en parallèle exposés à de hauts niveaux de rayonnement. Le module à l'ombre représente une charge et exploite le quadrant Q1 de la figure III.7. En conditions normales, la tension de fonctionnement est limitée à la tension en circuit à vide U_{OC} .

En conséquence, le courant maximum inverse ne dépasse guère le courant de court-circuit au niveau du module et ne représente pas une surcharge dangereuse pour le module et l'installation DC.

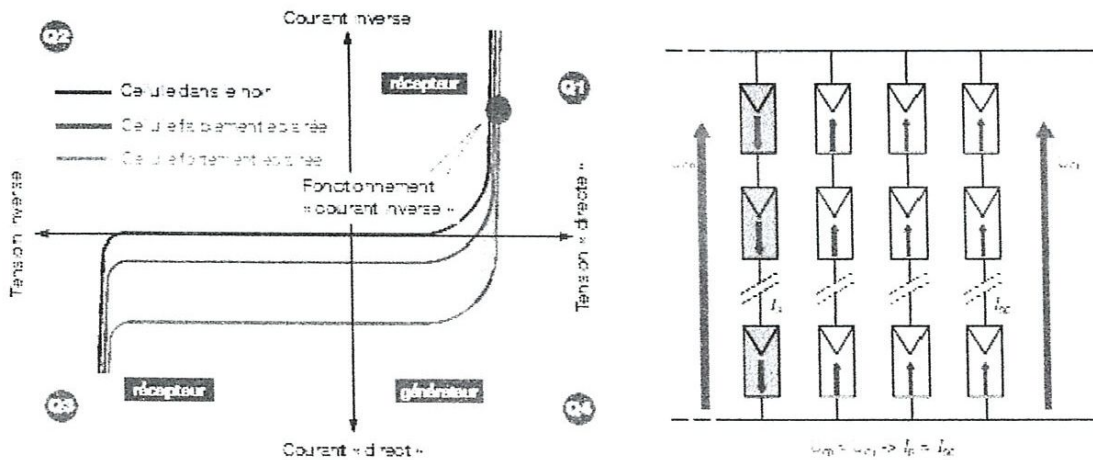


Figure (III.7) Effet de l'ombrage total sur la caractéristique I-V

III.5.3.2 Court-circuit total d'un générateur photovoltaïque

Contrairement aux autres sources d'énergie, un court-circuit d'un générateur PV complet sans dispositif de stockage ne génère pas de surintensités dangereuses dans celui-ci. Le courant de défaut va être limité à I_{sc} total du générateur. L'ensemble des canalisations et équipements doivent être dimensionnés pour cette éventualité, afin justement de ne pas à mettre en œuvre de dispositions de protection complexe et sans grand intérêt.



III.5.3.3 Court-circuit partiel du générateur

Si un défaut de court-circuit interne au générateur PV est établi, il va réduire la tension utile de la chaîne en défaut et lui faire subir des surintensités inverses dangereuses pour les modules, fournies par :

- l'une ou plusieurs chaînes en parallèles,
- des sources externes comme les accumulateurs,
- ou les deux.

Les courts-circuits dans les modules peuvent s'établir dans les boîtes de jonction, le câblage, suite à un défaut de terre dans le réseau du générateur. De même, il est impératif d'envisager un « claquage » d'une protection foudre du générateur ou de l'onduleur, voire de l'onduleur lui-même.

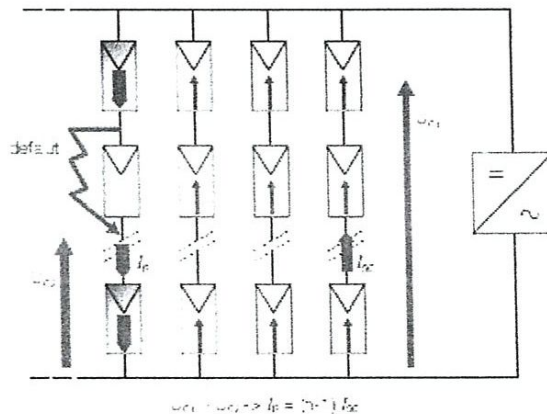


Figure (III.8) : Court-circuit dans une chaîne

Ce court-circuit partiel peut être assuré par deux défauts de masse dans une installation isolée de la terre (figure III.9) ou par un défaut de masse dans une installation où une polarité est raccordée à la terre pour des raisons fonctionnelle (figure III.10).

Dans cette éventualité, une surintensité dangereuse pour les modules peut apparaître : le courant de boucle s'élève à :

$$I_{\text{fault}} \approx n I_{\text{scSTC}}$$

Et le courant inverse dans la chaîne en défaut à :

$$I_R \approx (n - 1) I_{\text{scSTC}}$$

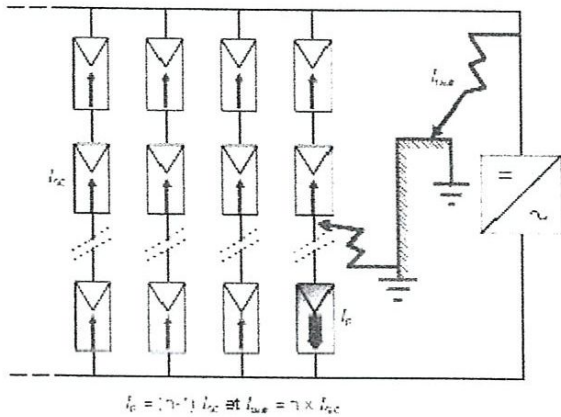
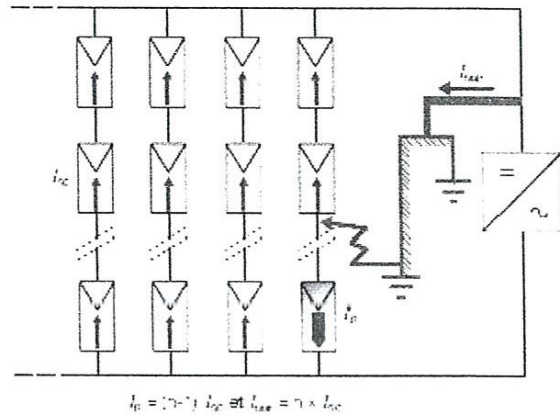


Figure (III.9) : Double défaut de masse installation



Figure(III.10). : Simple défaut de masse sur une avec polarisation fonctionnelle

III.5.4 Protection d'un générateur photovoltaïque contre les surintensités

Le dimensionnement des câbles de chaînes dépend fortement des chutes de tension ; les notions de courants admissibles pour la protection des canalisations contre les surcharges sont généralement automatiquement satisfaites et ne nécessitent pas la mise en place de protection pour assurer cette fonction. Le principal critère de sélection des fusibles est la valeur de I_{RM} (courant inverse maximum PV) que le module peut supporter temporairement jusqu'à ce que le fusible de protection choisi interrompe le courant de défaut généré suite à un défaut (voir figures III.9 et III.10 ci-dessus).

Le choix de mettre ou non un fusible de protection est guidé selon le principe suivant :

$$(N_{cmax} - 1) I_{scSTC} \leq I_{RM} < N_{cmax} I_{scSTC}$$

Pour les générateurs PV avec un nombre de chaînes N_c supérieur à N_{cmax} , l'utilisation de dispositifs de protection contre les courants inverses est donc à prévoir. La figure III.11 donne le nombre de chaînes en parallèle N_{Cmax} qui ne nécessite pas de protection en fonction de la valeur du courant I_{RM} d'une chaîne dans une installation sans batterie de stockage



:

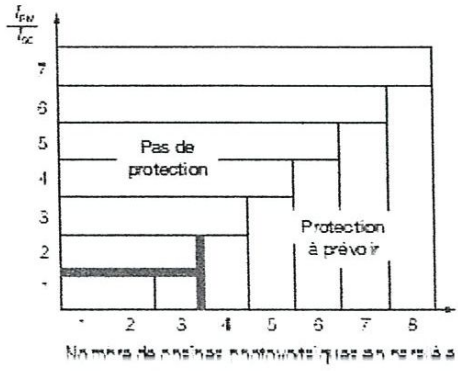


Figure (III.11). Nombre de chaînes en parallèle N_{Cmax} en fonction de la valeur du courant I_{RM}

Assez généralement, dans une installation sans batterie de stockage : les valeurs d' I_{RM} de modules PV en silicium cristallin sont supposées entre 2 et 3 I_{scSTC} .

La règle générale est que chaque chaîne soit protégée individuellement par un dispositif de protection. Dans certains cas de modules ayant une tenue très élevée en courant inverse, N_p chaînes peuvent être raccordées en parallèle à un dispositif de protection unique.

$N_{p\ max}$: Nombre maximal de chaînes en parallèle par dispositif de protection

Tenue en courant inverse du module	$N_{p\ max}$
$1,4 I_{scSTC} \leq I_{RM} < 3,8 I_{scSTC}$	1
$3,8 I_{scSTC} \leq I_{RM} < 6,2 I_{scSTC}$	2
$6,2 I_{scSTC} \leq I_{RM} < 8,6 I_{scSTC}$	3
Cas général: $(2,4 N_{p\ max} - 1) I_{scSTC} \leq I_{RM} < (2,4 N_{p\ max} - 1,4) I_{scSTC}$	

Information des I_{RM} données par les constructeurs de modules photovoltaïques.

Certains fabricants de modules précisent un courant inverse maxi à peu près égal au courant nominal de court-circuit et un calibre de fusible nettement plus élevé.

Apparemment, ce faible courant inverse communiqué est destiné à définir des courants de dégivrage ou de l'enlèvement de couche fi ne de neige, la valeur du fusible désignant effectivement la protection dans des conditions de défaut.



Lorsque le constructeur définit un fusible maxi, cette donnée doit être prise en compte. Mais en cas de doute sur le type exact du fusible, ceci est impérativement à clarifier avec le « service client » du fabricant des modules.

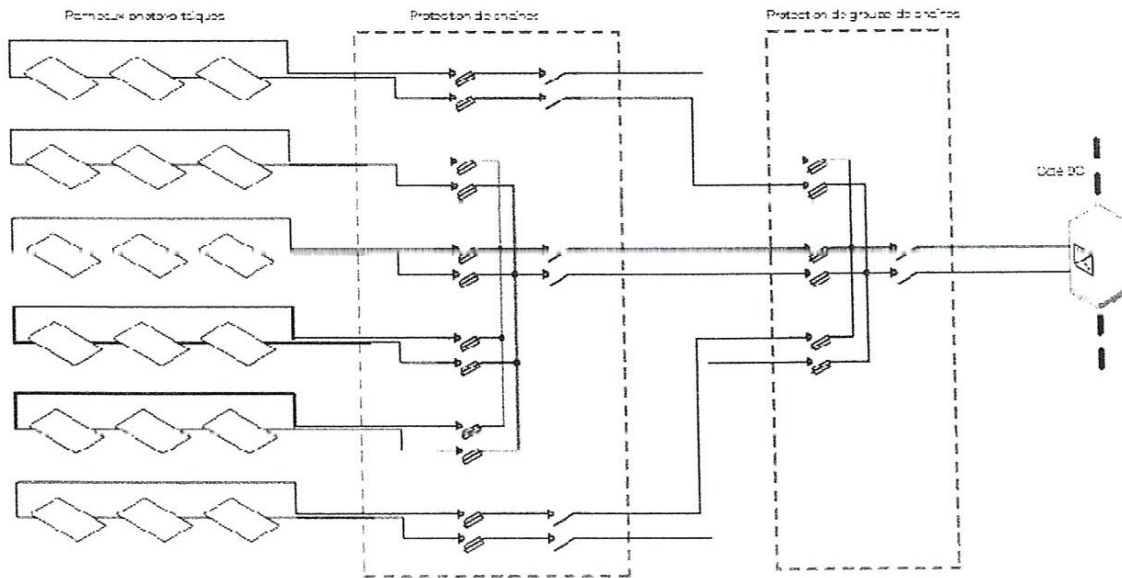


Figure (III.12) Fusible de protection générateur photovoltaïque (N : nb de groupes).

III.6.Conclusion

Ce chapitre a pour but d'analyser les problèmes et les concepts de base rencontrés lors de la mise en place d'une installation photovoltaïque. Partant d'une description générale des modalités d'exploitation de l'énergie solaire par des installations PV, il expose brièvement les méthodes de raccordement au réseau et de protection contre les surintensités, les surtensions et le contact, afin de bien choisir les dispositifs de commande et de protection des différents composants des installations.

Chapitre IV :

Simulation des performances d'un générateur photovoltaïque

VI.1.Introduction :

La modélisation permet d'analyser le fonctionnement de chaque élément du système, elle permet aussi de faciliter l'étude de l'influence du générateur PV sur le réseau électrique, tout en optimisant le fonctionnement du GPV. La modélisation vise à donner les modèles théoriques pour simplifiés les composants du système raccordé au réseau, et d'étudier plus en détail le fonctionnement de chaque élément pour pouvoir simuler le comportement de l'ensemble du système. Les modèles établis seront faciles à introduire dans des logiciels de simulation [8].

VI.2. Modélisation du système photovoltaïque :

Les caractéristiques (I-V) et (P-V) d'un module photovoltaïque à une tension donnée dépendent uniquement de l'éclairement (G) et de la température (T). Selon l'expression défini au chapitre(II), le courant généré par la cellule Photovoltaïque peut être décrit par la formule suivante :

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \quad (VI.1)$$

Avec :

I: Le courant délivré par le module (A).

I_{ph} : photo-courant, ou courant généré par l'éclairement (A).

I_d : Courant de saturation de la diode (A).

I_p : Le courant shunt (A).

Pour ce module l'équation du I_{ph} ramenée aux conditions standard $G=1000w/m^2$,

$T=25^\circ C$ donnée par :

$$I_{ph} = (I_{cc} + K_t \Delta_T) \frac{G}{G_n} \quad (IV.3)$$

Où : $\Delta_T = T - T_n$

Avec :

I_{ph} : photo-courant, ou courant généré par l'éclairement (A).

G_n : L'éclairement de référence (w/m^2).

I_{cc} : courant de court-circuit qui est égale au photo-courant en (A), aux conditions nominales (à 25°et 1000W/m²).

k_t : coefficient de la température de court-circuit (A).

T : température de la cellule (°K).

T_n : température de référence (°K) égale 298°K (25°C).

La température de la cellule peut être calculée à partir de la température ambiante et celle d'irradiation comme suit :

$$T = T_a + G \left(\frac{n_{oct} - 20}{800} \right) \quad (VI.4)$$

Où :

T_a : Température ambiante.

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

Le courant de la diode est données par :

$$I_d = I_o \left(\exp \frac{q(V + R_s I)}{AKT} - 1 \right) \quad (VI.5)$$

V : Tension à la borne de la charge (V).

I_o : Courant de saturation de la diode a la température de référence (A).

Le courant de la résistance shunt (R_p) est calculé par :

$$I_p = I_o \left(\frac{V + R_s I}{R_p} \right) \quad (VI.6)$$

VI.3. Simulation du système Photovoltaïque

Le module photovoltaïque choisi pour la modélisation puis la simulation sous MATLAB contient 54 cellules solaires c'est celui de KYACERA Solar KC200GT. Les caractéristiques physiques et électriques de ce module sont données dans le tableau ci-dessous :

■ Specifications

■ Electrical Performance under Standard Test Conditions ('STC)

Maximum Power (Pmax)	200W (+10%/−5%)
Maximum Power Voltage (Vmpp)	26.3V
Maximum Power Current (Impp)	7.61A
Open Circuit Voltage (Voc)	32.9V
Short Circuit Current (Isc)	8.21A
Max System Voltage	600V
Temperature Coefficient of Voc	$-1.23 \times 10^{-1} \text{ V}/^{\circ}\text{C}$
Temperature Coefficient of Isc	$3.18 \times 10^{-3} \text{ A}/^{\circ}\text{C}$

*STC : Irradiance 1000W/m², AM1.5 spectrum, module temperature 25°C

Tableaux VI.1 : caractéristiques physique et électriques du Générateur Photovoltaïque [réf].

IV.3.1. performances électriques aux conditions standards de fonctionnement

VI.3.1.1. Caractéristique courant tension (I-V) :

A température et éclairement constants, et particulièrement aux conditions standards la caractéristique (I-V) est donnée par la figure(VI.1) :

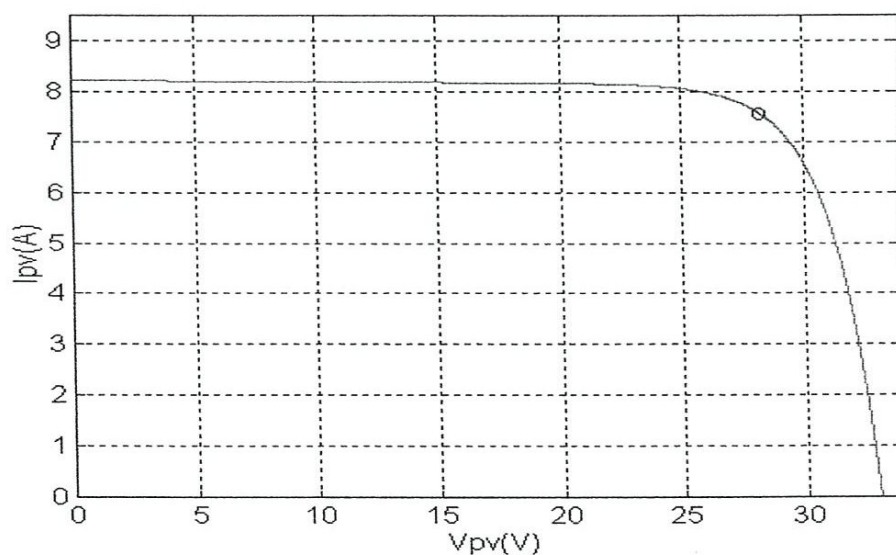


Figure (VI.1) : Caractéristique (I-V) du module photovoltaïque

Pour : (G=1000 w/m², T=25°C).

Une cellule (générateur) photovoltaïque est définie par sa courbe caractéristique électrique (courant-tension). Elle indique la variation du courant qu'elle produit en fonction de la tension aux bornes de la cellule (générateur) depuis le court-circuit jusqu'au circuit ouvert (fig.VI. 1).

Entre ces deux valeurs, il existe un optimum donnant la plus grande puissance P_m (indiquée par un cercle 'o') ou puissance crête caractérisant la performance de la cellule (générateur).

D'après les caractéristiques courant-tension, il est possible de déduire d'autres paramètres électriques spécifiques:

- le courant de court circuit (I_{cc}) correspondant au courant débité par la cellule quand la tension à ses bornes est nulle (en pratique, ce courant est très proche du photo courant I_{ph});
- la tension du circuit (V_{co}) correspondant à la tension qui apparaît aux bornes de la cellule quand le courant débité est nul.

VI.3.1.2.Caractéristique de puissance (P-V) :

A température et éclairement constants, et particulièrement aux conditions standards la caractéristique (P-V) est donnée par la figure(VI.2) :

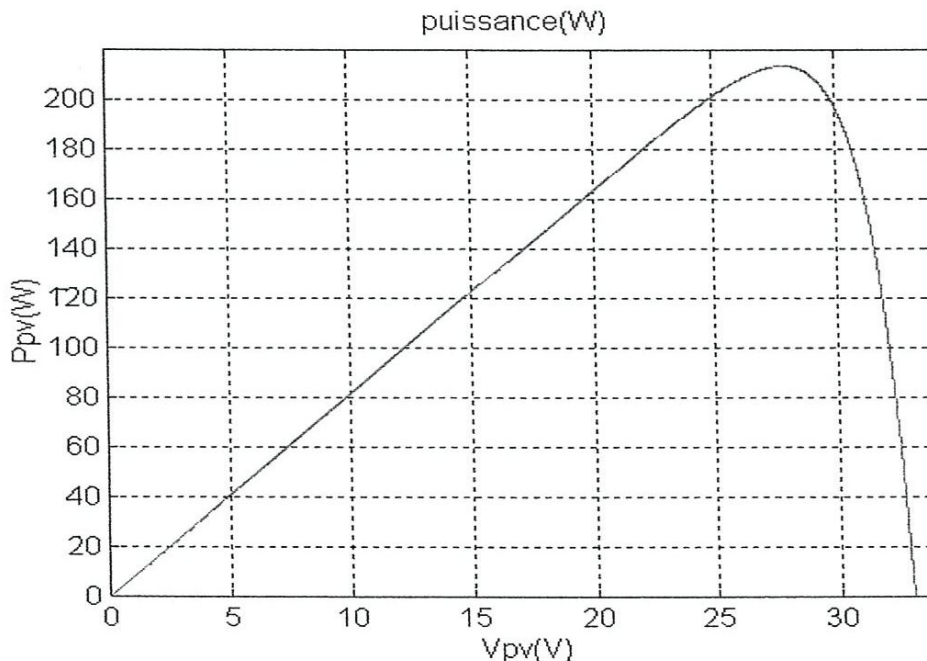


Figure (VI.2) : Caractéristique (P-V) du module photovoltaïque

Pour : ($G=1000 \text{ w/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$).

IV3.2. performances électriques à éclairement et température variable :

L'énergie électrique produite par une cellule dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface. L'influence de la température est importante et a des conséquences pour la conception des panneaux et des systèmes photovoltaïques.

Dans ce contexte, afin de constater l'influence des conditions externes, de l'éclairement et de la température sur les caractéristiques (I-V) et (P-V) nous avons adopté la méthode suivante :

- On fixe la température à $T=25^{\circ}\text{C}$ et on fait varier l'éclairement, pour visualiser l'effet de l'éclairement.
- On fait varier la température pour un éclairement constant ($G=1000\text{ w/m}^2$).

VI.3.2.1. Effet de l'éclairement :

En faisant varier l'éclairement entre 300 et 1000, les caractéristiques (I-V) et (P-V) sont données par la figure (VI.3) et (VI.3) :

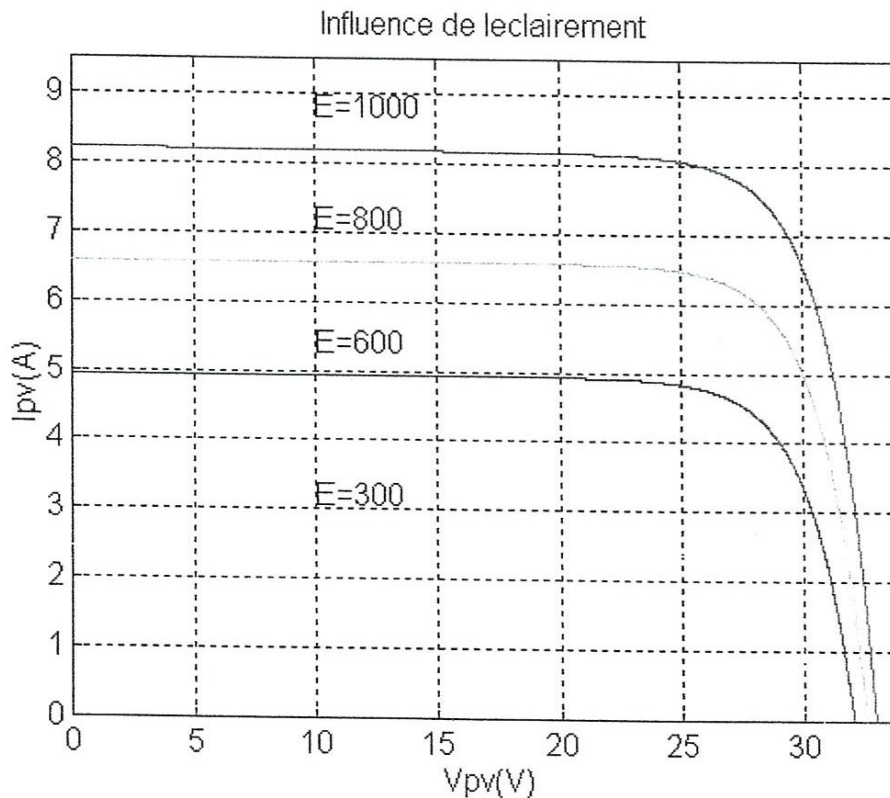


Figure (VI.3). Caractéristique courant-tension d'un générateur en fonction de l'éclairement.

En effet, en faisant varier la température, les caractéristiques (I-V) et (P-V) sont données par la figure(VI.5) et (VI.6) :

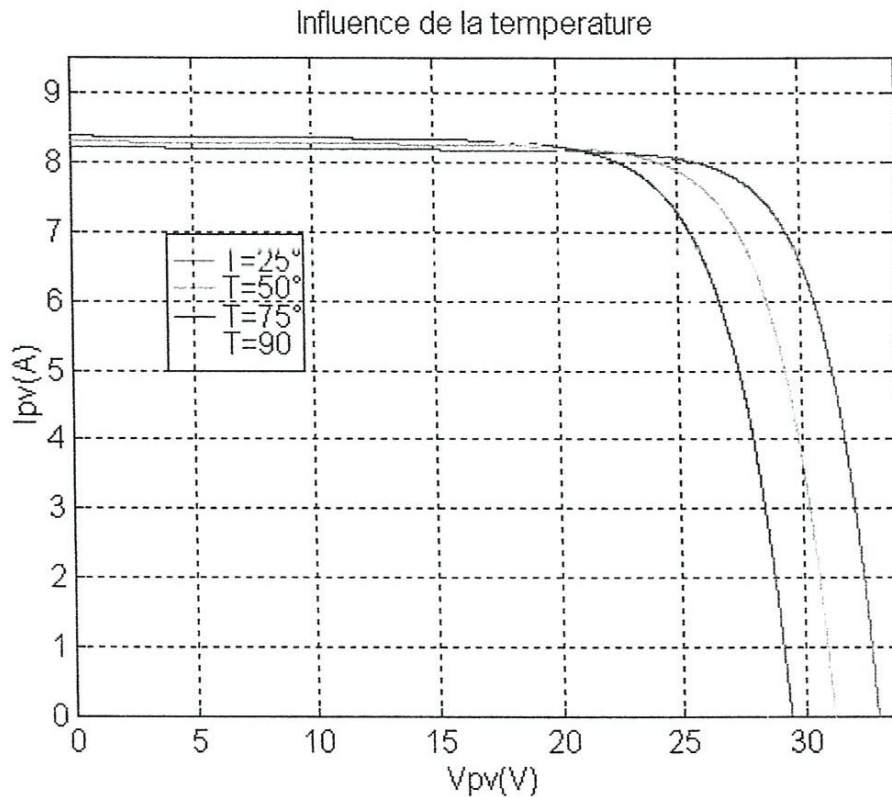


Figure (VI.5). Caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de la température.

On remarque que la tension du circuit ouvert diminue contrairement au courant de court-circuit qui reste constant. L'influence de la température est non négligeable sur la caractéristique courant/tension d'un générateur photovoltaïque (voir fig.III.5). Pour le silicium, lorsque la température augmente, le courant augmente d'environ $0.025 \text{ Ma/cm}^2/\text{°C}$ alors que la tension décroît de $2.2 \text{ Mv/°C/cellule}$. Cela se traduit par une baisse de puissance d'environ $0.4\%/\text{°C}$. Cette Influence devra être prise en compte lors du dimensionnement du générateur photovoltaïque.

L'effet de la variation de la température sur la caractéristique (P-V) fait diminuer légèrement la puissance et la tension du circuit ouvert. La caractéristique (P-V) est donnée par la figure(VI.6) :

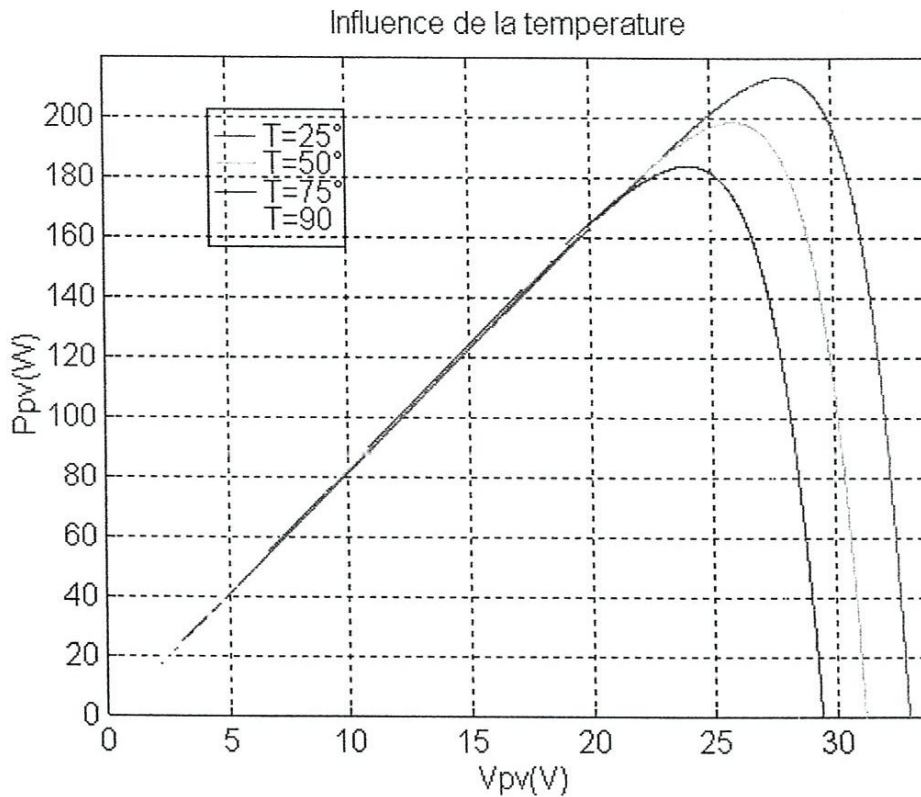


Figure (VI.6) : Caractéristique de puissance d'un générateur en fonction de la température.

De par les résultats présentés aux figures (VI.5) et (VI.6) on peut observer que l'éclairement affecte considérablement les performances en puissances d'un système PV. Toutes fois la variation de la température influe peu sur la caractéristique $P=f(V)$.

VI.3.3. Effet de la température et de l'éclairement

En pratique, l'éclairement et la température varient simultanément et en permanence. il est donc recommandé de bien connaître l'évolution des caractéristiques principales du générateur photovoltaïque, à savoir I-V et P-V. Pour ce faire un scénario est simulé à la figure (VI.7) :

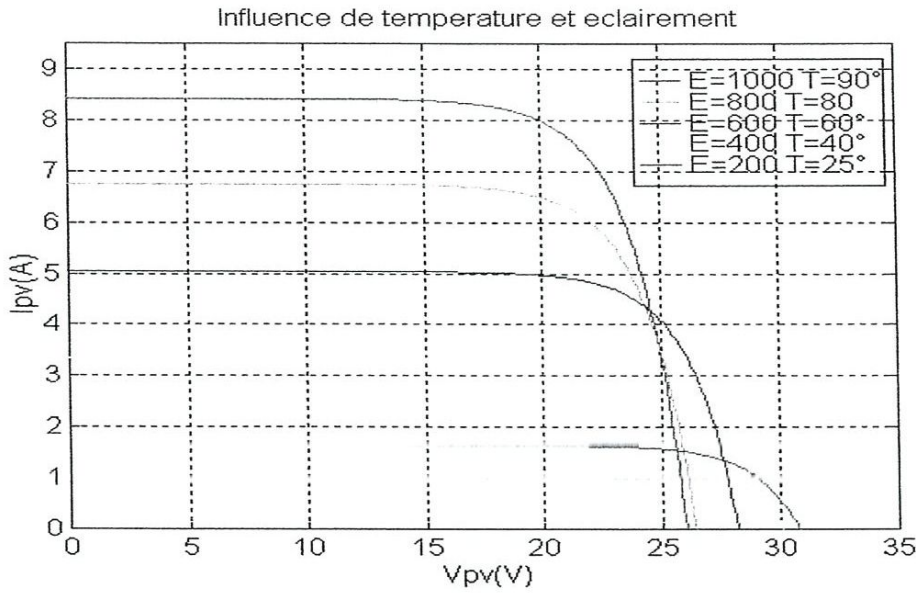


Figure (VI.7) : Effet de la température et l'éclairement sur la Caractéristique (I-V).

L'effet double de l'ensoleillement et de la température de cellules sur les caractéristiques I-V, est montré sur la figure VI.7. On peut observer que la tension de circuit ouvert diminue légèrement avec l'augmentation de la température de cellules de 25°C à 90°C, tandis que le courant augmente à mesure que l'ensoleillement augmente de 200 W/m² à 1000 W/m².

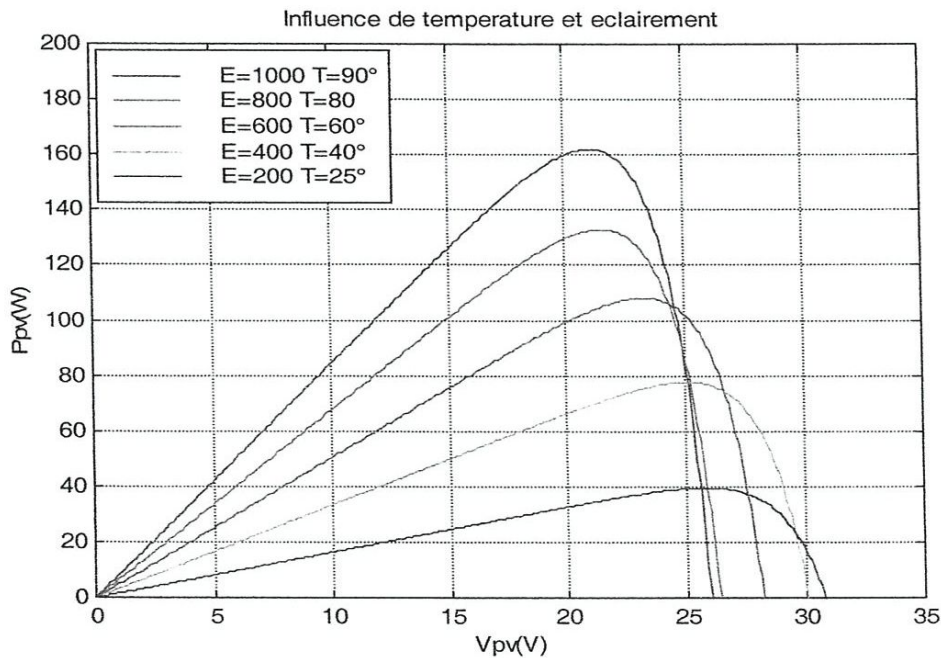


Figure (VI.8) : Effet de la température et l'éclairement sur la Caractéristique (P-V).

VI.3.4. système Photovoltaïque en association série et Parallèle :

L'association parallèle de deux modules fait une forte augmentation de courant de court-circuit tandis que la tension de circuit ouvert reste constante. Par contre, une association en série de deux modules conduit à une augmentation de la tension de circuit ouvert tout en maintenant le courant de court-circuit constant.

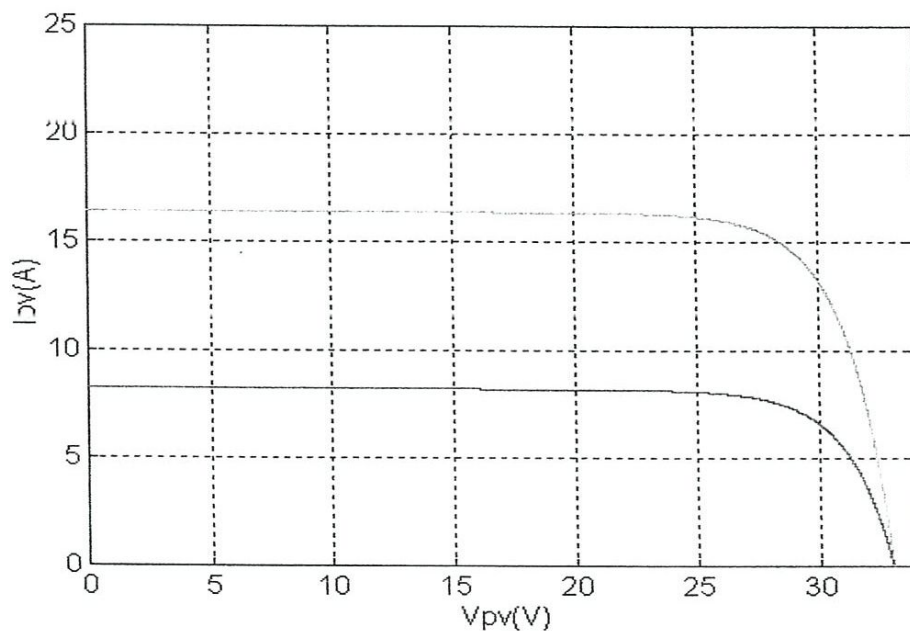


Figure (VI.9) : Association en parallèle de deux modules

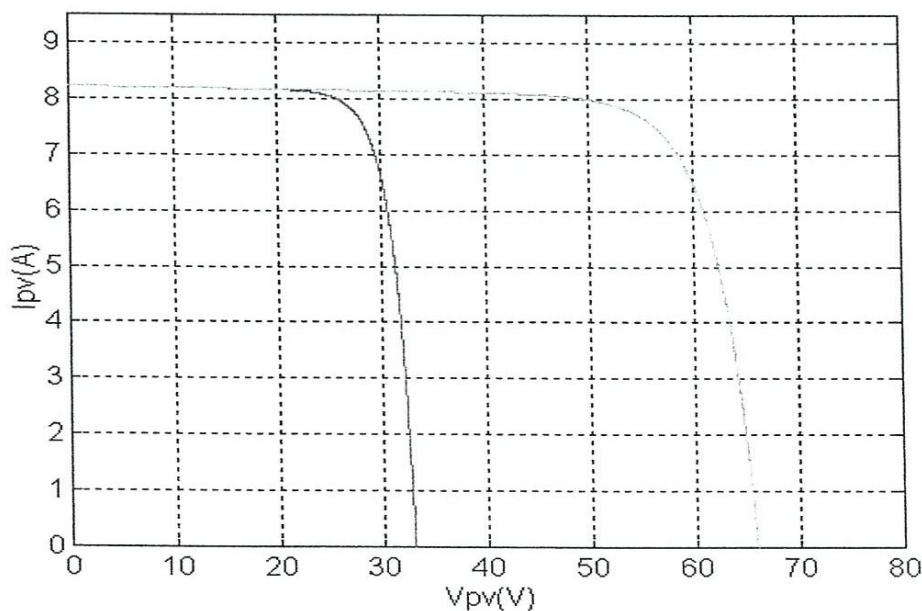
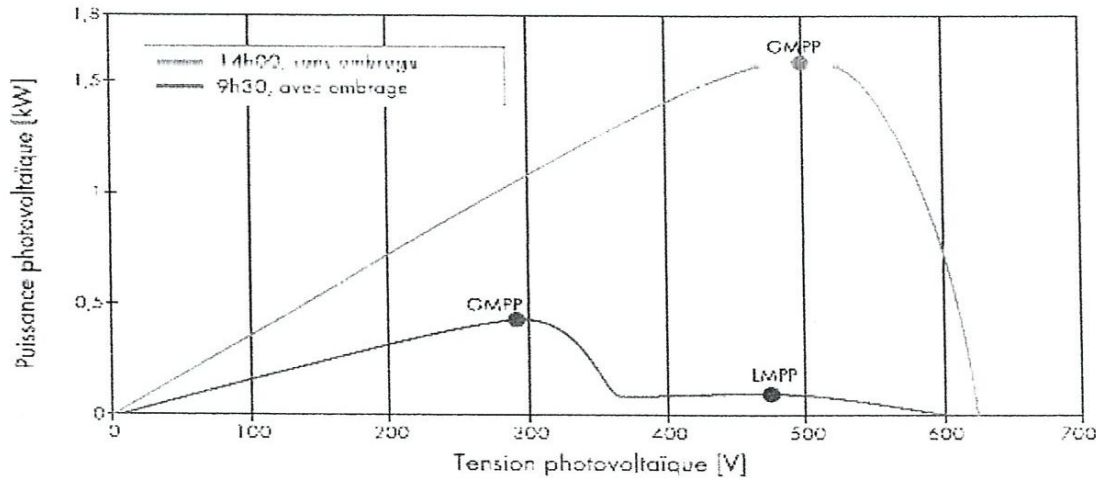


Figure (VI.10) : Association en série de deux modules

VI.4. Effets des ombrages partiels sur les installations photovoltaïques

Chaque générateur photovoltaïque présente un point de travail unique au niveau duquel il peut fournir la puissance électrique maximale possible, appelé le point de puissance maximal (MPP, Maximum Power Point). Cette puissance dépend principalement de l'intensité de radiation. Si différents modules d'un « String » au sein d'un générateur photovoltaïque se trouvent à l'ombre, ses propriétés électriques s'en voient nettement modifiées : le générateur photovoltaïque présente maintenant différents points de travail « favorables » (Figure VI.11).



Figure(VI.11) : Diagramme de puissance et tension du générateur photovoltaïque à deux moments différents de la journée (avec et sans ombrage partiel).

Les courbes montrent qu'en cas d'ombrage, 2 MPP « favorables » différents apparaissent, où la puissance au MPP local est significativement inférieure à celle au MPP global.

VI.5. Conclusion :

Dans ce chapitre, le comportement électrique du module, générateur et cellule solaire photovoltaïque, est présenté. Les simulations des caractéristiques principales du générateur photovoltaïque, à savoir I-V et P-V, ont montrées l'influence de l'ensoleillement et de la température de façon différente. En outre, Lors du calcul d'une installation solaire, il faut garder à l'esprit que l'éclairement et la température varient simultanément et en permanence. Ce point est très souvent négligé lors du dimensionnement de l'installation : il est donc recommandé de bien connaître les conditions et la variation climatique du site choisi dès la conception du projet photovoltaïque.

Conclusion Général

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire concerne les systèmes de production d'énergie photovoltaïque. Ce dispositif est amené à connaître des développements importants liés essentiellement à une volonté de plus en plus affichée de diversification des moyens de production et un meilleur respect de l'environnement.

Ainsi, après un bref rappel sur les ressources énergétiques renouvelables et sur les systèmes de production associés, nous faisons un aperçu succinct sur l'utilisation de l'énergie photovoltaïque dans le monde et particulièrement en Algérie.

Ensuite, nous avons décrit les principes généraux de la conversion photovoltaïque, les caractéristiques du générateur photovoltaïque et les différents organes constituant un système photovoltaïque. L'influence du rayonnement, de la température sur les performances des générateurs photovoltaïques (GPV) ont été aussi envisagées.

Puis, nous présentons l'architecture d'une installation photovoltaïque où les structures couramment utilisées sont décrits. Les moyens de protection des systèmes photovoltaïques contre les surtensions et les surtensions ont été traités.

En outre, la simulation du générateur photovoltaïque dans l'environnement de programmation de Matlab a été développée. Les résultats de simulation ont montré l'évolution de tous les paramètres du système PV. En outre, les courbes obtenues sur les figures 1 à 8 du chapitre VI, sont semblables aux résultats obtenus par la référence [6] citées au chapitre II.

Références Bibliographiques

- [1].G .Rami.«Contrôle de tensions auto adaptif pour des productions décentralisées d'énergie connectées au réseau électrique de distribution».Thèse de doctorat L'INP Grenoble, Novembre 2006.
- [2].Energie solaire photovoltaïque .d'ok/B. Flèche-D. Dèlignes/juin 2007.
- [3].R.P.Makung, «Wind and solar power Systems», Ph.D,P.e Université marchent Marine,1999.
- [4].M. Dhabî « Etude et optimisation d'une installation Hi bride pv-Eolienne ». Thèse de Doctorat , Université de Bechar,2007.
- [5].[www.photovoltaïque .info/les-composantes -de-la-lumière,239.html](http://www.photovoltaïque.info/les-composantes-de-la-lumière,239.html).
- [6].Hindmarsch j. Electric al machine and théier applications 4th express York : Pergame pressa ;1984.
- [7].Bose B.K.Power electronicsand AC Drives. practice-Hall ; 1987.
- [8]. M. Belhadj ,«Modélisation D'un système de captage photovoltaïque . Mémoire de magistère », Université de Béchar -2008.
- [9].Fabrice Juquois PHOTEÏS. Les applications de l'électricité d'origine photovoltaïque : histoire et perspectives. REE N°4 Avril 2010
- [10].Barlow, R and A . Derrick. Solaire dumping An Introduction and Update on the Nimber 168 . London : Inter médiante technology publication, 1993
- [11]. T. Fogelman , « Système photovoltaïque pour les pays en déventement ». Manuel d'installation et d'utilisation ,Agence Française pour la Maitrise de l'énergie ,(AFME), 1982.

[12]. www.solarworld.fr/produits/produits/panneau-photovoltaique/bonification-sunmodules/.

[13]. tpeenergiephotovoltaique.e-monsite.com/pages/la-cellule-photovoltaique/principe-de-fonctionnement-de-la-cellule-photovoltaique.html

[14]. Y. Pankow, « Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension ». Thèse de doctorat de l'école Nationale supérieure d'art et Métiers décembre 2004.

[15]. A. Betka, « Optimisation d'un système de pompage photovoltaïque au fil du soleil », Thèse de Magister, Centre universitaire Biskra, 1997.

[16]. Francisco M. González-Longatt, "Model of Photovoltaic Module in Matlab™", II CIBELEC 2005, pp. 1–5, 2005.

d'énergie solaire Extrait du guide foudre 2008

[17] cahier technique photovoltaïque 2010

[18] Ademe, Fabrice Jouques, Guide de rédaction du cahier des charges techniques des générateurs photovoltaïques connectés au réseau.

[19] Protection contre la foudre et les surtensions des systèmes photovoltaïques et des centrales

[12]. www.solarworld.fr/produits/produits/panneau-photovoltaique/bonification-sunmodules/.

[13]. tpeenergiephotovoltaique.e-monsite.com/pages/la-cellule-photovoltaique/principe-de-fonctionnement-de-la-cellule-photovoltaique.html

[14]. Y.Pankow , «Etude de l'intégration de la production décentralisé dans un réseau basse tension » .Thèse de doctorat de l'école National supérieure d'art et Métiers décembre 2004.

[15]. A.Betka, «Optimisation d'un système de pompage photovoltaïque au fil du soleil », Thèse de Magister, Centre universitaire Biskra,1997.

[16]. Francisco M. González-Longatt, "Model of Photovoltaic Module in Matlab™", II CIBELEC 2005, pp. 1-5, 2005.

d'énergie solaire Extrait du guide foudre 2008

[17] cahier technique photovoltaïque 2010

[18] Ademe, Fabrice Jouques, Guide de rédaction du cahier des charges techniques des générateurs photovoltaïques connectés au réseau.

[19] Protection contre la foudre et les surtensions des systèmes photovoltaïques et des centrales