

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR – ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : Science et Technologie
Département : Electrotechnique
Domaine : Sciences et techniques
Filière : Electrotechnique
Spécialité : Electrotechnique industrielle

Mémoire
Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master
Thème :

Etude et simulation d'un générateur photovoltaïque en site isolé

Présenté par : SEBTI Nawal
FRIKH Hadjer

Encadrant : ABDERREZAK Abdallah Pr. Université badji mokhtar- Annaba

Jury de Soutenance :

KELAIAIA Monia Samira	Pr.	Université badji mokhtar-Annaba	Président
ABDERREZAK Abdallah	Pr.	Université badji mokhtar-Annaba	Encadrant
CHINE Abdelghani	MCB	Université badji mokhtar-Annaba	Examineur

Année Universitaire : 2022/2023



Remerciements

Nos remerciements vont tout premièrement, à Dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage pour réaliser ce travail.

On tient à remercier :

Notre encadreur **Mr : Abderrezak Abdallah** pour son suivi continu ainsi que sa bonne orientation du travail.

Nos remerciements vont également à nos professeurs pour leurs conseils précieux.

On remercie également les membres de jury :

D'avoir acceptés d'honorer par leur présence la soutenance de notre mémoire de fin d'étude.

Enfin on remercie tous ceux qui nous ont aidé de près ou de loin afin d'achever ce travail en particulier mes collègues.

جامعة بادجي
جامعة بادجي
Université Badji Mokhtar-Annaba

ملخص

تعتبر الأنظمة الكهروضوئية مناسبة بشكل خاص لإنتاج الكهرباء اللامركزية والمواقع المعزولة: كهربية الريف (للاحتياجات المنزلية واحتياجات المجتمع: المراكز الصحية والمدارس وما إلى ذلك) ، وضخ المياه ، والتبريد ، والاتصالات السلكية واللاسلكية ، إلخ. لذلك فهي الحل المفضل لسكان الريف الذين لا يمكن توصيلهم بشبكات الكهرباء التقليدية ، حتى بالنسبة للمدن ، يمكن توفير استهلاك الطاقة عن طريق استخدام الألواح على السطح أو على واجهات المباني

Résumé

Les systèmes photovoltaïques sont particulièrement bien adaptés à la production décentralisée d'électricité et les sites isolés : électrification rurale (pour les besoins domestiques et les besoins communautaires : centres de santé, écoles, etc.), pompage de l'eau, réfrigération, télécommunications, etc. Ils constituent donc une solution de choix pour les populations rurales qui ne pourront pas être reliées aux réseaux électriques conventionnels, même pour les villes on peut économiser la consommation d'énergie par l'utilisation des panneaux sur le toit ou sur les façades des bâtiments.

Abstract :

Photovoltaic systems are particularly well suited to decentralized production electricity and isolated sites: rural electrification (for domestic needs and the needs communities: health centres, schools, etc.), water pumping, refrigeration, telecommunications, etc They are therefore a solution of choice for rural populations. which cannot be connected to conventional electricity networks, even for cities energy consumption can be saved by using panels on the roof or on the facades of buildings.

Sommaire

Remerciement	
Résumé	
Introduction Générale	1
CHAPITRE I : les énergies renouvelables.	
Introduction	3
I.1. Définition	3
I.2. Types d'énergie renouvelable	3
I.2.1. L'énergie hydraulique	3
I.2.2. Energie de la biomasse	4
I.2.2.1. Méthanisation	5
I.2.2.2. Biomasse solide	5
I.2.3. Energie géothermique	5
I.2.4. Energie éolienne	6
I.2.5 L'énergie solaire	8
I.2.5.1 Les différents types d'énergie solaire	9
Conclusion	13
CHAPITRE II : L'énergie solaire.	
Introduction	16
II.2. Potentiel solaire en Algérie	16
II.3. Bilan des réalisations	18
II.4. L'énergie solaire	19
II.4.1. Le spectre Solaire	20
II.4.2. Absorption du rayonnement solaire par un semi-conducteur	22
II.4.3. L'angle d'inclination	24
II.5. La cellule photovoltaïque	26
II.5.1. Définition	26
II.5.2. Diffèrent types de cellules	26
II.5.2.1. Cellules en silicium amorphe	26
II.5.2.2. Cellule en silicium monocristallin	26
II.5.2.3 Cellule en silicium poly cristallin	27
II.5.3. Structure d'une cellule photovoltaïque	29
II.5.4. Principe de fonctionnement d'une cellule PV	29

Sommaire

II.6. Association des cellules (le panneau solaire)	30
II.6.1. Groupement en Série	30
II.6.2. Groupement en parallèle	31
II.6.3. Groupement mixte	31
II.7. Rendement maximal d'une cellule PV	32
II.8. Les avantages et Les inconvénients d'une installation PV	32

CHAPITRE III : Modélisation et simulation d'un panneau PV.

Introduction	
III.1. Modélisation d'une cellule photovoltaïque	35
III.1.1. Modèle mathématique	35
III.3. Modélisation d'un panneau photovoltaïque	40
III.3.1. Caractéristique d'un panneau photovoltaïque	40
III.4. Évaluation des facteurs de qualité	41
III.5. Applications industrielles isolées	41
III.5.1. Systèmes isolés pour l'électrification rurale	41
III.6. Générateur photovoltaïque :	41
III.6.1. L'adaptation d'un générateur photovoltaïque à la charge	42
III.7. Les convertisseurs :	42
III.8. Simulation d'un panneau photovoltaïque sous Matlab-Simulink	44
III.8.1. La simulation de chaque bloc sous matlab-simulink	45
III.8.2. Les résultats de simulation sous matlab-simulink	48
III.8.2.1. Influence de la température sur la cellule :	48
III.8.2.2. Influence de l'éclairement sur la cellule :	49
Conclusion	51
Conclusion générale	53

Liste des Figure

Chapitre I :

Figure I.1 : énergie de la biomasse et applications	4
Figure I.2 : production d'électricité par énergie géothermique.	5
Figure I.3 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.	6
Figure I.4 : Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol (m/s)	7
Figure I.5 : Eolienne a axe verticale.	7
Figure I.6 : Eolienne a axe horizontale.	8
Figure I.7 : Répartition mondiale e du rayonnement solaire annuel en KWh/m ² .	9
Figure I.8 : Chauffe-eau solaire individuel CESI	10
Figure I.9 : Centrales à capteurs paraboliques	11
Figure I.10 : Les centrales à collecteurs cylindro-paraboliques	12
Figure I.11 : Transformation de l'énergie solaire à l'aide des cellules photovoltaïque.	12

Chapitre II :

Figure II. 1 : Irradiation globale journalière reçue sur un plan horizontal sur le territoire Algérien au mois de juillet	17
Figure II.2 : Schéma synoptique des installations PV autonomes (hors -réseau) et raccordées au réseau électrique (sur-réseau).	18
Figure II.3 : Montage de 2 panneaux en série	19
Figure II.4 : Les ressources annuelles d'énergie renouvelable disponibles à la surface de la terre	20
Figure II.5 : énergie solaire.	20
Figure II.6 : Spectre du corps noir et solaire à différents angles d'inclinaison par rapport à l'horizon	22
Figure II.7 : conducteurs – semi-conducteurs – isolants	23
Figure II.8 : Expressions du rayonnement direct reçu sur un plan quelconque.	25
Figure II.9 : Silicium amorphe	26
Figure II.10 : Cellules monocristallines	27
Figure II.11 : Photo d'une cellule polycristallin	28
Figure II.12 : Structure de cellule Tandem	28
Figure II.13 : Connexion en série des cellules et sa caractéristique courant tension	30
Figure II.14 : Connexion en parallèle de cellules et sa Caractéristique courante tension.	31
Figure II.15 : la caractéristique résultante obtenue en association mixte	32

Chapitre III

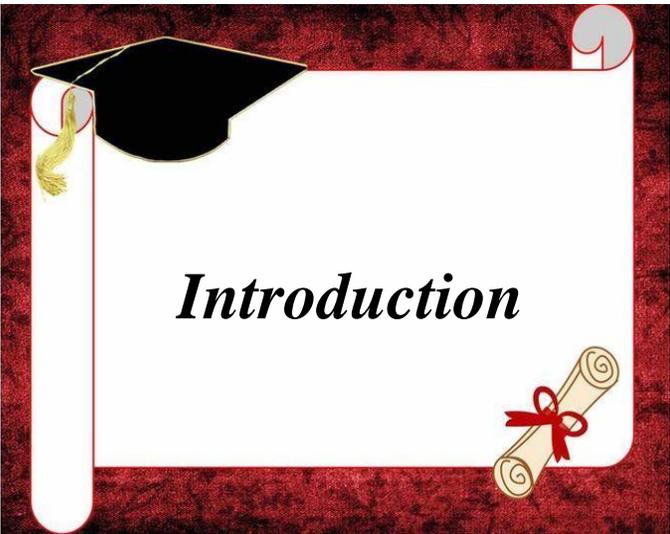
Figure III.1 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque idéal	35
Figure III.2 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle	37
Figure.III.3 : les Caractéristique d'une cellule photovoltaïque réelle	39
Figure.III.4. Les différents types des convertisseurs statiques.	43
Figure.III.5. Système de conversion photovoltaïque	43
Figure III.6 : schéma d'un générateur PV sou MATLAB SIMULINK	45
Figure III.7 : schéma d'un photo-courant	46
Figure III.8 : schéma d'un courant de saturation	46

Liste des Figure

Figure III.9 : schéma d'un courant de saturation inverse	47
Figure III.10 : caractéristique I(V) pour différentes températures ($G=1000\text{W/m}^2$).	48
Figure III.11 : caractéristique P(V) pour différentes températures ($G=1000\text{W/m}^2$).	48
Figure III.12 : Caractéristique I(V) pour différents niveaux d'éclairement ($T=25^\circ\text{C}$).	49
Figure III.13 : Caractéristique P(V) pour différents niveaux d'éclairement ($T=25^\circ\text{C}$)	50

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Avantage et inconvénients du système photovoltaïques	13
Tableau II.1 : Potentiel solaire	17
Tableau III.1 : Caractéristiques électrique d'une photopile (cellule PV).	44
Tableau III.2 : Caractéristiques électrique de la cellule PV dans les condition standards $T = 25\text{ C}^\circ$, $G = 1000\text{ W/m}^2$	45



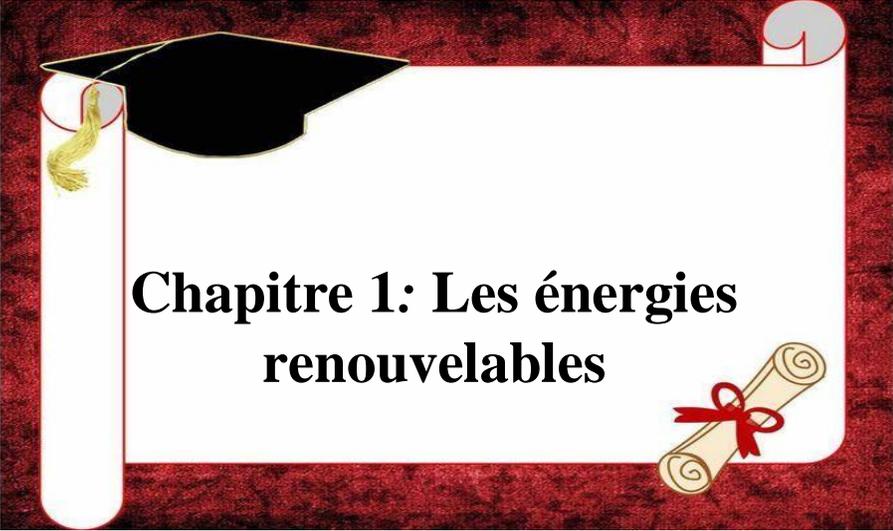
Introduction

L'étude et la simulation d'un générateur photovoltaïque en site isolé consistent à évaluer la performance d'un système de production d'électricité à partir de panneaux solaires dans un contexte où il n'y a pas d'accès au réseau électrique. Dans ce type de configuration, le générateur doit être conçu pour fournir une alimentation électrique fiable et durable pour les besoins des utilisateurs, tels que l'éclairage, la climatisation, la pompe à eau, etc.

L'étude commence généralement par une analyse des besoins énergétiques des utilisateurs, qui permet de déterminer la capacité de production nécessaire du générateur photovoltaïque. Ensuite, il faut évaluer les conditions d'ensoleillement du site, la performance des panneaux solaires, la capacité de stockage de l'énergie produite, ainsi que les pertes éventuelles dans le système de conversion et de distribution de l'énergie.

La simulation permet ensuite de modéliser le comportement du générateur photovoltaïque dans différentes conditions d'utilisation, afin de déterminer les performances énergétiques attendues et d'optimiser la conception du système. Les outils de simulation peuvent prendre en compte des paramètres tels que la température, l'irradiance solaire, l'orientation et l'inclinaison des panneaux solaires, la capacité des batteries, etc.

L'objectif final de l'étude et de la simulation est de concevoir un générateur photovoltaïque fiable et efficace, capable de répondre aux besoins énergétiques des utilisateurs en site isolé, tout en minimisant les coûts d'investissement et d'exploitation du système.



**Chapitre 1: Les énergies
renouvelables**

Introduction :

Les différents usages des énergies renouvelables ne sont clairement pas nouveaux. Depuis des temps immémoriaux, l'être humain a exploité la chaleur du soleil, brûlé du bois et des déchets, exploité l'énergie géothermique dans les régions volcaniques, alimenté des moulins à vent et à eau et exploité la puissance de la marée.

I.1. Définition :

Les énergies renouvelables (ER) utilisent des flux inépuisables d'énergies issues de phénomènes naturels. Les sources d'énergie renouvelables telles que l'éolien, le solaire, la géothermie, l'hydroélectricité et la biomasse fournissent une énergie propre et fiable sans émettre de polluants nocifs ni contribuer au changement climatique.

Les énergies renouvelables offrent une solution prometteuse à la demande mondiale croissante d'électricité et d'autres formes d'énergie, cependant, sous exploitées par rapport à leur potentiel, seuls 15 % de la consommation mondiale d'électricité est couverte par les énergies renouvelables. [1]

I.2. Types d'énergie renouvelable :

Il y a cinq familles principales d'énergies renouvelables. Dans l'ordre d'importance de leur exploitation actuelle, ce sont :

- L'énergie hydraulique (hydroélectricité)
- L'énergie solaire
- L'énergie éolienne
- La géothermie.
- La biomasse (avec le bois de chauffage, ainsi que biogaz...)

I.2.1. L'énergie hydraulique :

L'eau sert de source d'énergie depuis plus de 2 000 ans. L'intérêt, c'est qu'il est une source renouvelable. Cette source d'énergie est impliquée lors du déplacement ou de l'accumulation du fluide et elle se renouvelle sans qu'on n'ait rien à faire. Le déplacement produit par la chute ou le mouvement de l'eau, peut transformer l'énergie directement en énergie mécanique (moulin à eau) grâce aux roues à aubes, tandis que les turbines et les générateurs électriques la transforment en électricité. [2]

Une centrale hydraulique est composée de 3 parties : [site 1]

- Le barrage qui retient l'eau
- La centrale qui produit l'électricité
- Les lignes électriques qui évacuent et transportent l'énergie électrique

I.2.2. Énergie de la biomasse :

Énergie à base de matière organique (végétale ou animale) qui a l'aide de divers moyens se transforme en une source d'énergie (notamment électricité). [3]

L'Énergie biomasse comprend trois familles principales :

- Biogaz ou méthanisation.
- Bois énergie ou biomasse solide.
- Les granulés de bois sont le combustible le plus performant de la gamme (Viessmann).

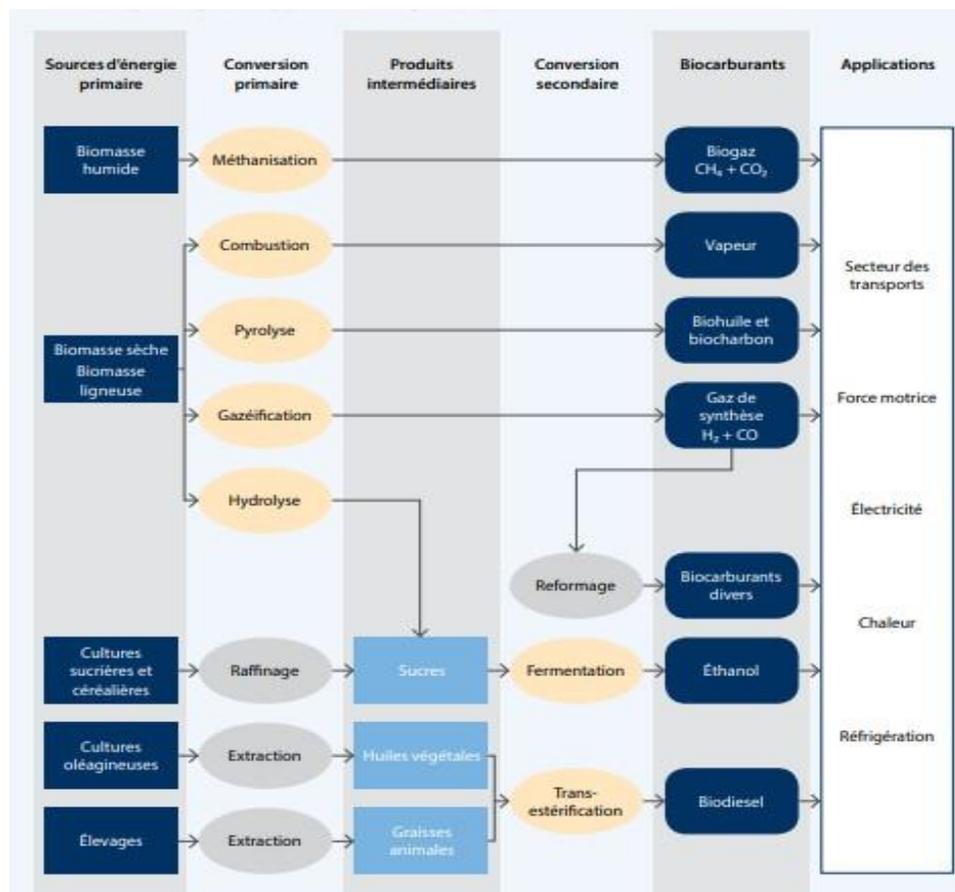


Figure I.1 : énergie de la biomasse et applications

I.2.2.1. Méthanisation : La biométhanisation est un procédé de stabilisation des matières organiques par fermentation en absence d'oxygène. Le biogaz obtenu est composé de méthane et de gaz carbonique, et peut contenir des traces d'autres gaz selon la nature du substrat employé.

I.2.2.2. Biomasse solide : Elle couvre le bois et ses déchets ainsi que les déchets d'origine végétale et animale afin de produire de la chaleur ou de cogénération chaleur / électricité.

I.2.3. Energie géothermique :

Désigne la production de chaleur interne du globe terrestre et dans les couches superficielles de la terre. Ce type d'énergie a l'avantage d'être quasi continu puisqu'il ne dépend pas des conditions atmosphériques. [4] [5]

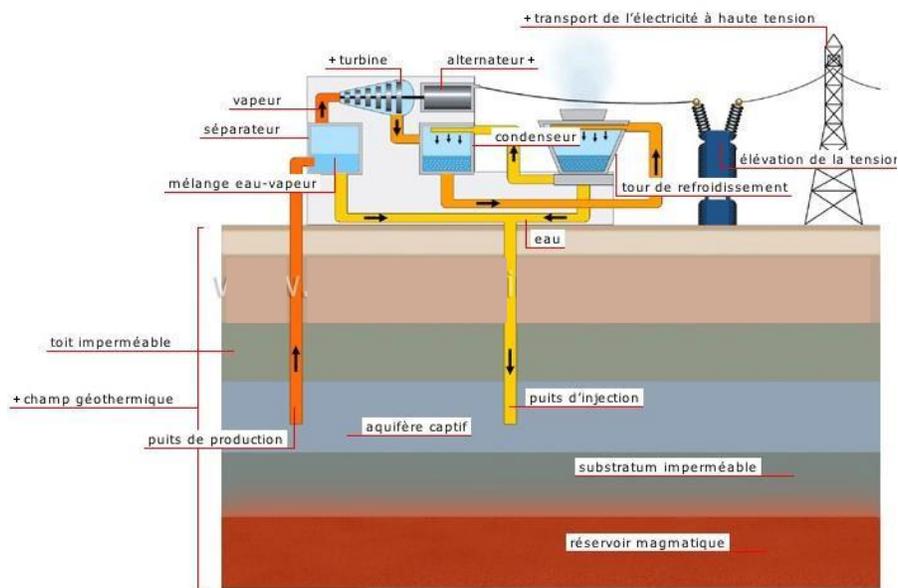


Figure I.2 : production d'électricité par énergie géothermique. [site 2]

Le Nord Algérien possède des calcaires jurassiques constituent d'importants réservoirs géothermiques, donnent naissance à plus de 200 sources. Ces émergences naturelles qui sont généralement les fuites de réservoirs existants, débitent à elles seules plus de $2 \text{ m}^3 / \text{s}$ d'eau chaude. [4]

I.2.4. Energie éolienne :

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent, cette dernière est convertie en énergie mécanique qui est elle-même transformée en énergie électrique par une génératrice électromagnétique solidaire au rotor. Cette énergie ne produit pas de pollution et constitue une forme d'énergie indéfiniment durable. [6]

- Les éoliennes convertissent l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique ou électrique par l'exploitation du mouvement de l'air.
- Le vent tourne les pales de l'hélice qui à leurs tours font tourner l'arbre d'une génératrice produisant de l'électricité.

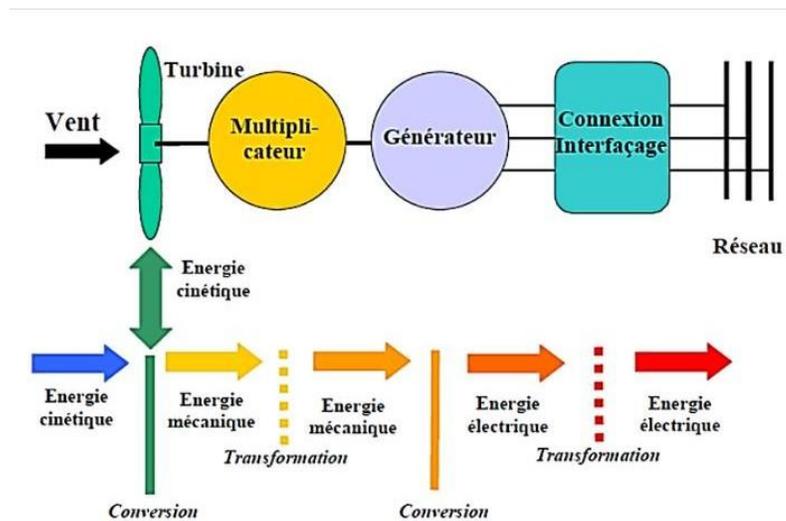


Figure I.3 : Conversion de l'énergie cinétique du vent. [site 3]

L'Algérie possède un régime de vent modéré (2 à 6 m/s). Une vitesse moyenne est peu élevée au Nord. Et un microclimat sur les sites côtiers et sur les hauts plateaux de Tiaret et Kheiter ainsi que dans la région délimitée par Bejaïa au Nord et Biskra au Sud.

Chapitre 1: Les énergies renouvelables

Le Sud est, quant à lui, caractérisé par des vitesses plus élevées que le Nord, une vitesse supérieure à 4 m/s et qui dépassent la valeur de 6 m/s dans la région d'Adrar. [7]

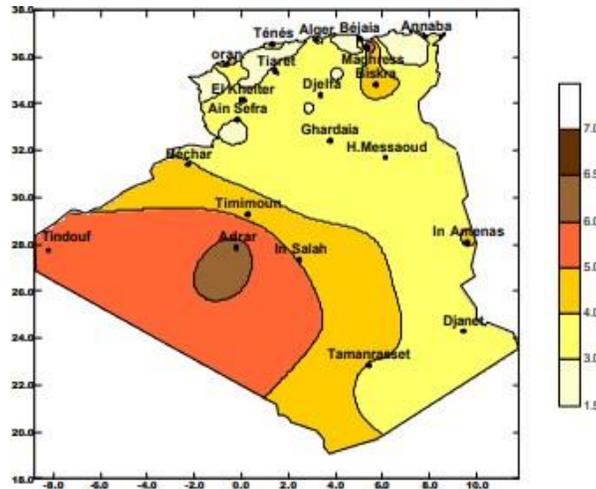


Figure I.4 : Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol (m/s) [8]

Il existe deux principaux types d'éoliennes :

- **Éoliennes à axe vertical** : Il présente les avantages de : ne pas nécessiter de dispositif d'orientation nécessaire, et son couple élevé en sortie d'arbre. La prise au vent élevée de par la surface des pales, les contraintes sur les paliers et l'axe moins importantes par contre son couple au démarrage élevé et le rendement est modeste. [9]



Figure I.5 : Eolienne a axe verticale.[10]

- **Les éoliennes à axe horizontal** : Généralement formées de deux ou trois pales qui tournent de façon aérodynamique. La puissance mécanique du vent fait tourner des

pales reliées directement ou via un multiplicateur de vitesse à un alternateur, ce dernier produit de l'électricité. [11]



Figure I.6: Eolienne a axe horizontale. [10]

1.2.5 L'énergie solaire :

Le soleil représente notre plus grande source d'énergie, Sans aucun doute, elle est la source d'énergie renouvelable la plus abondante. Ce type d'énergie renouvelable est issu directement de la captation du rayonnement solaire.

Les rayons sont recueillis grâce à des capteurs sur des panneaux solaires et est convertie en énergie électrique (solaire photovoltaïque) ou thermique (solaire thermique, comme pour les chauffe-eaux solaires). L'installation de panneaux photovoltaïques peut permettre aux particuliers de subvenir à plus de la moitié de leurs besoins en chauffage (eau et habitation).

Cependant, en raison de sa nature intermittente et de sa faible densité, il est indispensable de pouvoir stocker et concentrer cette énergie solaire sous forme de combustible. [4]

L'Algérie reçoit annuellement sur l'ensemble de son territoire une énergie solaire des plus importantes du monde. Elle s'élève à environ 5,2 millions de milliards de K/W/h/an.[7]

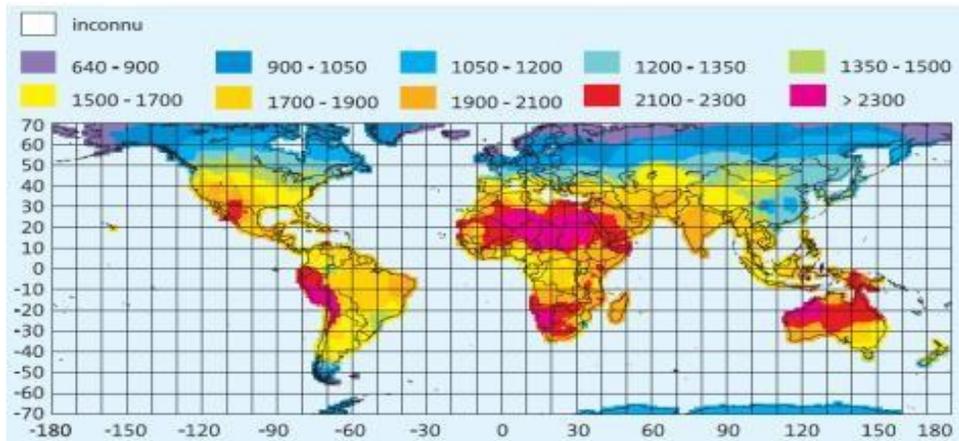


Figure I.7 : Répartition mondiale e du rayonnement solaire annuel en KWh/m².

(Source : ONA, Alger, 2016).

I.2.5.1 Les différents types d'énergie solaire :

Pour pouvoir exploiter l'énergie solaire, il faut la transformer en d'autres formes d'énergies plus utiles : [12]

- En utilisant la chaleur du rayonnement solaire (**énergie thermique**).
- En transformant le rayonnement solaire en électricité grâce à des cellules photovoltaïques (**énergie photovoltaïque**).
- En bénéficiant directement du rayonnement solaire (**énergie passive**).

a) **Energie solaire thermique** : Conversion directe du rayonnement (irradiance) solaire en énergie thermique. La chaleur des rayons solaire est captée est rediffusée, et plus rarement sert à produire de l'électricité. [13]

- Chauffage des locaux
- Chauffage de l'eau sanitaire (500-700 kWh/m², 1 m² /pers., 50-100 litres de stock/m stock/m²)
- Rafraîchissement, climatisation
- Energie électrique
- Séchage ERAD 2011 / Solaire thermique / 23 mai 2011 3
- Dessalement
- Etc.

a.1. Le chauffe-eau solaire (CES) : est composé d'un ou deux capteurs solaires thermiques et d'un ballon de stockage d'eau, produit de l'eau chaude en utilisant comme source d'énergie la lumière du soleil. Le matériel est fiable et a une durée de vie d'au moins 25 ans. Les capteurs solaires thermiques captent l'énergie du rayonnement solaire, absorbée par un fluide caloporteur. Cette énergie est restituée à l'eau qui s'échauffe puis elle est stockée dans le ballon pour vos besoins en eau. Ces capteurs peuvent aussi bien être installés sur des habitations déjà existantes que sur de nouvelles constructions. [14]

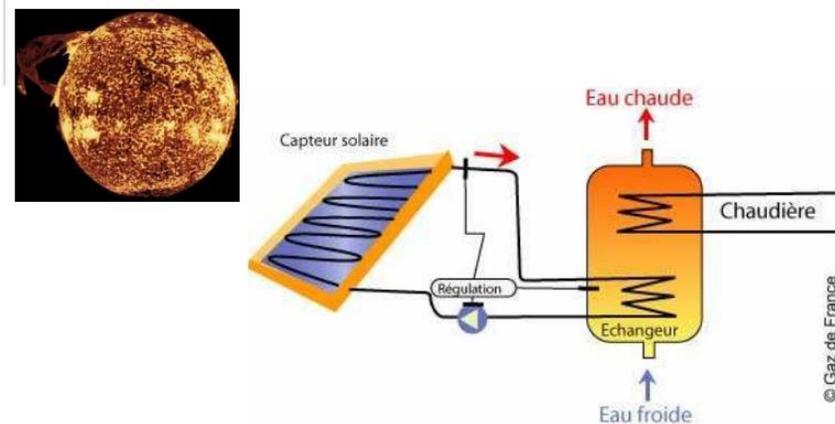


Figure I.8 : Chauffe-eau solaire individuel CESI [15]

a.2. Les capteurs paraboliques : Sont des antennes paraboliques destinées à recevoir et concentrer les ondes électromagnétiques émises par les satellites de communication en un point appelé foyer. Les miroirs paraboliques réfléchissent les rayons du soleil vers un point convergent, et le rayonnement solaire est alors concentré sur le récepteur chauffé.

Le moteur convertit l'énergie solaire thermique en énergie mécanique puis en électricité.

Tout au long de la journée, le bas de la plaque fait automatiquement face au soleil

Les systèmes à réflecteur parabolique peuvent atteindre 1 000 °C au niveau du récepteur et atteindre une efficacité de conversion solaire-électricité optimale en utilisant une petite quantité d'énergie.

L'inconvénient de ce genre de capteur réside dans d'orientation du capteur vers le soleil. Et son gros privilège est l'énorme température que ce capteur atteint.

[16]



Figure I.9 : Centrales à capteurs paraboliques. [17]

a.3. Les centrales à collecteurs cylindro-paraboliques : Ce type de centrale se compose de rangées parallèles de longs miroirs cylindro-paraboliques qui tournent autour d'un axe horizontal pour suivre la course du soleil. Les rayons solaires sont concentrés sur un tube récepteur horizontal, dans lequel circule un fluide caloporteur dont la température atteint en général 400°C. Ce fluide est ensuite pompé à travers des échangeurs afin de produire de la vapeur surchauffée qui actionne une turbine ou un générateur électrique.



Figure I.10 : Les centrales à collecteurs cylindro-paraboliques. [18]

- b) **Solaire photovoltaïque** : l'énergie solaire est convertie directement les rayonnements solaires en énergie électrique via les cellules photovoltaïque.

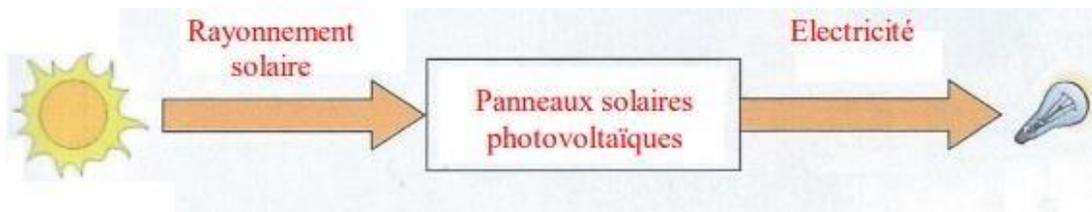


Figure I.11 : Transformation de l'énergie solaire à l'aide des cellules photovoltaïque.

[site4]

Chapitre 1: Les énergies renouvelables

❖ Les avantages Les inconvénients de l'installation de panneaux photovoltaïques : [site 5]

Tableau I.1 : Avantage et inconvénients du système photovoltaïques

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none">• Énergie propre, non polluante grâce à ces composants recyclables/ réutilisables on réduit l'empreinte carbone.• Autonomie face aux fournisseurs d'électricité, et ainsi réaliser des économies considérables sur votre facture.• Pas de combustion• L'avantage majeur de cette solution est le choix que vous aurez de disposer de votre électricité comme bon vous semble selon vos besoins.	<ul style="list-style-type: none">• Le coût d'investissement est relativement élevé.• Le principal inconvénient étant que la production d'énergie photovoltaïque peut être périodiquement insuffisante pour alimenter un foyer :<ul style="list-style-type: none">▪ Besoin d'approvisionner en électricité pour combler vos besoins.▪ Les PV produisent moins d'électricité en hiver et inexistante dans la nuit.

Conclusion :

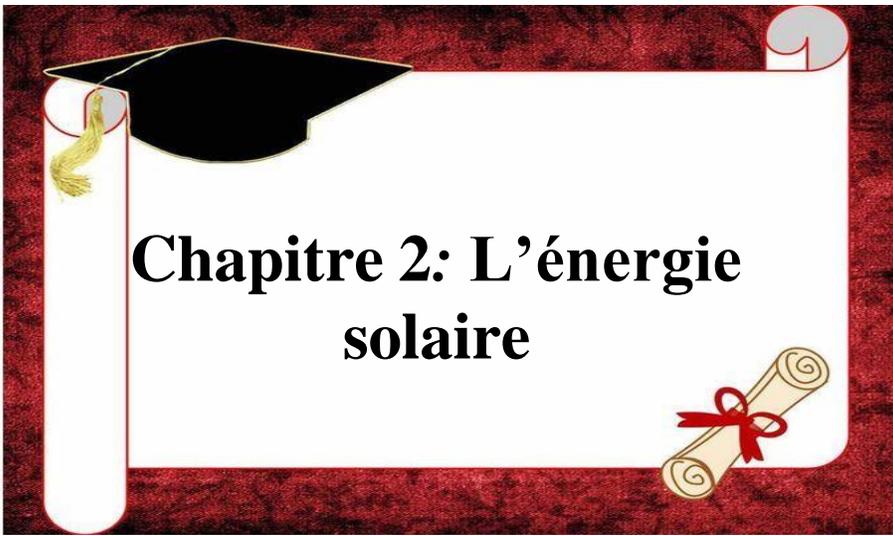
Les énergies renouvelables représentent une grande partie de notre avenir énergétique. Elles permettent le développement futur et sont une solution de nos problèmes énergétiques et environnementaux.

Les énergies renouvelables deviennent rapidement l'une des sources d'énergie les plus importantes au monde

Cependant, les énergies renouvelables nous proposent de multiples façons de produire de l'énergie. Elles donnent aussi plusieurs :

- **Avantages :**
 - Plusieurs sources renouvelables en même temps,
 - Indépendance énergétique.
 - Décentralisation qui privilégie des petites unités de production locales.

- Facilité d'installer.
 - Combinaison de plusieurs sources en même temps.
 - Energie non polluante.
 - L'investissement et le rendement sont prévisibles à long terme.
 - Il ne faut oublier que Les énergies renouvelables comportent plusieurs.
-
- **Inconvénients :**
 - Investissement important.
 - Consommation limitée.
 - Dépendre des facteurs naturels (soleil ...).
 - Installation doit s'intégrer dans l'environnement.
 - Stockage limité.



Chapitre 2: L'énergie solaire

Introduction :

Pour maintenir les réserves énergétiques actuelles de l'Algérie, les pouvoirs publics ont fait le choix de développer et d'utiliser les énergies alternatives, notamment l'énergie solaire, éolienne et nucléaire « Le développement de ces énergies permettra d'économiser du gaz pour l'exportation et la pétrochimie. Par conséquent, la promotion et le développement des énergies alternatives est un besoin impératif, et le développement des énergies alternatives contribuera également à protéger l'environnement et à lutter contre le chômage : « Le solaire et l'éolien sont moins polluants. L'investissement dans ce secteur crée des emplois et évite l'utilisation de combustibles fossiles tels que le gaz, l'essence et le GPL. Qui peuvent être exporté ou utilisé pour générer une activité industrielle.

II.2. Potentiel solaire en Algérie :

La capacité solaire de l'Algérie est estimée comme l'une des plus important dans la Méditerranée et la production de cette source pourra contribuer à économiser le pétrole et le gaz En effet Algérie possède l'une des plus grandes réserves solaires au monde. Les heures d'ensoleillement sur la majeure partie du pays dépassent 2000 heures par an. L'énergie absorbée quotidiennement dans une surface horizontale de 1 m² est d'environ 5 kWh pour la majeure partie du pays. Cela représente près de 1700 kWh/m²/an dans le nord du pays et 2263 kWh/m²/an dans le sud. Le tableau 2.2 résume le potentiel solaire de l'Algérie. Une analyse satellite menée par l'agence spatiale allemande montre que l'Algérie possède le plus grand potentiel solaire de tout le bassin méditerranéen. La chaleur solaire est de 169 440 térawattheures/an (TWh/an), soit 713,9 TWh/an pour le photovoltaïque. [19]

Chapitre 2: L'énergie solaire.

Tableau II.1 : Potentiel solaire

Régions	Région côtière	Hauts Plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (Kwh/m ² /an)	1700	1900	2650
Régions	Région côtière	Hauts Plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (Kwh/m ² /an)	1700	1900	2650

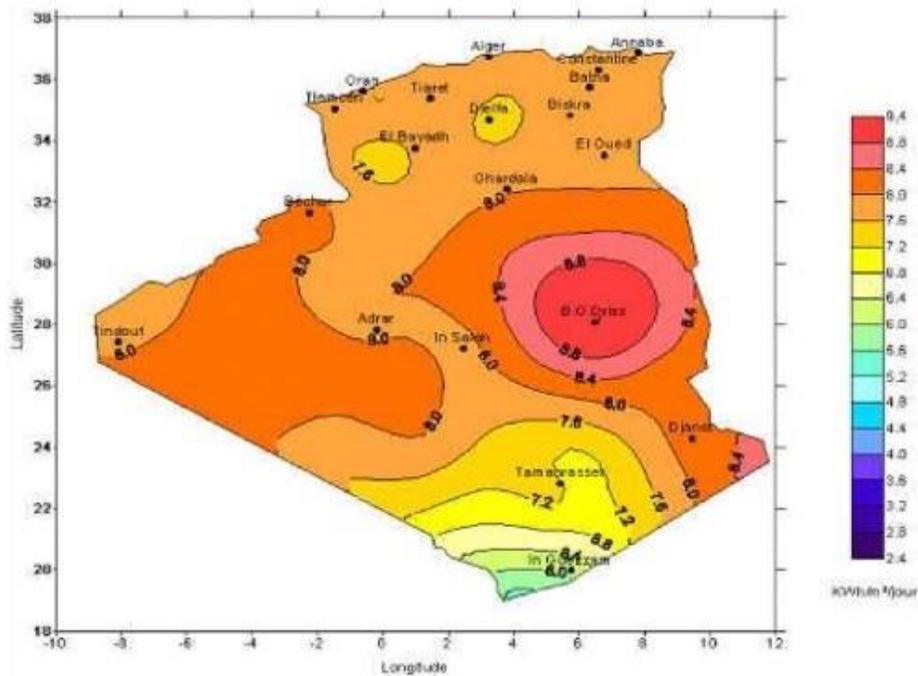


Figure II. 1 : Irradiation globale journalière reçue sur un plan horizontal sur le territoire Algérien au mois de juillet

II.3. Bilan des réalisations :

Les systèmes photovoltaïques (PV), qui agissent comme des dispositifs qui convertissent l'énergie solaire en énergie électrique, sont soit connectés au réseau (sur réseau), soit autonomes (hors réseau) (fig. II.2). [20]

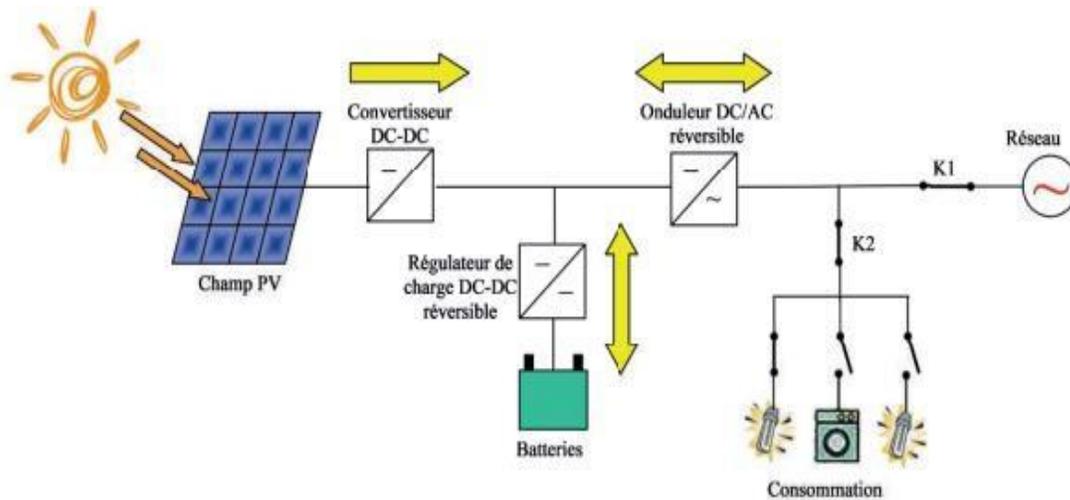


Figure II.2 : Schéma synoptique des installations PV autonomes (hors -réseau) et raccordées au réseau électrique (sur-réseau).

Les panneaux sont connectés en série ou en parallèle ou une combinaison des deux. En assemblant des panneaux photovoltaïques en série, la tension des panneaux peut être appliquée tout en conservant la même intensité de courant. Connectez le pôle positif d'une plaque au pôle négatif de l'autre avec le même ampérage. Lorsque deux panneaux avec des ampérages différents sont connectés, ils sont tous appariés à l'ampérage le plus bas (fig.II.3). Une installation photovoltaïque connectée à un réseau d'électricité se compose généralement de plusieurs panneaux photovoltaïques, leur nombre pouvant varier d'une dizaine à plusieurs milliers. [site 5]

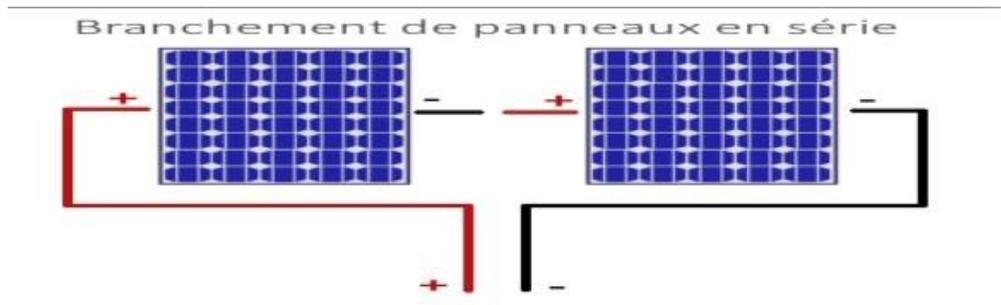


Figure II.3 : Montage de 2 panneaux en série

Le gouvernement algérien a adopté un programme de développement des énergies renouvelables pour la période 2015-2030. La première phase du programme, lancée en 2011, a permis la mise en œuvre de projets pilotes et d'études de faisabilité nationale. Le nouveau programme fixe un objectif d'installations d'ici 2030.

- 13 575 MWc de solaire photovoltaïque,
- 2 000 MW de solaire thermodynamique (CSP),

La réalisation du programme est ouverte aux investissements publics et privés, nationaux comme étrangers. Des tarifs d'achat garantis sur 20 ans ont été mis en place pour les filières photovoltaïque et éolienne. [21]

II.4. L'énergie solaire :

La Terre est constamment exposée à un rayonnement solaire qui fluctue sur de grands cycles annuels. En moyenne par an, la Terre intercepte et peut isoler environ 1600×10^{15} kWh (selon des recherches établies dans le monde).

- ✓ Environ 30 % sont directement réfléchis par les couches supérieures de l'atmosphère terrestre et projetés dans l'espace.
- ✓ 45 % sont convertis en chaleur et rayonnés dans l'espace sous forme de rayonnement infrarouge.
- ✓ 25% de modifications de la surface et de l'atmosphère, provoquant des phénomènes océaniques et éoliens.
- ✓ 0,06% d'utilisation par photosynthèse.

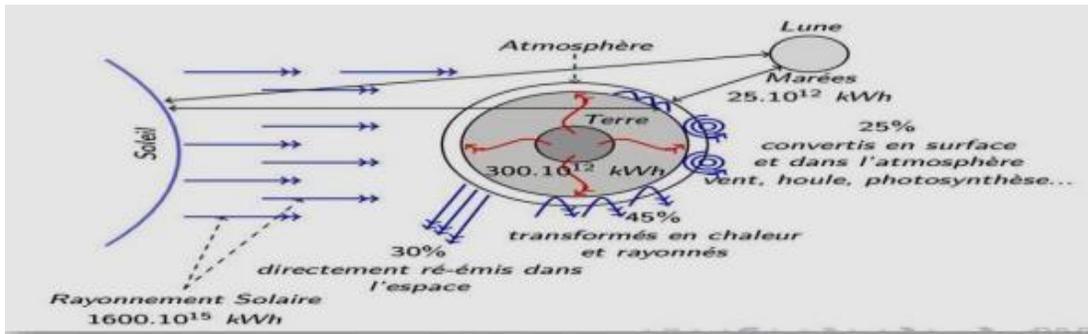


Figure II.4 : Les ressources annuelles d'énergie renouvelable disponibles à la surface de la terre.

Malgré la distance qui existe entre la Terre et le Soleil (plus de 150 millions de kilomètres), cette dernière demeure notre plus grande source d'énergie. Se divise en deux grandes parties : l'énergie solaire thermique et l'énergie solaire photovoltaïque. [22]

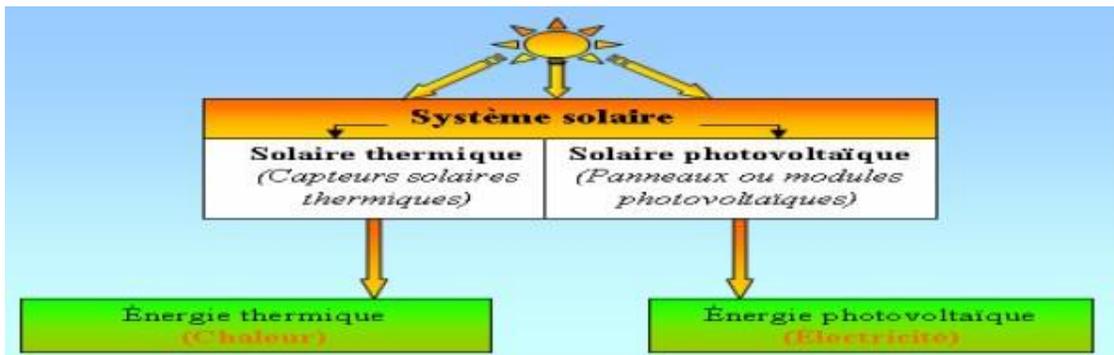


Figure II.5 : énergie solaire.

II.4.1 Le spectre Solaire :

Avec un rayon RS de 696 000 km, une masse de $1,99 \times 10^{30}$ kg et une température interne de plus de 10 millions de degrés, le soleil peut convertir environ 6 millions de tonnes de masse en énergie rayonnante par seconde grâce aux réactions de fusion nucléaire dans l'espace. Une première approximation est que le Soleil rayonne vers la Terre entière comme un corps noir avec une température de $T_S = 5800^\circ\text{K}$. Cela correspond à $3,85 \times 10^{23}$ kW de puissance totale émise par le soleil.

La hauteur du soleil est une donnée fondamentale pour au moins deux raisons :

✓ Cette hauteur intervient explicitement dans les calculs d'apport énergétique.

✓ L'implantation dans un site donné demande une étude des ombres portées par l'environnement bâti ou naturel.

Grace aux satellites nous pouvons maintenant mesurer avec précision le spectre réel du Soleil en dehors de l'atmosphère terrestre. Ceci est légèrement différent du spectre théorique du corps noir à 5800 K. La distribution spectrale MS (λ) du rayonnement électromagnétique d'un corps noir est donnée par la loi de Planck.

$$M\lambda = A\lambda^{-5} \exp\left(\frac{B}{\lambda T} - 1\right)$$

II.1

Avec : $A=3.75 \times 10^{-10} \text{ w.m}^{-2}.\mu\text{m}^{-1}$

$$B=14.39 \times 10^{-3} \text{ m.k}$$

$\lambda(\mu\text{m})$: longueur d'onde

La figure suivante représente le spectre du corps noir à 5 800 °K (courbe a) et le spectre réel de l'atmosphère solaire extérieure à différents angles d'inclinaison par rapport à l'horizon (courbes b et c). Ces spectres montrent que la longueur d'onde du rayonnement solaire est comprise entre 0,2 μm (ultraviolet) et 16 μm (infrarouge). 97,5% de l'énergie se situe dans la gamme de longueur d'onde inférieure à 2,5 μm , en particulier dans la gamme visible : [23]

✓ Spectre du corps noir : C'est un corps idéal qui absorbe parfaitement la lumière et émet complètement le rayonnement thermique.

✓ Spectre AM0 : =90°

✓ Spectre AM2 : =30°

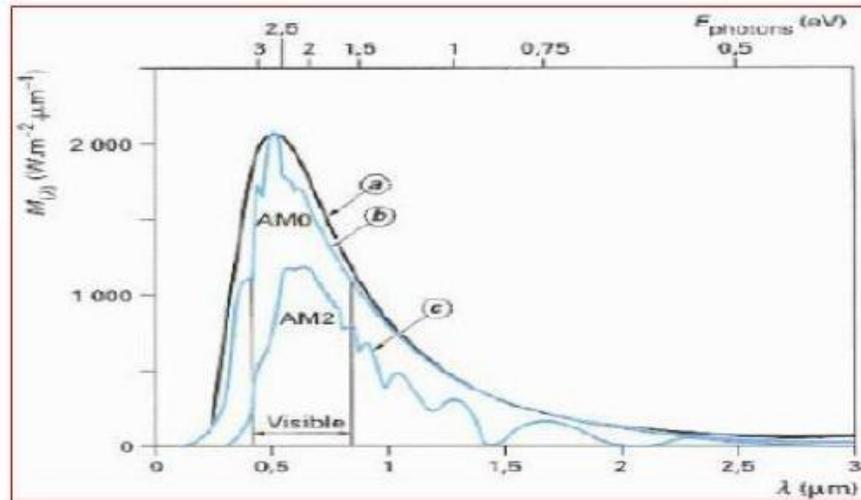


Figure II.6 : Spectre du corps noir et solaire à différents angles d'inclinaison par rapport à l'horizon.

II.4.2. Absorption du rayonnement solaire par un semi-conducteur :

Un matériau semi-conducteur est un matériau isolant qui nécessite un apport externe d'énergie pour que les électrons traversent la bande interdite (appelée gap) et passent de la bande de valence à la bande de conduction pour devenir conducteur.

Cette contribution énergétique est apportée par des photons dont l'énergie doit être supérieure ou égale à celle de la bande interdite E_{Gap} . Cette propriété est au cœur du principe de fonctionnement des capteurs photovoltaïques.

Cette différence d'énergie entre les bandes de valence et de conduction s'appelle la bande interdite ($E_{gap} = E_2 - E_1$). La tension de sortie du générateur est donnée par : E_{gap} / q , où q est la charge de l'électron. [24] [26]

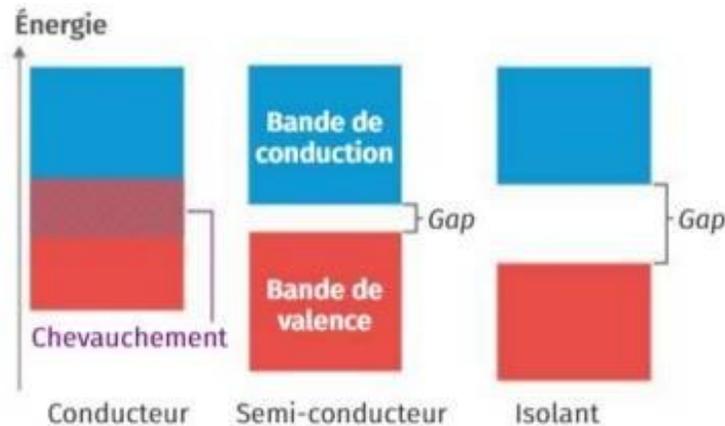


Figure II.7 : conducteurs – semi-conducteurs – isolants

L'interaction entre les photons et les semi-conducteurs se traduit par le coefficient d'absorption, une propriété matérielle importante dans le domaine photovoltaïque. Il convertit le nombre de photons absorbés par unité d'épaisseur du matériau en fonction de la longueur d'onde.

Les longueurs d'onde inférieures à 365 nm, la plupart des photons incidents sont absorbés et ces transitions directes ne sont pas possibles à des longueurs d'onde plus longues. Dans ce cas, au moins un phonon doit aider l'électron dans la bande de conduction, ce qui réduit la probabilité de transition.

L'augmentation de la longueur d'onde des photons entraîne donc une diminution du coefficient d'absorption. Lorsque l'énergie du photon devient inférieure à celle du gap du matériau (à l'énergie d'un phonon près), la transition n'est plus possible et le photon n'est pas absorbé.

L'interaction photon/électron au sein du semi-conducteur se traduit finalement par la génération d'une paire électron-trou, qui modifie localement la conductivité du matériau. [26]

II.4.3. L'angle d'inclinaison :

Les performances des panneaux solaires dépendent de plusieurs facteurs, dont l'angle d'incidence des rayons du soleil. L'idéal, serait que l'angle formé par ces rayons avec le plan du panneau solaire, soit toujours de 90°. Ce n'est malheureusement pas le cas, puisque ce dernier varie tout au long de la journée.

Il augmente progressivement du lever du soleil à midi puis diminue à nouveau jusqu'au coucher du soleil. Après cela, il atteint rarement 90°.

Si i est l'angle d'inclinaison de la normale du plan de mesure avec la verticale du lieu, h la hauteur du soleil, a l'azimut et α l'angle d'incidence du rayon direct avec la normale au plan de mesure, on aura pour la composante directe I_i du rayonnement frappant le capteur :
[27]

✓ Soleil à midi (azimut nul) : $a = 0$

- Pour un plan horizontal :

$$\mathbf{i} = \mathbf{0} \text{ et } \mathbf{I}_i = \mathbf{I} \cdot \sin h$$

- Pour un plan incliné sur l'horizontale, et orienté Sud :

$$\alpha = 90^\circ - (h+i) \text{ et } \mathbf{I}_i = \mathbf{I} \cdot \cos \alpha = \mathbf{I} \cdot \sin (h+i)$$

✓ Azimut quelconque :

- Pour un plan vertical orienté Sud :

$$\mathbf{i}=90^\circ \text{ et } \mathbf{I}_i = \mathbf{I} \cdot \cos h \cdot \cos a$$

- Pour un plan incliné sur l'horizontale et orienté Sud :

I_i est la résultante de deux composantes projetées sur la normale au plan du capteur :

- L'une perpendiculaire à l'horizon : $I \cdot \sin h$,
- L'autre dans le plan de l'horizon, pointant vers le sud :

$$\mathbf{I} \cdot \cosh \cdot \cos a$$

La somme des projections donne :

$$\mathbf{I}_i = \mathbf{I} (\sin h \cdot \cos i + \cos h \cdot \cos a \cdot \sin i)$$

- Pour un plan vertical d'orientation quelconque dont la normale fait un angle γ avec le plan méridien :

$$\mathbf{I}_i=90^\circ \text{ et } \mathbf{I}_i = \mathbf{I} \cdot \cosh \cdot \cos (\gamma-a)$$

- Pour un plan d'inclinaison quelconque i et d'orientation quelconque γ :

$$I_i = I \cos \beta = I (\sin h \cdot \cos i + \cos h \cdot \cos (\gamma - a) \cdot \sin i)$$

Ainsi, la formule la plus générale donnant l'angle d'incidence β du rayonnement solaire direct tombant sur un vitrage d'inclinaison i et d'orientation γ est :

$$\beta = \text{Arc cos} (\sin h \cdot \cos i + \cos h \cdot \cos (\gamma - a) \cdot \sin i)$$

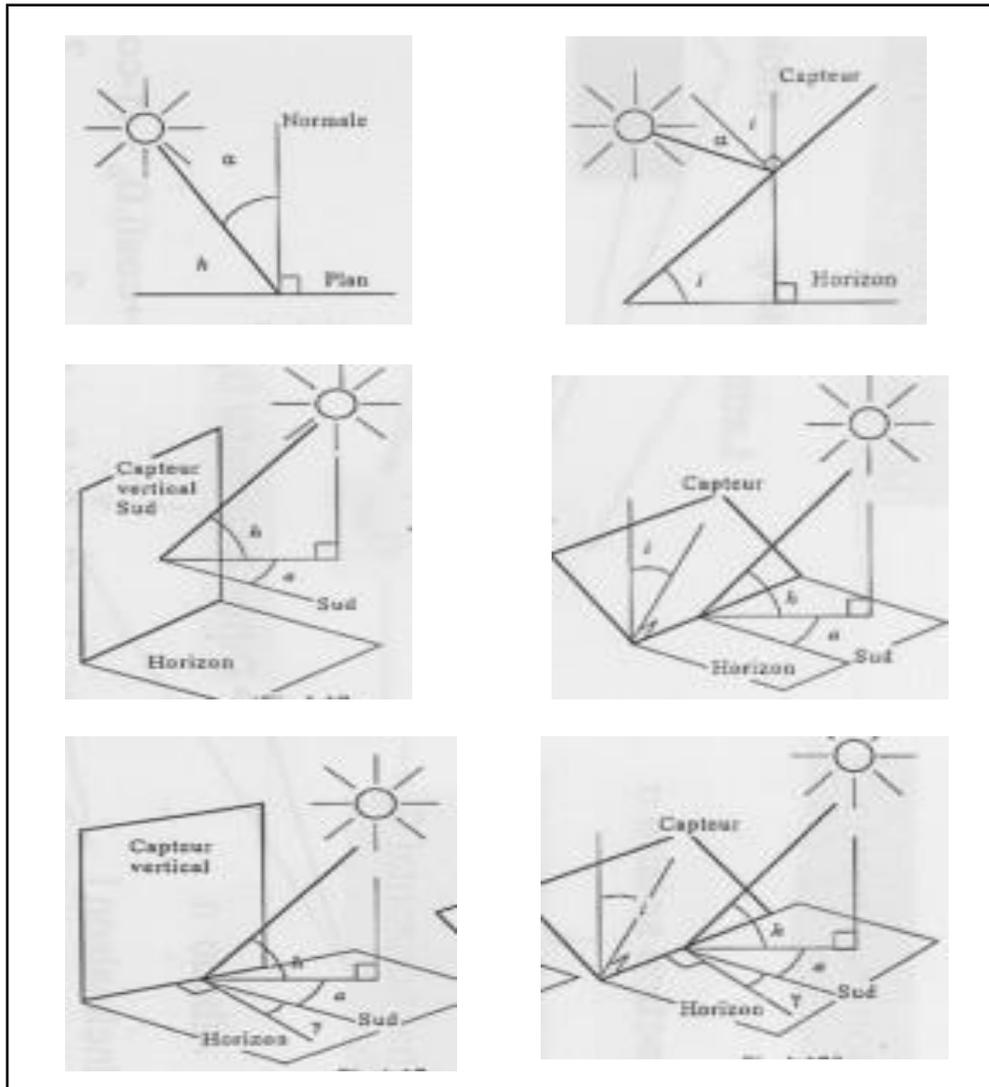


Figure II.8 : Expressions du rayonnement direct reçu sur un plan quelconque : a) repérage des angles par rapport à la normale au plan horizontal ; b) capteurs inclinés d'un angle i sur l'horizon ; c) plan vertical orienté Sud et azimuth a quelconque ; d) Plan incliné sur l'horizontale et orienté Sud ; e) Plan vertical d'orientation quelconque ; f) Plan d'orientation et d'inclinaison quelconque. [27]

II.5. La cellule photovoltaïque :

II.5.1. Définition :

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique d'une épaisseur de 0,2 à 0,3 mm et d'environ 10 cm de côté. Elle est constituée de cinq couches différentes : une couche antireflet 1, deux couches conductrices (une cathode en treillis 2 et une anode compacte 5), et deux couches de silicium dopé n 3 et dopé p 4. [28]

✓ La couche supérieure de silicium 3 exposée au soleil est dopée à 5 électrons périphériques, soit un atome de phosphore de plus que d'atomes de silicium.

✓ La couche inférieure de silicium 4 est dopée avec des atomes de bore qui possèdent trois électrons périphériques, soit un électron de moins que les atomes de silicium.

II.5.2. Différent types de cellules :

Il existe trois types principaux de cellules :

II.5.2.1. Cellules en silicium amorphe :

Les cellules amorphes sont utilisées lorsqu'une solution économique est souhaitée ou lorsque très peu d'énergie est nécessaire, comme l'alimentation d'horloges, de calculatrices ou d'éclairages de secours.

Ils se caractérisent par un coefficient d'absorption élevé qui permet des épaisseurs très fines de l'ordre du micromètre. En revanche, son efficacité de conversion est de 8 à 10 % (environ 13 % en laboratoire pour les cellules non dégradées). [29]



Figure II.9 : Silicium amorphe

II.5.2.2. Cellule en silicium monocristallin :

Une cellule en silicium monocristallin est constituée d'un monocristal. Il a un aspect uniforme bleu-gris ou noir.

On le reconnaît au fait que si les grains sont suffisamment épais, ils forment une mosaïque de macles.

La cellule monocristalline est la plus proche du modèle théorique :

La cellule est en fait un monocristal divisé en deux couches avec des dopages opposés. Un rendement élevé d'environ $25,0 \pm 0,5$ % est obtenu avec une cellule monocristalline. Cependant, ces cellules présentent les inconvénients suivants :

- ✓ Extrêmement coûteux en raison du processus de fabrication élaboré et difficile.
- ✓ Beaucoup d'énergie est nécessaire pour obtenir un cristal pur. Longue période de récupération des investissements énergétiques (jusqu'à 7 ans). [30]



Figure II.10 : Cellules monocristallines

II.5.2.3. Cellule en silicium poly cristallin :

Il est constitué d'un agglomérat de cristaux de tailles et de formes variées, Le silicium polycristallin est la technologie la plus répandue sur le marché mondial vu son bon rendement (environ 15 %) et de sa garantie (jusqu'à 20 ans), Il offre actuellement un bon rapport qualité/prix. [31][32]

L'efficacité de conversion PV pour une cellule à base de silicium polycristallin s'étend de 11 – 13 % (autour de 18 % en laboratoire)

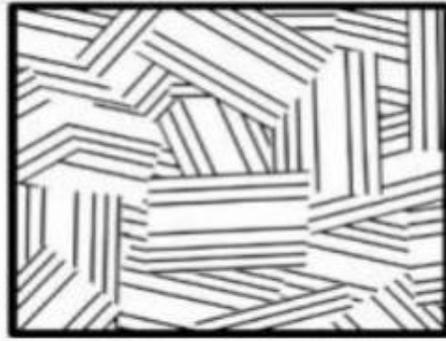


Figure II.11 : Photo d'une cellule polycristallin

Afin d'augmenter l'efficacité des cellules photovoltaïques (PV) au-dessus de 30 %, les chercheurs ont combiné des cellules solaires en silicium avec un autre semi-conducteur ayant une bande interdite plus large. Cela forme une cellule PV dite tandem.

La technologie tandem comporte deux voies : une voie tandem monolithique à deux bornes (2TT) qui relie électriquement et optiquement les sous-cellules supérieure et inférieure, et une autre voie à quatre contacts (4TT) dans lequel les deux sous-cellules sont électriquement indépendantes.

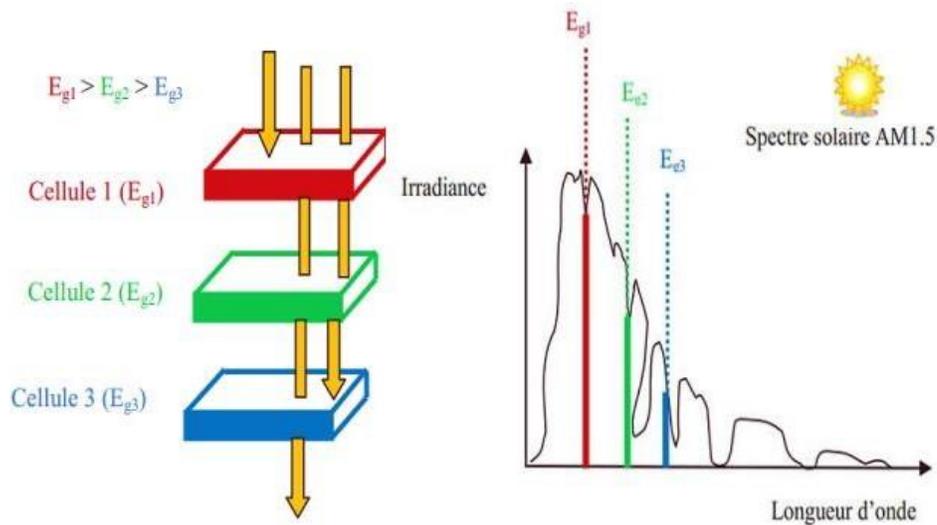


Figure II.12 : Structure de cellule Tandem

II.5.3. Structure d'une cellule photovoltaïque :

Une structure photovoltaïque est basée sur les propriétés d'un matériau spécifique, qui change sa conductivité sous une photo excitation spécifique, en fonction du matériau.

En effet, dans les solides cristallins, les niveaux d'énergie de tous les atomes se combinent pour former des bandes d'énergie. Dans les semi-conducteurs, deux bandes d'énergie séparées par une bande interdite d'énergie EG (de l'ordre de quelques électronvolts) sont responsables de leurs propriétés conductrices : [33]

La bande de valence est remplie d'électrons et la bande de conduction est complètement vide à 0K. Un électron contenu dans la bande de valence peut entrer dans la bande de conduction à condition qu'il absorbe l'énergie $h\nu$ des photons formant la lumière incidente et que l'énergie absorbée soit égale ou supérieure à l'énergie de bande interdite EG. Dans ce cas le matériau devient conducteur et sa conductivité est proportionnelle au nombre d'électrons présents dans la bande de conduction.

Afin de réaliser une structure photovoltaïque, on fait croître par des procédés d'épitaxie deux types de semi-conducteurs issus du même matériau, L'un est dopé avec des électrons et l'autre avec des trous. Ce processus crée ce qu'on appelle une jonction PN ou photodiode. Ainsi la diffusion de porteurs pour équilibrer le potentiel électrique engendre un fort champ électrique interne à l'interface des deux types de semi-conducteurs, on appelle cette région la zone de déplétion. Quand on illumine la photodiode, les électrons et les trous engendrés dérivent dans le champ électrique de la zone de déplétion en sens opposé, une différence de potentiel se crée ainsi entre la face avant et la face arrière de la structure photovoltaïque.

II.5.4. Principe de fonctionnement d'une cellule PV :

Les cellules photovoltaïques, également appelées cellules solaires, sont les éléments de base de la conversion photovoltaïque. Un dispositif semi-conducteur qui convertit l'énergie lumineuse du soleil (source d'énergie inépuisable), en énergie électrique. Il tire parti des propriétés des matériaux semi-conducteurs utilisés dans l'industrie électronique, tels que les diodes, les transistors et les circuits intégrés. p1. [34]

L'effet photovoltaïque se produit lorsque des photons sont absorbés dans un matériau composé de semi-conducteurs dopés p (positif) et n (négatif) appelés jonctions p-n (ou n-p).

Sous l'influence de ce dopage, un champ électrique existe en permanence au sein du matériau (tout comme un aimant possède un champ magnétique permanent).

Lorsqu'un photon incident (particule lumineuse) interagit avec un électron dans un matériau, il cède son énergie $h\nu$ à l'électron. Les électrons sont libérés de la bande de valence et exposés au champ électrique inhérent. L'action de ce champ électrique amène les électrons à se déplacer vers la surface supérieure, évitant les trous se déplaçant dans la direction opposée. Les électrodes placées au-dessus et au-dessous permettent aux électrons de collecter et d'effectuer un travail électrique et d'atteindre les trous à l'avant.

II.6. Association des cellules (le panneau solaire) :

II.6.1. Groupement en Série :

Une connexion en série de n -S cellules solaires permet d'atteindre la tension souhaitée et ainsi accroître la puissance de l'ensemble. Selon le nombre de cellules connectées en série la tension augmente proportionnellement mais le courant de branche reste identique. Les cellules du même courant sont rangées et placées en série. Un faible courant dans l'une des cellules force ce courant dans les autres cellules. Cette technique est appelée appariement de flux. [35]

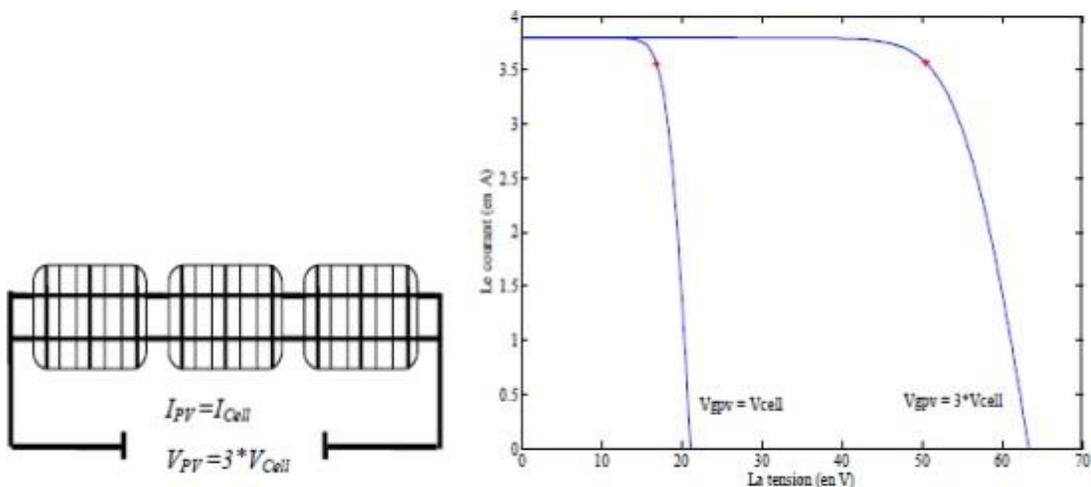


Figure II.13 : Connexion en série des cellules et sa caractéristique courant tension. [36]

Remarque :

Selon la figure on peut remarquer :

- N_s : nombre de cellule en série.
- Connexion série de trois cellules individuelles ;
- Le courant de générateur PV est équivalent au courant d'une cellule unique ;
- Tension de sortie a augmenté (addition des tensions de toutes les cellules).

II.6.2. Groupement en parallèle :

La connexion en parallèle de N_p -cellules permet d'augmentant le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupe de cellules similaires connectées en parallèle, les cellules sont chargées avec la même tension et la caractéristique résultant à partir du groupe est obtenue à partir de la sommation des courants. [37]

Remarque :

N_p : nombre de cellule en parallèle.

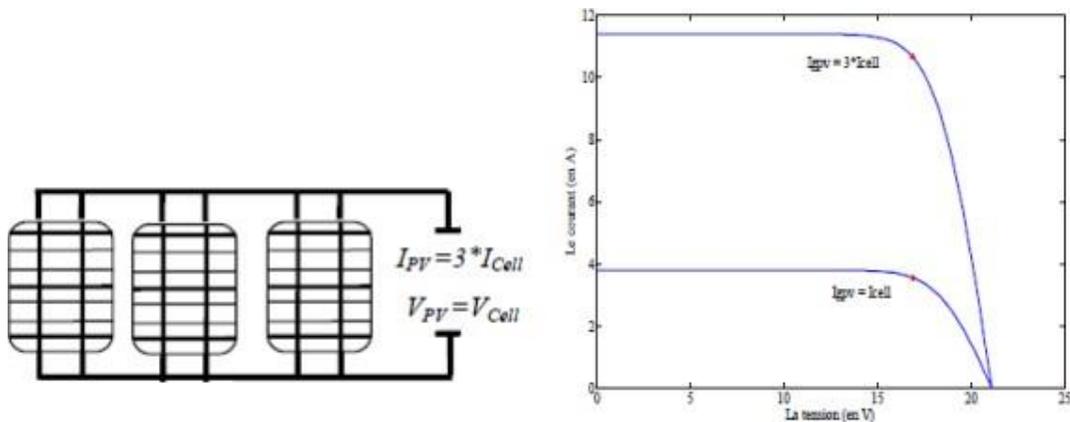


Figure II.14 : Connexion en parallèle de cellules et sa Caractéristique courante tension.

[36]

II.6.3. Groupement mixte :

Selon le montage de ce type de ces cellules (en série et en parallèle), les valeurs du courant total de de court-circuit et de la tension totale à vide sont données par les relations suivantes : [38]

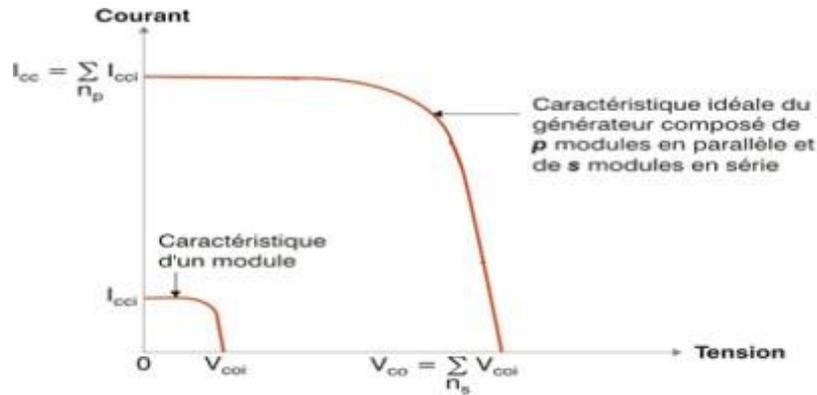


Figure II.15 : la caractéristique résultante obtenue en association mixte.

II.7. Rendement maximal d'une cellule PV :

Le rendement de cellule ou le rendement de conversion en puissance est le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente, le rendement permet d'évaluer les performances de la cellule : [36]

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{FF \cdot I_{cc} \cdot V_{co}}{P_{in}}$$

Tels que :

P_{max} : Puissance maximal.

P_{in} : Puissance du rayonnement solaire incident.

FF : Facteur de forme.

I_{cc} : Courant de court-circuit.

V_{co} : Tension de circuit ouvert.

II.8. Les avantages et Les inconvénients d'une installation PV :

Parmi les avantages qu'offre l'énergie photovoltaïque, on peut citer : [39]

- Une énergie produite propre, renouvelable et fiable.
- Considérer comme une énergie attractive à cause de leurs petites tailles et leurs fonctionnement silencieux.
- Son illimitation et sa disponibilité.

Chapitre 2: L'énergie solaire.

Le matériel utiliser est résistant et peut durer jusqu'au plus de 25 ans. Parmi leurs inconvénients, on peut citer :

- Couts élevés.
- Rendement faible.



**Chapitre 3 :
Modélisation et
simulation d'un panneau
PV**

Introduction :

Lorsque la jonction PN s'allume, elle peut agir comme un générateur. Dans ce chapitre, nous allons construire un modèle mathématique d'un panneau photovoltaïque, qui nous permettra de suivre les caractéristiques courant-tension de sortie.

III.1. Modélisation d'une cellule photovoltaïque :

III.1.1. Modèle mathématique :

➤ Cellule idéale :

Le schéma équivalent le plus simple de la cellule photovoltaïque à jonction PN idéale comprend une source de courant I_{ph} , qui modélise le courant photoélectrique, associée à une diode en parallèle qui modélise la jonction PN dont la polarisation détermine la tension (figure III.1). [40]

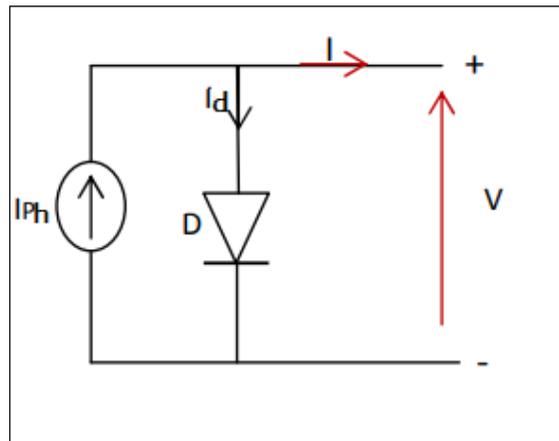


Figure.III.1 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque idéal.

L'équation caractéristique de la cellule idéale est donnée par l'équations : [41]

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

Avec :

I : courant fourni par la cellule (A).

v : tension fourni par la cellule (V).

I_{ph} : photo courant créé par la cellule.

I_d : le courant circulant dans la diode (jonction PN).

$$I_d = I_s \left[\exp \frac{v}{aV_t} - 1 \right] \quad (2)$$

Avec :

$$V_t = \frac{KT}{q} \quad (3)$$

Remplaçons dans l'équation (1) les équations (2) et (3), l'équation du courant délivré par une cellule photovoltaïque deviendra :

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp \frac{qv}{aKT} - 1 \right] \quad (4)$$

Avec :

I_s : courant de saturation (A).

k : la constante de Boltzmann ($k=1.3854 \times 10^{-3}$ (j/k)).

a : facteur d'idéalité de la diode ($a = 1.6$).

q : charge d'électron ($q = 1.6 \times 10^{-19}$ c).

V_t : potentielle thermodynamique.

T : température de fonctionnement de la cellule.

➤ Cellule réelle (pratique) :

Le modèle mathématique associé à la cellule est basé sur le modèle mathématique des jonctions PN. Ajoutez le courant I_{pv} , qui est proportionnel à la quantité de photons reçus par la cellule, et des termes qui modélisent les phénomènes internes. Ensuite, le courant de la cellule est écrit.

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \quad (5)$$

Où :

I : courant généré par la cellule photovoltaïque.

I_{ph} : photo courant créé par la cellule.

I_d : le courant circulant dans la diode (jonction PN).

I_p : le courant circulant dans la résistance **R_p**.

On peut déduire de ces expressions, un schéma équivalent comme le montre la figure.III.1

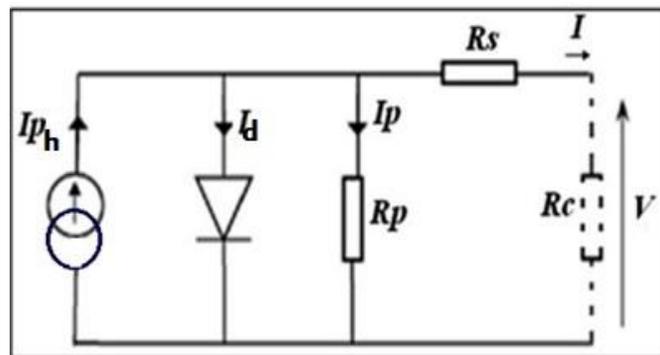


Figure III.2 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle

Photo courant :

$$I_{ph} = [I_{cc} + K_i \times (T - T_{ref})] \times \frac{G}{G_0} \quad (6)$$

Avec :

I_{cc} : courant de court de circuit (A).

K_i : coefficient de la température de court-circuit.

G₀ : irradiation nominale ($G_0 = 1000 \text{ W/m}^2$).

G : irradiation sur la surface de la cellule.

T : température de fonctionnement de la cellule (k).

T_{ref}: température référence de la cellule (k).

Le courant de la jonction PN :

$$I_d = I_s \left[\exp \frac{q(v+R_s I)}{akT} - 1 \right] \quad (7)$$

Avec :

$$I_s = I_{sc} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \times \exp \left[\left(\frac{qE_g}{aK} \right) \times \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (8)$$

Où :

I_s: courant de saturation (A).

k : la constante de Boltzmann ($k=1.3854 \times 10^{-3}$ (j/k)).

a : facteur d'idéalité de la diode.

q : charge d'électron ($q = 1.6 \times 10^{-19}$ c).

R_s : résistance série de la cellule (Ω).

T_{op} : température de fonctionnement de la cellule (k).

T_{ref}: température de référence de la cellule (k).

I_{sc} : le courant de saturation inverse de la diode (A).

E_g : énergie de gap ($E_g \approx 1,12$ ev pour le silicium à 25°C).

Le courant I_p :

$$I_p = \frac{V+R_s I}{R_p} \quad (9)$$

Avec :

V : la tension aux bornes de la cellule (v).

I : courant fourni par la cellule (A).

Remplaçons dans l'équation (5) les équations (7) et (9), l'équation caractéristique deviendra :

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp \frac{q(v+R_s I)}{akT} - 1 \right] - \frac{(V+R_s I)}{R_p} \quad (10)$$

Les valeurs respectives de ces éléments déterminent les performances de la cellule réelle en particulier les caractéristiques courant-tension $I = f(V)$ comme la montre la figure III.3

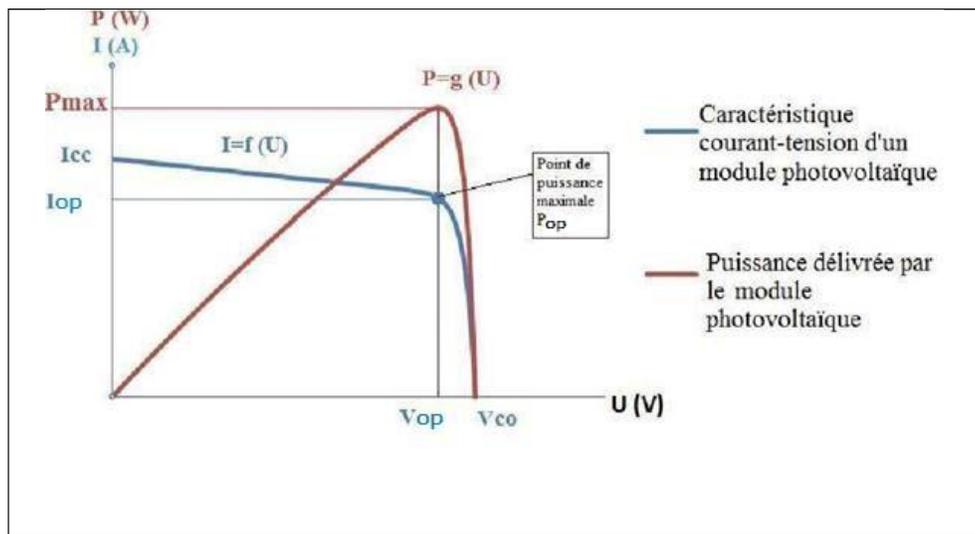


Figure.III.3 : les Caractéristique d'une cellule photovoltaïque réelle. [42]

Quatre données essentielles sont utilisées pour déterminer la caractéristique courant-tension d'un module photovoltaïque :

- Le courant de court-circuit noté I_{cc} .
- La tension à vide notée V_{co} .
- Le courant de puissance maximum noté I_{op} .
- La tension de puissance maximale notée V_{op} .

Le courant de puissance maximum et la tension de puissance maximum sont définis de telle sorte que le produit $I_{op} \times V_{op}$ soit maximum.

La valeur des 4 paramètres ci-dessous dépend de l'éclairage et de la température du module.[35]

La figure III.3 montre que : [42]

- Le courant débité par la cellule dépend fortement du niveau d'éclairement.
- On constate expérimentalement que le courant de court-circuit est directement proportionnel à l'éclairement : lorsque l'éclairement est multiplié par 2, le courant de court-circuit est également multiplié par 2.
- La tension, est peu sensible aux variations du niveau d'éclairement. [43]

Enfin, les deux résistances modélisent les pertes internes :

R_s (résistance série) : due essentiellement aux pertes par effets Joule à travers les grilles de collectes et la résistance propre des semi-conducteurs.

R_p (résistance parallèle) : dite 'Shunt', provient des pertes par recombinaisons dues essentiellement à l'épaisseur, aux effets de surface, ainsi qu'à la non idéalité de la jonction.

III.3. Modélisation d'un panneau photovoltaïque :

III.3.1. Caractéristique d'un panneau photovoltaïque :

Une fois la cellule solaire caractérisée, le module est modélisé comme une combinaison de cellules N_s connectées en série et de cellules N_p connectées en parallèle, à condition qu'elles soient identiques. Le courant de court-circuit du module est multiplié par N_p et la tension de circuit ouvert du module est multipliée par N_s . Les caractéristiques d'un module avec des cellules N_s connectées en série et des cellules N_p connectées en parallèle sont les suivantes :

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp \frac{(v + R_s I)}{a V_t} - 1 \right] - \frac{(V + R_s I)}{R_p}$$

Avec :

$$V_t = \frac{N_s K T}{q}$$

Et :

$$I_{sc} = \frac{I_{cc}}{\exp \left(\frac{q V_{oc}}{a N_s K T} - 1 \right)}$$

Alors le courant d'un panneau est donné par :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left[\exp \frac{q(v + R_s I)}{a K N_s T} - 1 \right] - \frac{(V + R_s I)}{R_p}$$

I_{pv} : courant de panneau PV.

V_{oc} : la tension de circuit ouvert.

N_s : nombre de cellules connecté en série.

III.4. Évaluation des facteurs de qualité :

Le facteur de qualité de la diode (a) est inconnu et doit être estimé, il prend généralement une valeur comprise entre 1 et 2. [site 6]

III.5. Applications industrielles isolées :

L'utilisation de l'électricité solaire en zones reculées est très répandue dans le secteur des télécommunications, en particulier pour relier les zones isolées au reste du pays. Les stations-relais pour téléphones mobiles fonctionnant grâce au photovoltaïque ou à un système hybride ont aussi un large potentiel. On peut également citer la signalisation routière et autoroutière, l'aide à la navigation maritime, les téléphones d'urgence et les installations de traitement des eaux usées. Ces applications sont d'ores et déjà compétitives en termes de coût dans la mesure où elles fournissent en électricité des zones trop éloignées pour que leur raccordement au réseau ne soit rentable.[44]

III.5.1. Systèmes isolés pour l'électrification rurale :

Quand le raccordement au réseau électrique n'est pas disponible, le système photovoltaïque est connecté à une batterie via un contrôleur de charge. Un onduleur peut être utilisé pour fournir du courant alternatif, permettant l'alimentation d'appareils électriques standards. La plupart des applications hors-réseau sont utilisées pour fournir de l'électricité à des zones reculées (chalets de montagne, pays en voie de développement). L'électrification rurale regroupe à la fois les petites installations solaires couvrant les besoins de base en électricité d'une maison individuelle et les installations plus grandes et semi-connectées fournissant de l'électricité à plusieurs maisons.[44]

III.6. Générateur photovoltaïque :

Le générateur photovoltaïque convertit la radiation solaire incidente en puissance électrique et en général, on distingue deux types d'installations : - Non autonomes ou « grid

connected » i.e. rattachées au réseau de distribution électrique. Dans Les systèmes reliés au réseaux, les consommateurs standard de puissance AC sont connectés Au générateur via un onduleur (convertisseur DC/AC) parfois bidirectionnel (redresseur/onduleur). Le surplus d'énergie du générateur photovoltaïque est injecté au réseau public et les Demandes de puissance qui existent la capacité de production du générateur sont attachées sur le Réseau. - Autonomes ou « stand-alone », qui sont le propose de cette étude, ces installations isolées Ne sont pas connectées au réseau, mais elles doivent assurer la couverture de la demande de la charge En tout temps. La puissance à la sortie du générateur photovoltaïque n'est pas suffisante pour Satisfaire la demande de charge, aussi l'autonomie du système est-elle est assurée par un système de Stockage d'énergie. En général ces installations comprennent quatre éléments.[45]

III.6.1. L'adaptation d'un générateur photovoltaïque à la charge :

La conception d'un étage d'adaptation permet aujourd'hui de relier aisément un générateur photovoltaïque (GPV) à une charge de type continue (DC), avec un rendement de conversion très élevé. En fait, le concept de cet étage correspond à la modélisation des fonctions basiques idéalisées d'un convertisseur à découpage continu-continu (DC/DC). Ce concept est nommé ainsi à cause des liens que le convertisseur crée entre ses quatre grandeurs électriques sur les ports d'entrée et de sortie qui sont ses courants et ses tensions d'entrée et de sortie.[46]

III.7. Les convertisseurs :

Les convertisseurs sont des appareils servent à transformer la tension continue fournie par les panneaux ou les batteries pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant en une tension continue différente ou une tension alternative. L'étude du convertisseur est intéressante dans la mesure où il est utilisé dans la plupart des nouveaux types de sources de production d'énergie dispersée connectée au réseau (éolienne, Photovoltaïque, pile à combustible...).[47]

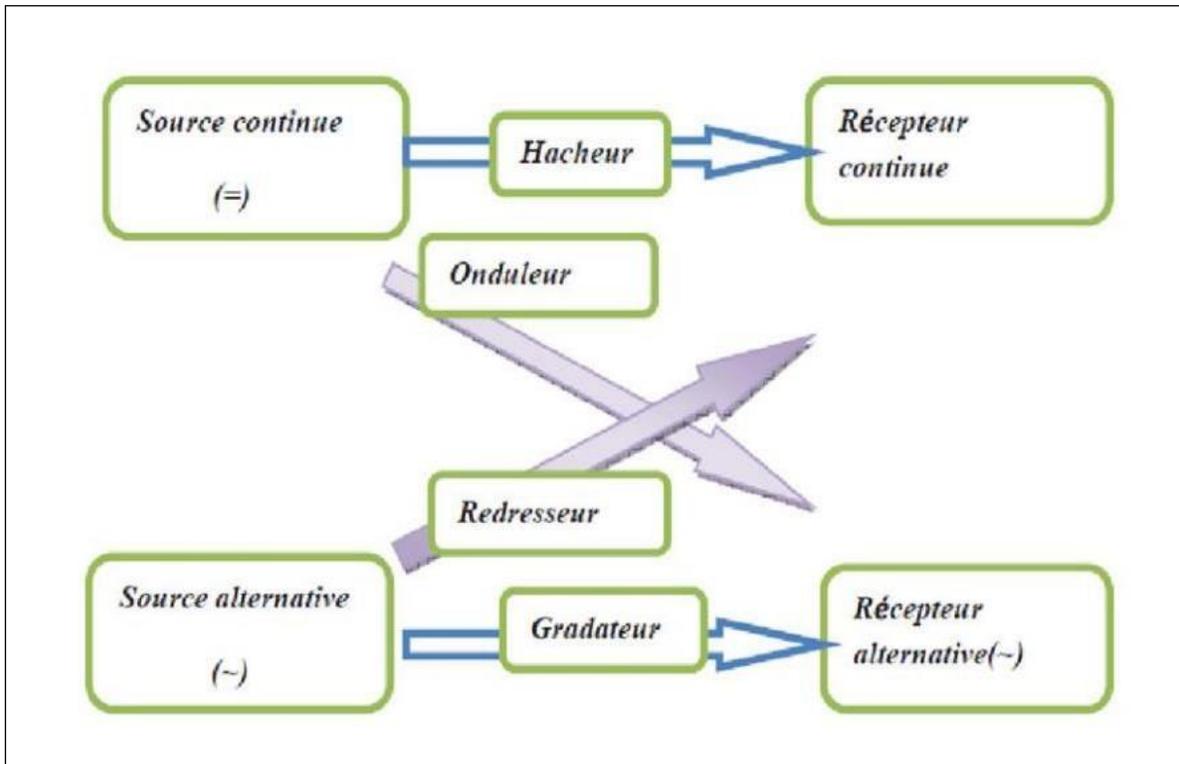


Figure.III.4. Les différents types des convertisseurs statiques.

Le système de conversion photovoltaïque est basé sur des blocs modulaires, comme Représenté dans la figure Figure.III.5.

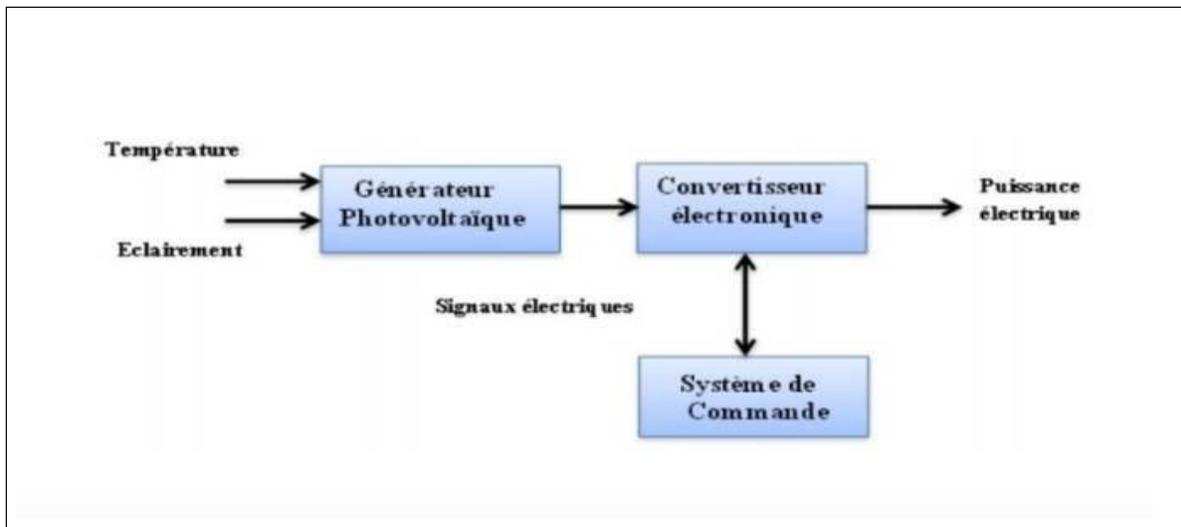


Figure.III.5. Système de conversion photovoltaïque.

III.8. Simulation d'un panneau photovoltaïque sous Matlab-Simulink :

Pour réaliser cette simulation nous avons choisi un modèle photovoltaïque de caractéristique sont données par le tableau (III.1) suivant :

Tableau III.1 : Caractéristiques électrique d'une photopile (cellule PV).

I_{cc}	8,32 A en 25C° et 1000 W/m ²
T	298 k
T_{ref}	25 C°
G_0	1000 W/m ²
Q	$1,6 \cdot 10^{-19}$ c
V_{oc}	32,9 V
A	1,3
K	$1,38 \cdot 10^{-23}$ j/k
E_g	1,1 ev
N_s	54 cellules
N_p	1
R_s	221
R_p	415,405

Chapitre 3: Modélisation et simulation d'un panneau PV

Tableau III.2 : Caractéristiques électrique de la cellule PV dans les condition standards

$$T = 25 \text{ C}^\circ, G = 1000 \text{ W/m}^2$$

Puissance nominal	200 W
Tension a puissance maximal	26,4 V
Courant a puissance maximal	7,58 A
Tension de circuit ouvert	32,9 V
Courant de court-circuit	8,21 A
Nombre des cellule en série N_s	54
Nombre des cellule en parallèle N_p	1

III.8.1. La simulation de chaque bloc sous matlab-simulink :

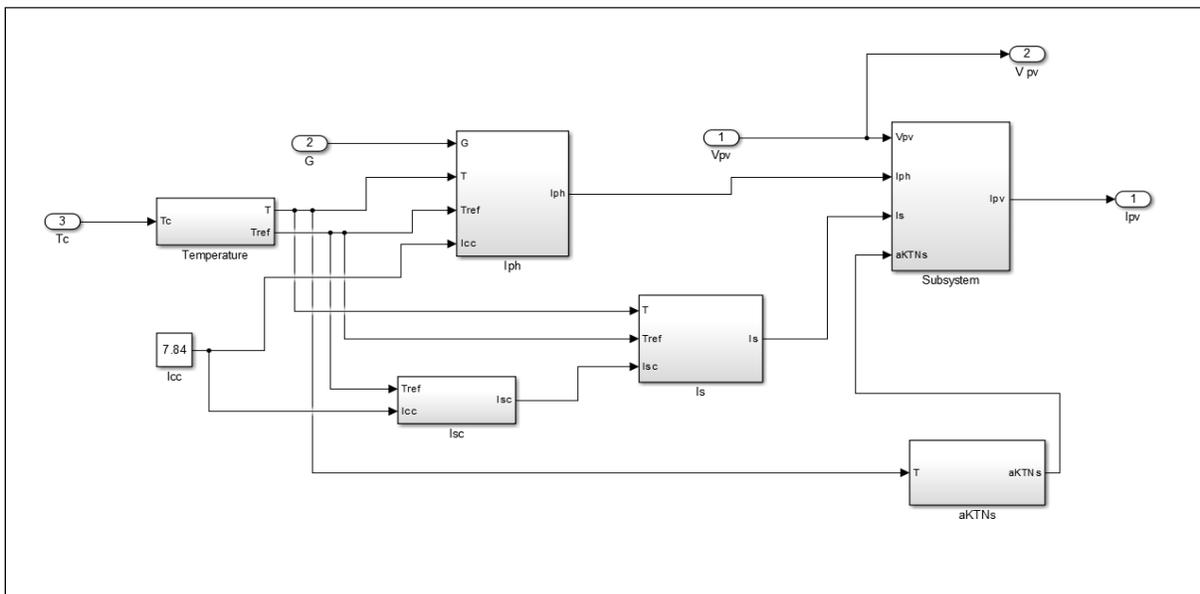


Figure III.6 : schéma d'un générateur PV sou MATLAB SIMULINK

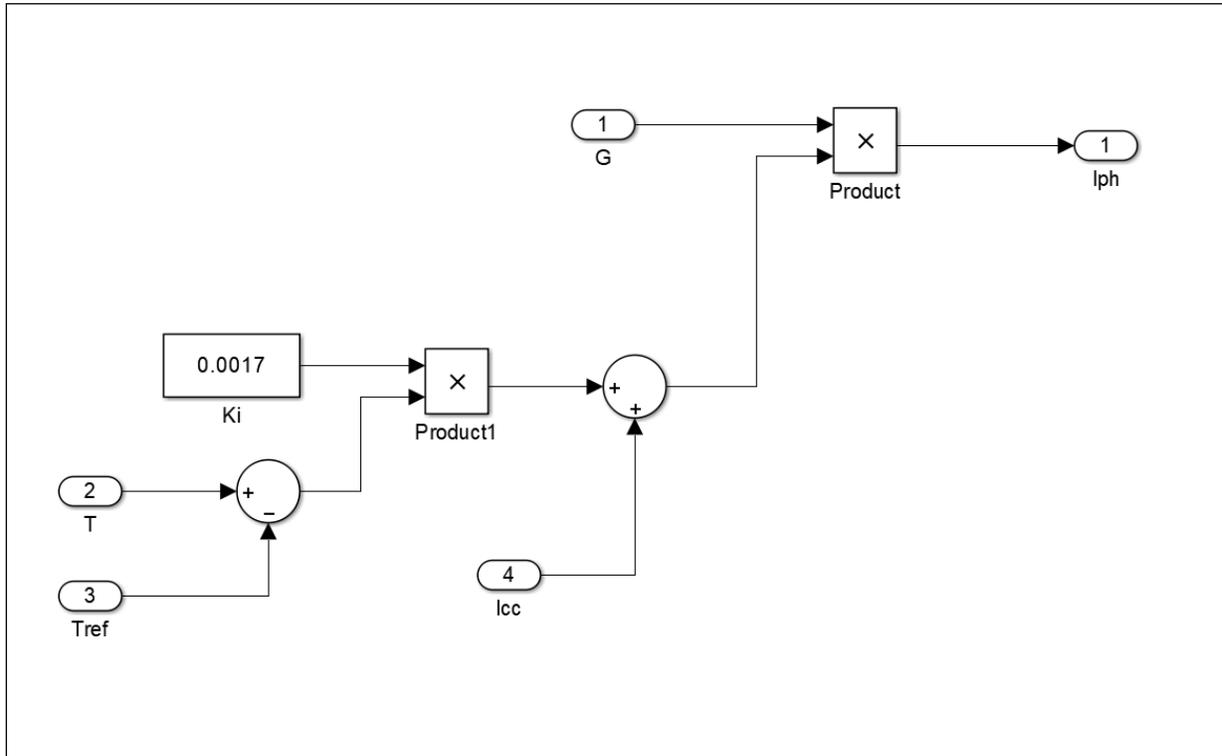


Figure III.7 : schéma d'un photo-courant

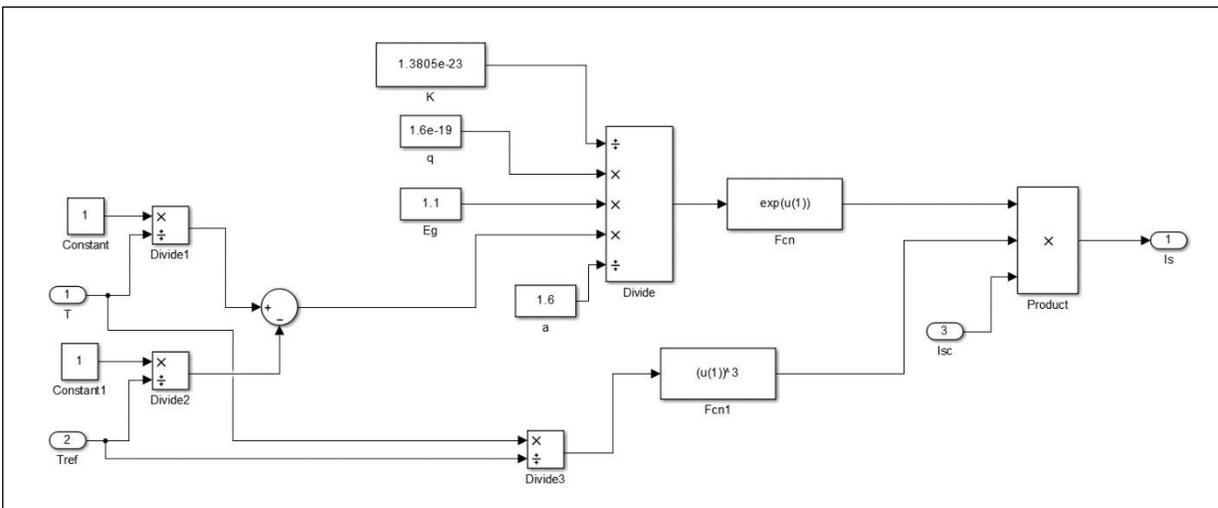


Figure III.8 : schéma d'un courant de saturation

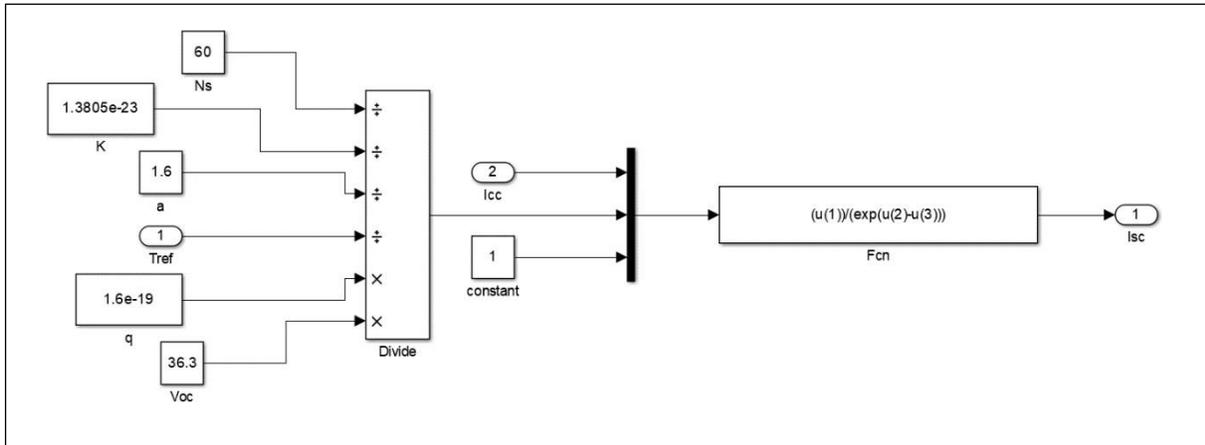


Figure III.9 : schéma d'un courant de saturation inverse

III.8.2. Les résultats de simulation sous matlab-simulink :

III.8.2.1. Influence de la température sur la cellule :

Les figures suivantes représentent la caractéristique courant – tension I(V) et puissance tension P(V) dans la même condition de l'éclairement ($G=1000 \text{ W/m}^2$) et pour différents températures ($T= 25,30,40$) :

a. Caractéristique (I-V) :

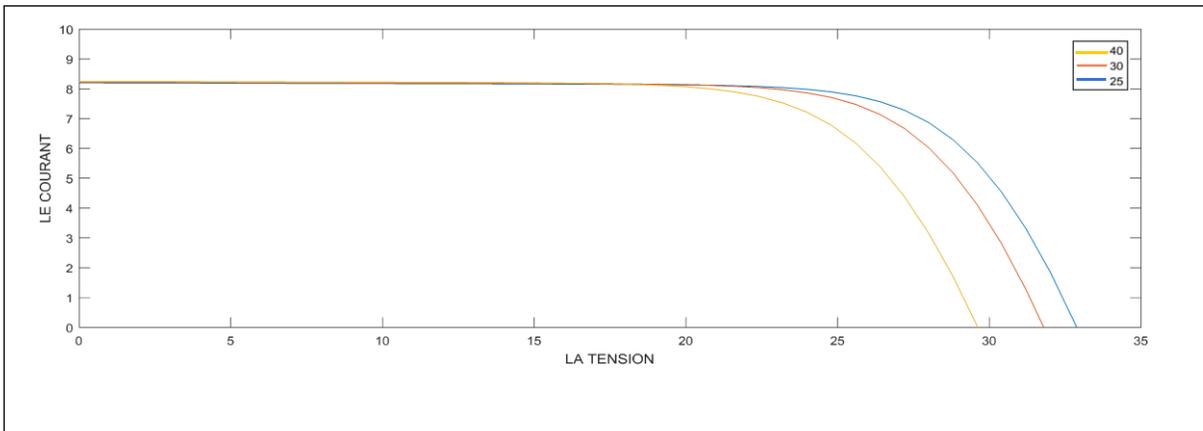


Figure III.10 : caractéristique I(V) pour différentes températures ($G=1000\text{W/m}^2$).

b. Caractéristique (P-V) :

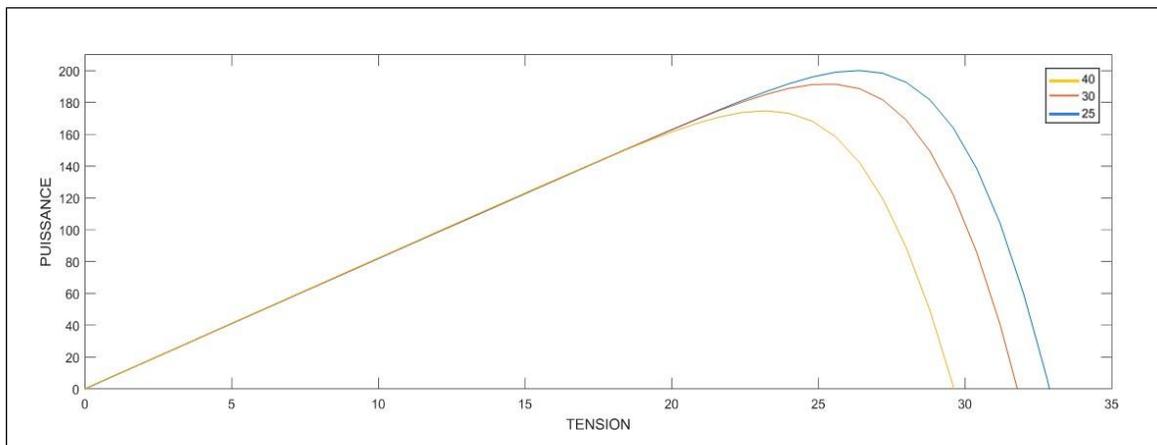


Figure III.11 : Caractéristique P(V) pour différentes températures ($G=1000\text{W/m}^2$).

La tension de circuit ouvert est diminuée avec l'augmentation de la température, par contre le courant de court-circuit augmente légèrement avec l'augmentation de la température et la puissance maximale diminue. On constate que la température influence négativement sur la tension de circuit ouvert.

On peut donc tirer la conclusion suivante : les cellules PV ont de meilleure performance dans un environnement froid avec ciel dégagé.

III.8.2.2. Influence de l'éclairement sur la cellule :

Les figures suivantes représentent la caractéristique (I-V) et (P-V) d'une cellule en fonction de la variation de l'éclairement ($G=600.800.1000 \text{ W/m}^2$) à température constants ($T=25 \text{ }^\circ\text{C}$). Le courant de court-circuit est directement proportionnel au rayonnement incident.

a. Caractéristique (I-V) :

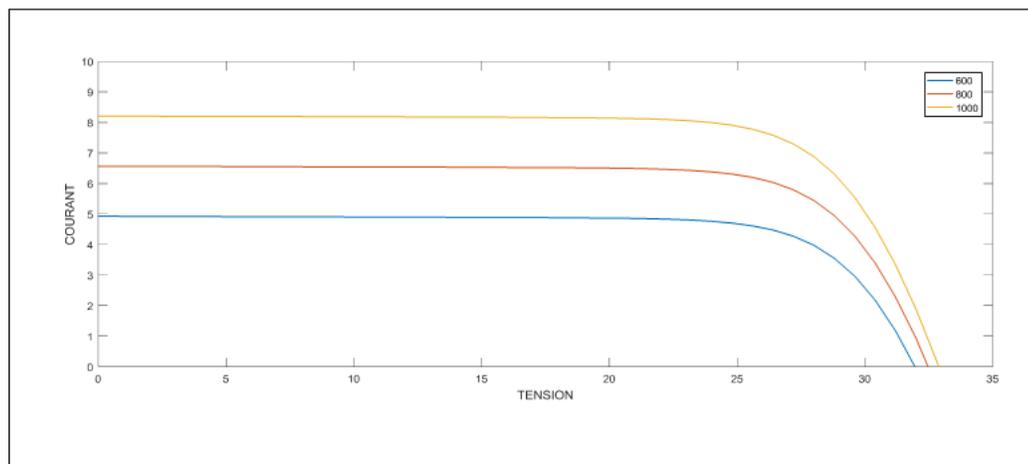


Figure III.12 : Caractéristique I(V) pour différents niveaux d'éclairement ($T=25^\circ\text{C}$).

la tension de circuit ouvert augmente rapidement pour de faibles niveaux d'éclairement, puis lentement pour des niveaux plus élevés.

b. Caractéristique (P-V) :

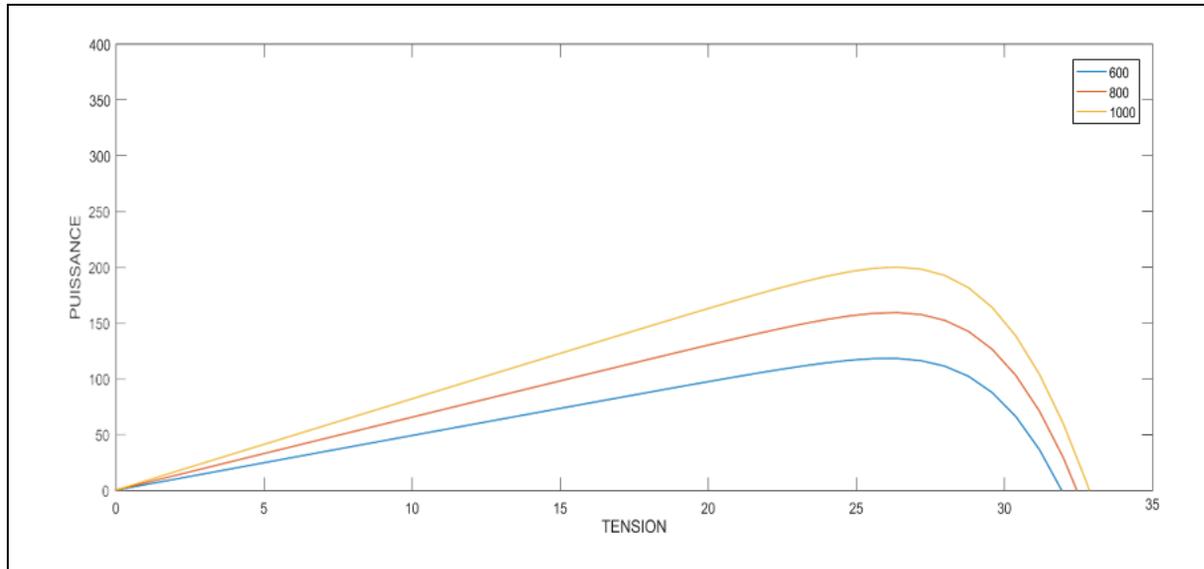


Figure III.13: Caractéristique P(V) pour différents niveaux d'éclairement ($T=25^{\circ}\text{C}$)

La figure illustre la variation de la puissance délivrée par la cellule en fonction de la tension pour différentes valeurs d'éclairement, ce qui nous permet de déduire l'influence de l'éclairement sur la caractéristique P(V).

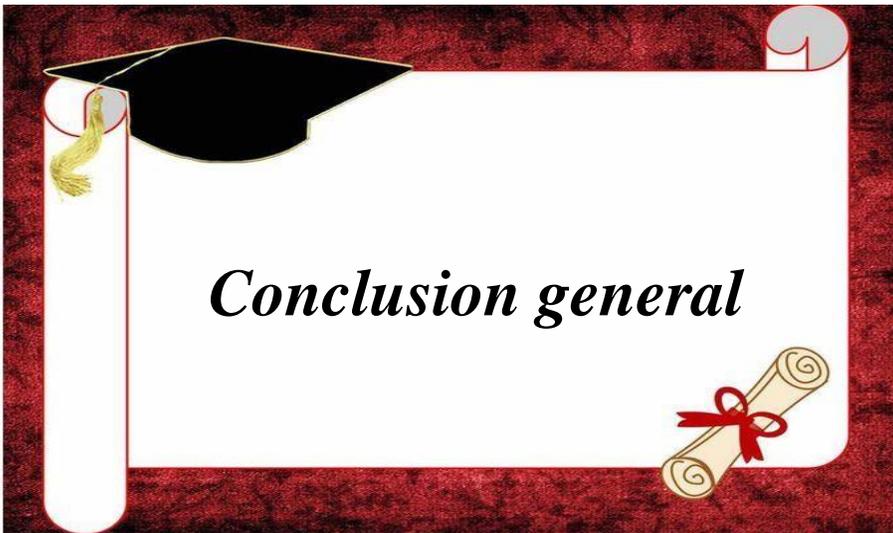
On conclut que l'énergie électrique produite par une cellule dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons créé un modèle mathématique d'un module solaire à partir d'un modèle mathématique d'une cellule éclairée. Les résultats de la simulation montrent que les performances des modules PV sont fortement affectées par les conditions climatiques, en particulier le rayonnement solaire et la température.

À mesure que la quantité de rayonnement solaire augmente, le courant augmente. Cela signifie que le module peut générer plus de puissance. L'évolution de la caractéristique $I=f(V)$ en fonction de la température montre que le courant augmente avec l'augmentation de la température.

La caractéristique $P=f(V)$ inclut le point de puissance maximale (PPM). En raison de la connexion directe du générateur PV, la puissance maximale ne peut être transmise que dans des conditions restreintes. C'est le plus gros inconvénient des centrales solaires.



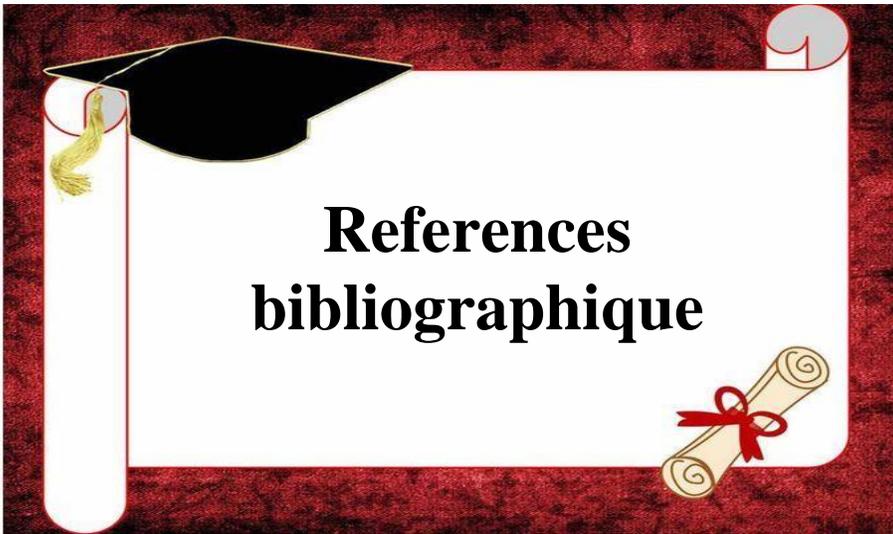
CONCLUSION

L'étude et la simulation d'un générateur photovoltaïque en site isolé sont très importantes pour comprendre le fonctionnement de ce type de système et pour optimiser son efficacité.

L'analyse des caractéristiques électriques du panneau solaire, de l'onduleur et des batteries permet de déterminer le dimensionnement optimal du système en fonction des besoins énergétiques du site isolé.

La simulation permet également de prévoir le rendement énergétique du générateur photovoltaïque en fonction des conditions climatiques et des variations de la charge électrique.

En résumé, cette étude et simulation sont des étapes cruciales pour garantir l'efficacité et la durabilité du système photovoltaïque en site isolé, et pour s'assurer que les besoins énergétiques du site sont satisfaits de manière fiable et durable.



**References
bibliographique**

References

Bibliographie :

- [1] Maëla Jaouen « Les énergies renouvelables Etat des lieux et perspectives en Italie». Chargée de Mission Cathy RACAULT, Attachée Scientifique, 2005.
- [2] Abbad Imane, Simulation de l'effet des paramètres climatiques (température, poussière et éclairage) sur le rendement d'une cellule solaire, MÉMOIRE Pour l'obtention du diplôme de Master en Physique, Option : Physique des Matériaux, Université Larbi Ben M'Hidi / Oum El Bouaghi, Faculté des Sciences Exactes et de la Nature et la Vie Département des Sciences de la Matière, 2009.
- [3] Hydro-Québec, Filière d'énergie renouvelable. L'énergie de la biomasse, 2015.
- [4] Maafa Omar, Chapitre 1 : Energie et environnement, 2007.
- [5] programme des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique. Réalisation SATINFO, 2011.
- [6] N. Benamrouche et L. Hassaine, étude d'un système photovoltaïque connecte au réseau, Mémoire de fin d'études En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en électrotechnique, OPTION : Réseaux électriques, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou Faculté de Génie Electrique et de l'Informatique, Département d'Electrotechnique, 2008.
- [7] BOUBOU-BOUZIANI Naima, Potentiel et développement des énergies renouvelables en Algérie, Communication Science & technology vol 19, 2017.
- [8] CDER, Bulletin des Energies Renouvelables - N°3 Juin 2003
- [9] Carles Florian, Fussel Etienne, Sylvie Fabrice, Eolienne à Axe Vertical, Projet Tutoré 2ème Année, 2003.
- [10] Bourorga Amel, Ouakrine Fatma zohra, Simulation d'un écoulement instationnaire autour d'un rotor d'une éolienne à axe vertical, Universitaire de KHEMIS MILIANA, Institut des Sciences et de la Technologie, Département des sciences techniques.
- [11] Nasr Sarah, Moubayed Nazih , étude comparative entre éolienne à axe horizontal et éolienne à axe vertical, université libanaise, faculté de génie 1, tripoli, Liban, 2011.
- [12] Liman Amine et Soukane Samir « Etude et modélisation d'un système photovoltaïque autonome », mémoire d'Ingéniorat, UMMTO, 2012.
- [13] Michel Bonvin, Energies renouvelables aujourd'hui et demain Energie solaire thermique, 2011.

References

- [14] Bruxelles Environnement, LE CHAUFFE-EAU solaire, Le Soleil, source d'énergie propre et inépuisable, institut bruxellois pour la gestion de l'environnement, infos fiche, 2009
- [15] Bruno FLECHE, Énergies renouvelables : Solaire Thermique, BF_Thermique, 2008.
- [16] T. Nkouimi Max Jimmy, Option Génie électrique a l'Ecole Nationale Supérieure Polytechnique de Yaoundé, 2008-2009.
- [17] Ahmed khedim, « l'énergie solaire », ISBN : 9973-37-124-0 ; centre de publication Universitaire, Tunis, 2003.
- [18] Syndicat des énergies renouvelables, Principe de fonctionnement du solaire thermodynamique, 2012.
- [19] M. Salmi, « Contribution à La Quantification De L'irradiation Solaire Globale En Algérie Et Applications Aux Générateurs Photovoltaïques », Thèse de doctorat en Sciences, Université Ferhat Abbas de Sétif. 2012.
- [20] Mesrane Abdelfettah, Madjid Chikh, Rabah Sellami, Guide-Photovoltaïque, Guide Technique des Installations Solaires Photovoltaïques Autonomes et Raccordées au Réseau Basse Tension, Edition : Commissariat aux Energies Renouvelables et à l'Efficacité Energétique, Premier Ministre, Alge. 2022.
- [21] Naziha Boulkedra, Nabila Lakhel, Les Photovoltaïques : une Idée, une Réalisation et un Impact Economique en Algérie, Volume VII, n°02, August 2021.
- [22] Chadlia Hanene, Baghana Chems Edine, installation d'une centrale photovoltaïque dans le reseau isole d'adrar (p.i.a.t), memoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master, Faculté des Sciences de l'ingénieur Département électrotechnique, Domaine : Sciences et technologie Filière : Electrotechnique Spécialité : réseau électrique, 2019.
- [23] Metai Abdelkader, Chaab Aymene, Etude et simulation d'un système de production d'énergie photovoltaïque en site isolé, mémoire de master domaine: Sciences et Technologies FILIERE : Électrotechnique OPTION : Electrotechnique Industrielle, 2018.
- [24] Vincent, Chapitre 2 : La production de l'énergie électrique par panneau photovoltaïque. 2021
- [25] Cour de La production de l'énergie électrique par panneau photovoltaïque, chapitre 2 La production de l'énergie électrique par panneau photovoltaïque.
- [26] Cour de l'Energie solaire photovoltaïque, Chapitre III : Energie solaire photovoltaïque, université de Msila, 2021, disponible sur :

References

https://elearning.univmsila.dz/moodle/pluginfile.php/377248/mod_resource/content/1/chapitre%20III%20Energie%20solaire%20photovolta%C3%AFque-converti.pdf

[27] Cours d'Alain Ricaud Jan, Gisement solaire et transferts énergétiques, Master Energies Renouvelables Université de CERGY-PONTOISE, 2011 disponible sur : https://www.cythelia.fr/images/file/Gisement-solaire_Alain%20Ricaud_Jan-2011.pdf

[28] cours de production d'énergie électrique par un capteur photovoltaïque, frederic, ens. sc. tale – thème 2 - chapitre 1 : production d'énergie électrique par un capteur photovoltaïque, 2020 disponible dans le lien : https://olczyk.pagesperso-orange.fr/physique-chimie/Ens-Sc-Tale/EnScT-2.1%20deux%20siecles%20electr_fichiers/cours-production%20par%20photovoltaique.pdf

[29] Kawther A., “ Production d'énergie électrique à partir de l'énergie photovoltaïque”, Mémoire de License, Université de Guelma, 2017.

[30] ZAÏRI Soufiane BOUBIADA Slimane, MÉMOIRE DE MASTER, Université Mohamed Khider de Biskra Faculté des Sciences et de la Technologie Département de Génie Electrique, Electrotechnique, Energies Renouvelables, Etude et Dimensionnement d'un centrale Photovoltaïque, 2020.

[31] Erwann Fourmond, Cellule photovoltaïque tandem à 3 terminaux sur cellule silicium interdigitée, Institut des Nanotechnologies de Lyon UMR CNRS 5270, 2018.

[32] BOUDEHEDJ Mohammed Abdelwahid, , Etude des propriétés structurales et électriques des cellules Tandem III-V (multicouches : InGaP/GaAs) par simulation TCAD_SILVACO, Université Abdelhamid Ibn Badis - Mostaganem Faculté des Sciences Exactes et Informatique Domaine Sciences de la Matière Département de Physique, Pour l'obtention du diplôme de : Master. 2015.

[33] Adama Moussa Diallo, Caractérisations optiques de structures photovoltaïques tri-jonction, Mémoire présenté au Département de physique en vue de l'obtention du grade de maître ès sciences (M. Sc.) FACULTÉ DES SCIENCES UNIVERSITE DE SHERBROOKE, 2011.

[34] le photovoltaïque fonctionnement et technologies, module 3, 2010, Institut Bruxellois pour la gestion de l'environnement, infos fiche énergétique, 2010.

[35] ABDELDOUAD Med Tarek, SAADI Abdelkodous, Etude et modélisation d'un panneau photovoltaïque, Faculté: Sciences de l'Ingénierat Département: Électrotechnique

References

Domaine: Sciences et Technologies Filière : Électrotechnique MEMOIRE Présenté en vue de l'obtention du diplôme de LICENCE, 2020.

[36] Hamel Abderraouf, Evaluation de performance d'un système photovoltaïque à injection réseau, Université Larbi Ben M'Hidi - Oum El Bouaghi – Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées Département de Génie Electrique, Mémoire de fin d'études En vue de l'obtention du Diplôme de Master Option : Génie Électrique, 2017.

[37] Hicham Bahtoun, , etude des differents montages et differents branchement des panneaux solaires, universite l'arbi ben m'hidi (oum el bouaghi) faculte des sciences exactes et sciences de la nature et de la vie département science de la matiere, mémoire pour l'obtention du diplôme de Master en physique Option : science des matériaux, 2014.

[38] BOUZEGANE Mhenna GAOUAOUI Ferhat, Alimentation d'un moteur à courant continu par une source photovoltaïque, Université Mouloud mammeri de tizi-ouzou, faculté de génie electrique et d'informatique departement d'automatique mémoire de fin d'etudes de master academique spécialité : Automatique et Informatique Industrielle. 2018.

[39] Hadjadj Dounia et Belkhirri Omnia, Etude des caractéristiques d'un capteur solaire photovoltaïque et évaluation de ses performances sous différentes conditions climatiques. Université de 8 Mai 1945 -Guelma-, faculté des Sciences et de la technologie, Département de Génie Electronique et automatique, Mémoire Présenté pour l'obtention du diplôme de Master Académique. 2022

[40] Akihiro Oi, "Design and Simulation of Photovoltaic Water Pumping System", A Thesis Presented to the Faculty of California Polytechnic State University, San Luis Obispo, 2005.

[41] S.Chowdhury, S.P.Chowdhury, G.A.Taylor, and Y.H.Song, "Mathematical Modeling and Performance Evaluation of a Stand-Alone Polycrystalline PV Plant with MPPT Facility," IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, Pittsburg, USA. July 20-24, 2008

[42] Programme indicatif des besoins en moyens de production d'électricité, commission de la régulation de l'électricité et du gaz. 2008-2017

[43] ASPECTS TECHNIQUES DES PROJETS SOLAIRES PV RACCORDÉS AU RÉSEAU

[44] alimentant une machine asynchrone. MAGISTER EN ELECTROTECHNIQUE

References

[45] Belhadj Mohammed, “Modélisation d’un système de captage photovoltaïque autonome.,” Mémoire de Magister Centre Universitaire de Bechar, Institut des Sciences Exactes, bachaar, 2008.

[46] BOUALEM DENDIB, “Technique conventionnelles et avancées de poursuite MPPT pour des applications photovoltaïque : étude comparative,” mémoire de magister, Université Ferhat Abbas-Sétif, 2007.

[47] Bendjellouli Zakaria « Contribution à la modelisation d’une cellule solaire « Memoire de Magister2008/2009, Universite de Bechar.

References

Webographie :

- [site 1] [https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/qu-est-ce-que-l-energie-hydraulique#:~:text=L%27%C3%A9nergie%20hydraulique%20permet%20de,fil%20de%201%27eau\).](https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/qu-est-ce-que-l-energie-hydraulique#:~:text=L%27%C3%A9nergie%20hydraulique%20permet%20de,fil%20de%201%27eau).)
- [site 2] <http://www.ikonet.com/fr/ledictionnairevisuel/energies/geothermie-et-energie-fossile/production-electricite-par-energie-geothermique.php>
- [site 3] https://www.researchgate.net/figure/Conversion-de-lenergie-cinetique-du-vent_fig1_324929383
- [site 4] <https://www.ef4.be/fr/pv/>
- [site 5] <https://www.gre-enr.fr/avantages-inconvenients-photovoltaique/#:~:text=Les%20panneaux%20photovolta%C3%ADques%20vous%20permettent,photovolta%C3%ADques%20sont%20recyclables%20ou%20r%C3%A9utilisables.>
- [site 6] panneaux photovoltaïques et solaires_ par le groupe énergétique industriel français (ENGIE). <https://particuliers.engie.fr/electricite/conseils-electricite/photovoltaique/schema-panneauphotovoltaique.html>
- [site 7] <https://fr.scribd.com/doc/31140407/9/I-6-Classification-des-onduleurs>