

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE de technologie

DEPARTEMENT de génie mécanique

N° :.....



DOMAINE : Science technologie

FILIERE : GENIE MECANIQUE

OPTION : ENERGETIQUE

Mémoire présenté pour l'obtention  
Du diplôme de Master Académique

Par: Hamidi Azeddine et Bouzouaoui Hadjersi

Intitulé

**Etude et conception d'une centrale solaire  
photovoltaïque**

Soutenu devant le jury composé de:

Dr. Ihaddadene.R

Université de m'sila

Président

Dr. Amirat.B

Université de m'sila

Rapporteur

Dr. Bedda.A

Université de m'sila

Examineur

Année universitaire : 2016 /2017

# *Remerciements*

*Au nom d'Allah, le Tout - Miséricordieux, le Très -  
Miséricordieux*

*La louange est à Allah l'unique et la paix et le salut sur celui qui n'a point de messager après lui et sur sa famille, ses compagnons et tous ceux qui suivent son chemin jusqu'au jour de la résurrection.*

*Tout d'abord on remercie le Dieu le tout puissant de la bonne santé, la volonté et de la patience qu'il nous a donné pour faire ce travail.*

*Je tiens, tout particulièrement, à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur AMIRAT Belkacem docteur à l'Université de Mohammed Boudiaf -m'silla- pour ces conseils précieux ainsi que pour la confiance et l'aide qu'il m'a accordé pour mener ce travail à terme.*

*Je voudrais aussi remercier tous les membres de ma famille.*

*Je tiens à remercier mes professeurs de l'option énergétique qui m'ont marqué par leurs grandes valeurs scientifiques et humaines.*

*Mes remerciements vont également tous les personnes qui n'est pas citées et qui ont de per ou de loin participé à la réalisation de ce travail.*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce mémoire à :*

*Mon chère mère, pour ses sacrifices depuis qu'elle m'a mis au monde.*

*Mon père, qui m'a toujours soutenu et aidé à affronter les difficultés.*

*Je voudrais exprimer ma profonde gratitude à*

*Mes parentes Pour leurs éducations et tout l'amour, et toujours à Mes amis*

*Qu'ils n'ont pas cessé de me donner, à mes chers frères, sœurs, ma*

*Et toute la famille.*

*Et à tous les profs de génie mécanique.*

*Et*

*Toute la promotion 2017*

*Hamidi Azeddine*

*Bouzouaoui Hadjersi*

# *Sommaire*

<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>Chapitre 01 : Les énergies renouvelables</b> .....	2
I.1 Généralités :.....	2
I.2 Les différents types d'énergies renouvelables : .....	3
I.2.1 Energie solaire :.....	3
I.2.2 La biomasse :.....	4
I.2.3 L'énergie éolienne :.....	6
I.2.4 La géothermie:.....	7
I.2.5 l'énergie hydraulique :.....	9
I.3 L'énergie renouvelable en Algérie :.....	10
I.4 Potentiel national en énergies renouvelables : .....	12
I.4.1 Potentiel éolien :.....	12
I.4.2 Le potentiel géothermique :.....	13
I.4.3 Potentiel de la Biomasse : .....	14
I.4.4 Potentiel hydroélectrique :.....	14
I.4.5 Le potentiel Solaire : .....	15
I.5 Programme de développement des énergies renouvelables :.....	19
I.6 Les Avantages et les Inconvénients de l'énergie renouvelable :.....	20
<b>Chapitre 2 :ENERGIE SOLAIRE</b> .....	
II.1 Introduction :.....	22
II.2 Le soleil .....	22
II.2.1 Les Technologies solaires .....	23

II.2.2	L'origine du soleil .....	24
II.2.3	Coordonnées horizontales .....	24
II.2.4	Coordonnées équatoriales.....	25
II.2.5	Spectre du rayonnement solaire .....	27
II.2.6	Energie reçue par une surface horizontale située à l'extérieur de l'atmosphère .....	27
V.2.7	Type d'énergie solaire.....	28
II.3	Moyen naturel .....	30
II.4	Applications Techniques de l'énergie solaire: .....	31
<b>Chapitre 3 : Energie photovoltaïque.....</b>		
III.1	Introduction .....	32
III.2	Le principe de l'effet photovoltaïque .....	32
III.3	La cellule photovoltaïque .....	32
III.3.1	Définition d'une cellule solaire .....	32
III.3.2	Les différentes technologies :.....	34
III.3.3	Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque .....	34
III.3.4	Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire .....	38
<b>Chapitre 4 : Les batteries.....</b>		
	Introduction.....	46
IV.1	Les modèles de batteries .....	46
IV.1.1	La batterie de voiture.....	46
IV.1.2	Les batteries à décharge profonde .....	47
IV.1.3	La batterie au Gel .....	47
IV.2	Système de stockage.....	48
IV.3	Les Caractéristiques principales d'une batterie .....	48

IV.3.1	Capacité en Ampère heure : .....	48
IV.4	Types d'accumulateurs.....	51
IV.4.1	Les Accumulateurs au plomb-acide .....	51
IV.4.2	Les Accumulateurs au Nickel-cadmium .....	54
IV.5	Système de régulation .....	55
IV.6	Technique de régulation.....	55
<b>Chapitre V</b>	<b>Application.....</b>	
V.1	Introduction .....	57
V.2	Les systèmes photovoltaïques .....	57
V.2.1	Type de systèmes photovoltaïques .....	58
V.2.2	Les panneaux solaires.....	59
V.3	Les onduleurs .....	61
V.4	Boîtes combinatoires .....	61
V.5	Les transformateurs .....	63
V.6	Dimensionnement.....	64
V.6.1	Données d'ensoleillement. ....	64
V.6.2	Principe de calcul .....	64
V.7	La puissance rayonnée : .....	67
V.8	Influence de l'orientation, de l'inclinaison et de l'ombrage sur la quantité d'énergie captée .....	69
V.8.1	Angle d'inclinaison $\alpha$ .....	70
V..2	Angle azimutal .....	71
V.9	Le châssis.....	71
V.10	Le câblage.....	72
V.11	Calcul.....	73

V.11.1	Données de consommation.....	73
V.11.2	Données de production.....	74
V.12	Fiche technique.....	75
V.12.1	Dimensionnement des panneaux photovoltaïques : .....	75
	Conclusion.	
	Annexes.	
	Bibliographie.	

## *Liste des figures*

Figure I-1 : Le soleil .....	3
Figure I-2 : différents types de biomasse.....	5
Figure I-3 : Fonctionnement d'une éolienne.....	7
Figure I-4 : Carte du relief de l'Algérie .....	13
Figure I-5 : Carte géothermique de l'Algérie. ....	14
Figure I-6 : Irradiation globale journalière reçue sur plan horizontal au mois de juillet. .....	17
Figure I-7 : Irradiation globale journalière reçue sur plan horizontale au mois de décembre.....	17
Figure II-1:La distribution de l'ensollement qui frappe sur le monde.....	23
Figure II-2: Coordonnées horizontales .....	25
Figure II-3: Coordonnées équatoriales .....	26
Figure II-4:Spectre électromagnétique .....	27
Figure III-1 Cellule, panneau, champs photovoltaïque .....	33
Figure III-2 Type de cellule photovoltaïque .....	34
Figure III-3 Caractéristiques courant-tension et paramètres physiques d'une cellule photovoltaïque.....	35
Figure III-4 différents régimes selon la puissance d'éclairement.....	37
Figure III-5 Structure (gauche) et diagramme de bande (droite) d'une cellule photovoltaïque. Les dimensions respectives de différentes zones ne sont pas respectées.....	39
Figure III-6 Processus de fabrication .....	40
Figure III-7 La chaîne du photovoltaïque technologie du silicium cristallin .....	41

Figure III-8 : face avant et arrière de panneau .....	43
Figure III-9 Structure d'une cellule photovoltaïque .....	44
Figure III-10 Le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque .....	45
Figure IV-1 batterie de camion utilisée par le programme santé en Sierra Leone. (Après 9 mois d'utilisation, les batteries sont maintenant inutilisables).....	47
Figure IV-2 Batterie au gel .....	48
Figure IV-3 Caractéristique charge et décharge d'une batterie .....	49
Figure IV-4 Construction d'une batterie monobloc .....	52
Figure V-1 Schéma synoptique décrivant le système photovoltaïque le plus général.	58
Figure V-2 panneau dokio FSP-100M .....	60
Figure V-3 une configuration typique d'une entrée 12 Combiner Box utilisé pour le projet .....	62
Figure V-4 Transformateur .....	63
Figure V-5 Evaluation de la consommation journalière .....	65
Figure V-6 Stockage saisonnier de la batterie .....	67
Figure V-7 Utilisation du rayonnement solaire dans le capteur .....	68
Figure V-8 Puissance rayonnée quotidiennement par le Soleil sur une année .....	69
Figure V.9 Influence de l'orientation, de l'inclinaison et de l'ombrage sur l'énergie rayonnée.....	70
Figure V-10 Angle d'inclinaison des capteurs solaire par rapport à la surface de la terre .....	70
Figure V-11 angle azimutal.....	71
Figure V-12 principe d'une installation photovoltaïque raccordée au réseau.....	73
FigureV-13:méthode de l'installation panneau photovoltaïque ...	78
Figure V-14 : Plan centrale photovoltaïque.....	79

## *List des Tableaux*

Tableau I.1 : le potentiel solaire en Algérie.....	16
Tableau I.2 : Les capacité cumulées du programme énergie renouvelable par type et phase sur la période 2015-2030.....	19
Tableau I.3 : .Les avantage et les incovénients de l'énergie renouvelable .....	20
Tableau V.1 Caractéristiques du produit de base.....	60
Tableau V.2 Caractéristique électrique performance condition de test standard (stc*) .....	60
Tableau V.3 Résistance de câbles de type H07RNF.....	72
Tableau V.4 Données de consommation.....	74

## *Listes des Acronymes et Symboles*

<b>XXI</b>	<b>Vingt et un siècle</b>
<b>KW</b>	Kilo watt
<b>°C</b>	Degré Celsius
<b>PAC</b>	Pompe à chaleur
<b>KWh</b>	Kilo watt heures
<b>XIX</b>	Le dix-neuvième siècle
<b>PCH</b>	Petite centrales hydrauliques
<b>MW</b>	Méga watt
<b>CSP</b>	Energie solaire concentrée
<b>TW</b>	Tera watt
<b>TWh</b>	Tera watt heures
<b>GW</b>	Géga-watt
<b>V</b>	Volt
<b>I</b>	Intensité
<b>A</b>	Ampère
<b>CIS</b>	Cuivre indium sélénium
<b>PV</b>	Photovoltaïque
<b>Ah</b>	Ampère heur
<b>AC</b>	Courant alternatif
<b>DC</b>	Courant continu
<b>BT</b>	Basse tension
<b>KV</b>	Kilo volt
<b>Hz</b>	Hertz
<b>MPPT</b>	Maximum power point tracking

# Introduction générale

## Introduction générale

Dans le contexte énergétique et environnemental mondial actuel, l'objectif visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre et les substances polluantes en exploitant et en combinant des sources d'énergie alternatives et renouvelables ainsi qu'en réduisant l'utilisation de combustibles fossiles voués à l'épuisement en raison de leur forte consommation dans de nombreux pays, est devenu capital. Le Soleil constitue naturellement une source d'énergie renouvelable offrant un grand potentiel et pouvant être utilisée tout en respectant l'environnement. A chaque instant, la surface de l'hémisphère terrestre exposée au Soleil reçoit une énergie supérieure à 50 000 tera watts par conséquent, la quantité d'énergie solaire atteignant la surface de la terre est considérable, équivalant à près de 10 000 fois l'énergie utilisée dans le monde entier. Parmi les différents systèmes utilisant des sources d'énergie renouvelables, le photovoltaïque s'avère prometteur en raison de ses qualités intrinsèques : ses frais de fonctionnement sont très réduits (le combustible est gratuit), ses exigences d'entretien sont limitées, il est fiable, silencieux et relativement facile à installer.

De plus, dans certaines applications autonomes, le photovoltaïque est très pratique comparé à d'autres sources d'énergie, en particulier dans les endroits difficiles d'accès et peu rentables pour l'installation de lignes électriques traditionnelles. Ce document technique 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 photovoltaïques, il expose brièvement les méthodes de raccordement au resaute de protection contre les surintensités, les surtensions et le contact, afin de bien choisir les dispositifs de commande et de protection des différents composants désinstallations.

Ce mémoire est subdivisé en cinq chapitres :

- Le premier chapitre expose les différents types des énergies renouvelables.
- Le deuxième chapitre parle de l'énergie solaire.
- Le troisième chapitre explique les systèmes photovoltaïques et le principe de fonctionnement d'une cellule solaire.
- Le quatrième chapitre présente la batterie et système de stockage.
- Le cinquième chapitre présente l'application d'une centrale solaire étudiée.
- Une conclusion résume le travail réalisé.

# Chapitre 01

## **Les énergies renouvelables**

## **I.1. Généralités :**

Aujourd'hui, plus de 85% de l'énergie utilisée dans le monde provient de gisements de combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz) ou d'uranium, constitués au fil des âges et de l'évolution géologique [1].

La limitation de la quantité de ces réserves, les crises successives du pétrole et l'accroissement de la demande d'énergie dans tous les pays du monde ont conduit les pays industrialisés à chercher et à développer de nouvelles sources d'approvisionnement.

La filière nucléaire était déjà lancée, mais son choix à grande échelle peut amener des conséquences graves, surtout à l'environnement, à cause de la pollution et aussi des accidents nucléaires [2].

Les énergies renouvelables ont toutes l'immense avantage d'être d'origine naturelle, inépuisable et non polluante puisqu'elles n'émettent pas de gaz favorisant l'effet de serre.

Parmi ces énergies renouvelables, on peut citer la production d'électricité d'origine solaire par l'effet photovoltaïque (cellules solaires ou photopiles).

La conversion de la lumière en électricité (conversion photovoltaïque) se produit dans des matériaux semi-conducteurs.

Le photovoltaïque peut jouer un rôle important dans la transition vers un système d'approvisionnement énergétique durable pour le XXI<sup>ème</sup> siècle et est susceptible de couvrir une part importante des besoins en électricité de la planète.

Dans ces dernières années, la production d'électricité à partir de la conversion photovoltaïque augmente dans le monde d'une façon remarquable. Le principal obstacle à la pénétration du marché par le photovoltaïque est le coût de cette technologie qui rend l'électricité produite trop chère pour de nombreuses applications.

Aucune source d'énergie n'a un comportement neutre vis-à-vis de la nature et tout est affaire de compromis.

L'objectif qui se dégage peu à peu est celui d'un développement durable ce qui signifie qu'il doit se poursuivre dans le temps sans épuiser les ressources rares,

qu'il doit être viable économiquement et qu'il permette un développement harmonieux de l'économie mondiale, notamment pour les pays les plus pauvres,

« Un développement qui satisfait les besoins présents sans compromettre la capacité des générations futures à satisfaire les leurs ».

## **I.2. Les différents types d'énergies renouvelables :**

### **I.2.1. Energie solaire :**



**Figure I-1: Le soleil**

Produire de l'électricité solaire n'est plus, depuis longtemps, une utopie.

Des toits solaires ayant une puissance de quelques kilowatts jusqu'aux centrales de quelques mégawatts, toutes ces installations contribuent à un approvisionnement en énergie respectueux de l'environnement et grâce à leur souplesse, recèlent d'énormes potentiels pour le secteur de l'énergie.

Aussi avec les centrales héliothermiques, il est possible d'utiliser l'énergie du soleil à l'échelle industrielle pour la production d'électricité (grâce à la transformation du rayonnement solaire en chaleur).

L'énergie solaire est inépuisable, gratuite et non polluante et même si l'énergie solaire reçue par la terre est d'intensité variable, intermittente et peu dense, son utilisation offre de nombreuses possibilités.

Parmi ses nombreuses applications, on distingue le solaire thermique qui transforme le rayonnement solaire en chaleur et le solaire photovoltaïque qui convertit la lumière en électricité [3]

### **I.2.2. La biomasse :**

Grâce à la photosynthèse, les plantes utilisent l'énergie solaire pour capturer le gaz carbonique et le stocker sous forme d'hydrates de carbone, tout en assurant leur croissance.

Les premiers hommes ignoraient bien sûr ce processus physico-chimique, mais ils ont vite compris l'intérêt de la « biomasse » pour se chauffer. Employé pour désigner toute la matière vivante, ce terme de biomasse s'applique depuis peu à l'ensemble des végétaux employés comme sources d'énergie.

Le bois de feu est bien sûr la plus ancienne de ces sources.

Aujourd'hui on peut ajouter la biomasse dite « humide » : déchets organiques agricoles, déchets verts, boues des stations d'épuration, ordures ménagères qui constituent, à une moindre échelle, autant de sources d'énergie, mais pas forcément très écologiques.

#### **I.2.2.1. Bois énergie :**

Le bois est sans doute la source d'énergie la plus intéressante dans la problématique des énergies renouvelables.

Tout le monde a en tête les dégâts provoqués par la déforestation dans les régions tropicales. Le bois constitue donc une source d'énergie renouvelable et relativement propre.

Sans entrer dans un débat de spécialistes, un petit rappel s'impose.

En brûlant (ou en pourrissant sur le sol), un arbre rejette dans l'atmosphère le gaz carbonique qu'il avait absorbé en grandissant, ni plus ni moins.

Dans un pays qui pratique la sylviculture et replante au minimum autant d'arbres qu'il en coupe, le bilan écologique est donc neutre.

#### **I.2.2.2. Le Biocarburant :**

L'autre atout de la biomasse est la possibilité de fabriquer des biocarburants.

Il en existe deux types : les éthanol et les biodiesels. Les éthanol, destinés aux moteurs à essence, sont issus de différentes plantes comme le blé, le maïs, la betterave et la canne à sucre.

Le procédé consiste à extraire le sucre de la plante pour obtenir de l'éthanol après fermentation.

Quant aux biodiesels, ils sont extraits des oléagineux (colza, tournesol, soja etc.) Les esters d'huile obtenus peuvent alors être mélangés au gazole.

En règle générale, ces biocarburants sont mélangés aux carburants classiques, essence et gazole.

Ils entraînent alors une petite diminution des rejets de monoxyde de carbone et de dioxyde de carbone, gaz responsable de l'effet de serre.

Mais ces biocarburants ont un énorme inconvénient ; ils occupent des surfaces agricoles au détriment des cultures vivrières.



**Figure I-2 : différents types de biomasse. Source ADEME**

### **I.2.2.3. Le Biogaz :**

Les déchets organiques sont une autre source d'énergie fournie par la biomasse. Le principe de leur valorisation énergétique consiste à dégrader la biomasse par des bactéries anaérobies (fermentation) qui produisent des gaz, dont le principal est le méthane.

Ce processus s'appelle la méthanisation. le méthane est alors utilisé comme combustible.

L'un des aspects les plus importants est le caractère dépolluant de la méthanisation : ce traitement fait chuter de 90 % le pouvoir polluant d'un effluent.

Il fait d'ailleurs souvent partie de la chaîne d'épuration d'un substrat pour diminuer la charge en matière organique (cas des boues d'épuration par exemple).

Le méthane non exploité est émis directement dans l'atmosphère et contribue fortement à l'accroissement de l'effet de serre.

Divers déchets organiques sont ainsi traités : boues d'épuration, déchets des industries agroalimentaires, décharges, déchets urbains, effluents agricoles...

Une tonne de déchets organiques produit environ 60 m<sup>3</sup> de méthane.

### **I.2.3. L'énergie éolienne :**

Une hélice entraînée en rotation par la force du vent permet la production d'énergie mécanique ou électrique en tout lieu suffisamment venté.

Les applications de l'énergie éolienne sont variées mais la plus importante consiste à fournir de l'électricité.

Ce sont des parcs d'aérogénérateurs ou «fermes» éoliennes. Ils mettent en œuvre des machines de moyenne et grande puissance (200 à 2 000 KW).

Des systèmes autonomes, de 500 W à quelques dizaines de kW, sont intéressants pour électrifier des sites isolés du réseau électrique (îles, villages...), et récemment dans des buildings ultra modernes, citant ici les twin-towers du Bahreïn.

#### **I.2.3.1. La production d'énergie mécanique grâce au vent :**

Les éoliennes mécaniques servent le plus souvent au pompage de l'eau. L'hélice entraîne un piston, qui remonte l'eau du sous-sol.

Cette technique est bien adaptée pour satisfaire les besoins en eau (agriculture, alimentation, hygiène) de villages isolés.

#### **I.2.3.2. La production d'électricité par aérogénérateurs :**

La figure ci-dessous présente les éléments principaux qui composent la machine.

L'énergie du vent captée sur les pales entraîne le rotor, couplé à la génératrice, qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.

Celle-ci est ensuite distribuée aux normes sur le réseau, via un transformateur.

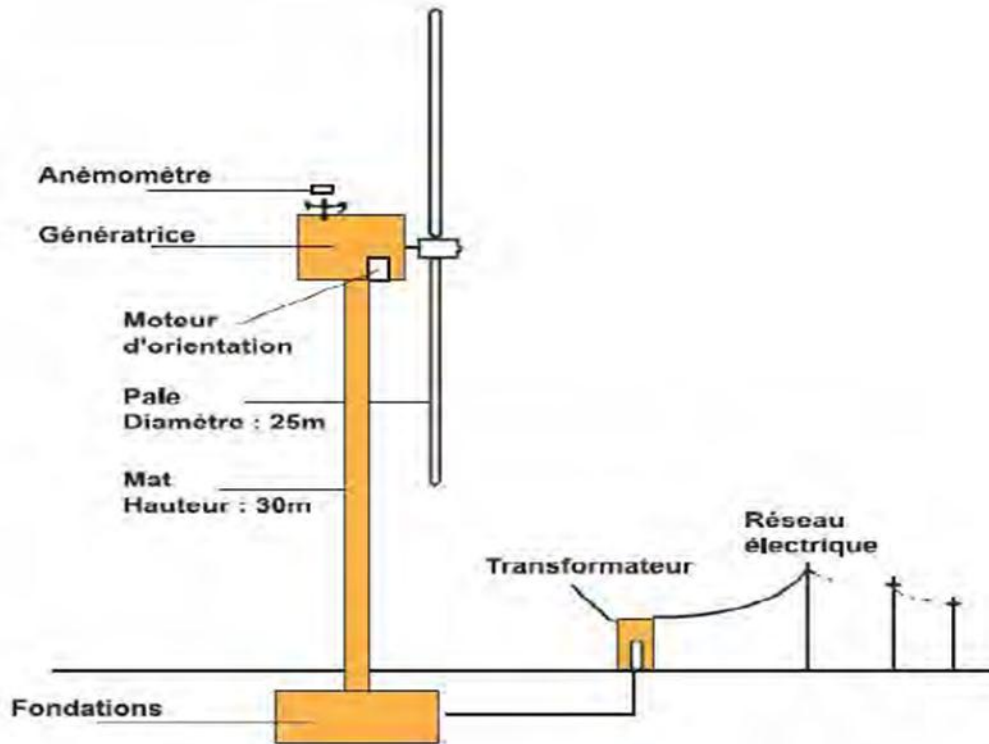


Figure I-3 : Fonctionnement d'une éolienne.

#### I.2.4. La géothermie:

Les ressources géothermiques consistent en l'énergie thermique provenant de l'intérieur de la terre et stockée à la fois dans les roches et dans la vapeur piégée ou l'eau liquide.

Elles sont utilisées pour produire de l'énergie électrique dans des centrales thermiques ou pour d'autres applications domestiques et agro-industrielles nécessitant de la chaleur ainsi que pour des applications de production combinée de chaleur et d'électricité (cogénération).

Le changement climatique n'a pas d'incidences majeures sur l'efficacité de l'énergie géothermique.

L'énergie géothermique est une ressource renouvelable, vu que la chaleur extraite d'un réservoir actif est continuellement remplacée par la production de chaleur naturelle, la conduction et la convection de zones voisines plus chaudes, et les fluides géothermiques extraits sont reconstitués par recharge naturelle et par réinjection des fluides refroidis.

On distingue quatre types de géothermie ; la haute, la moyenne, la basse et la très basse énergie.

#### **I.2.4.1. La géothermie de haute énergie et de moyenne énergie :**

La géothermie de haute énergie (> 180 °C) et de moyenne énergie (température comprise entre 100 °C et 180°C) valorisent les ressources géothermales sous forme d'électricité.

#### **I.2.4.2. La géothermie basse énergie :**

La géothermie basse énergie (températures comprises entre 30 °C et 100 °C) permet de couvrir une large gamme d'usages : chauffage urbain, chauffage de serres, utilisation de chaleur dans les processus industriels, thermalisme....Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent), ni même de la disponibilité d'un substrat, comme c'est le cas de la biomasse. C'est donc une énergie fiable et stable dans le temps.

Cependant, il ne s'agit pas d'une énergie entièrement inépuisable dans ce sens qu'un puits verra un jour son réservoir calorifique diminuer.

Si les installations géothermiques sont technologiquement au point et que l'énergie qu'elles prélèvent est gratuite, leur coût demeure, dans certains cas, très élevé.

#### **I.2.4.3. La géothermie très basse énergie: les pompes à chaleur.**

Le principe des pompes à chaleur (PAC) qui utilisent la chaleur contenue dans le sol pour alimenter un plancher chauffant est connu depuis une vingtaine d'années, elle a subi de notables évolutions techniques qui lui permettent aujourd'hui de rivaliser avec les moyens de chauffage « Traditionnels ».

Cependant une part non négligeable de l'énergie fournie par une PAC est d'origine électrique.

La technique d'utilisation des PAC est basée sur des capteurs enterrés constitués d'un réseau de tubes dans lequel circule un fluide caloporteur : fluide frigorigène de type HCFC dérivé du fréon, ou de l'eau glycolée.

Pour restituer cette chaleur dans le plancher chauffant de la maison plusieurs solutions existent.

La plus répandue consiste à utiliser un «module de transfert» comprenant le compresseur, un ou deux échangeurs...La surface de captage préconisée varie entre 1,5 et 3,5 fois la surface chauffée de l'habitation.

Une PAC réversible et permet au plancher de devenir rafraîchissant en période estivale.

Pour 1 KWh électrique consommé, une pompe à chaleur produit en moyenne 2 à 4 KWh de chaleur.

Une PAC est donc une forme adoucie de chauffage électrique.

Les deux principales qualités de ce mode de chauffage sont liées au mode de diffusion de la chaleur par plancher chauffant basse température, et à la part d'énergie gratuite utilisée.

Par contre des problèmes de gel précoce peuvent apparaître sur certains types de terrain pour des capteurs enterrés à faible profondeur, ainsi que des assèchements estivaux si la fonction rafraîchissement est utilisée.

De plus les fluides frigorigènes sont nuisibles pour la couche d'ozone.

### **I.2.5. L'énergie hydraulique :**

La force de l'eau en mouvement représente une source d'énergie considérable, utilisée depuis plus de 2000 ans par l'homme.

En un premier temps, l'exploitation de cette source d'énergie s'appliquait uniquement à des utilisations mécaniques (scieries, moulins, métallurgies...).

Depuis le XIXe siècle, l'énergie hydraulique est principalement utilisée pour produire de l'électricité. C'est ce que l'on appelle l'hydroélectricité.

Fonctionnement : l'eau, accumulée dans les barrages ou dérivée par des prises d'eau, apporte une énergie qui permet d'actionner la roue d'une turbine.

Cette turbine entraîne une génératrice qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique.

### **I.2.5.1. Les petites centrales hydrauliques (PCH) :**

Depuis des siècles, l'énergie hydraulique est captée par les hommes : c'est ainsi qu'en 1688, la machine de MARLY, ensemble de 14 roues à aubes et tuyauteries a permis de refouler l'eau de la Seine à 162 m de haut pour les besoins des étangs et fontaines de Versailles.

Les petites centrales hydrauliques sont présentées partout dans le monde mais leur dénombrement s'avère difficile.

On estime que la capacité mondiale installée s'élève à 37000 MW. En «haute chute», l'eau d'une source ou d'un ruisseau est captée par une prise d'eau sommaire, elle est ensuite dirigée à travers une conduite vers une turbine située plus bas.

L'écoulement de l'eau fait tourner la turbine qui entraîne un générateur électrique et enfin l'électricité produite peut soit être utilisée directement, soit stockée dans des accumulateurs.

Enfin, l'eau est restituée à la rivière. En «basse chute», on ne passe plus par une conduite, l'eau est dérivée dans un canal sur lequel est aménagé la PCH.

En ce qui concerne le fonctionnement d'une centrale, la quantité d'énergie hydraulique produite dépend de deux facteurs :

Le débit de la rivière et la hauteur de la chute.

Une faible masse d'eau tombant de haut produira donc la même quantité d'électricité que beaucoup d'eau dévalant un faible dénivelé.

### **I.3. L'énergie renouvelable en Algérie :**

A travers le lancement d'un programme ambitieux de développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique, l'Algérie amorce une dynamique d'énergie verte qui s'appuie sur une stratégie axée sur la mise en valeur de ressources inépuisables et leur utilisation pour diversifier les sources d'énergie et préparer le futur. Ainsi, l'Algérie s'engage dans une nouvelle ère énergétique durable.

Près de quatre années après le lancement du programme de développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique, adopté en février 2011 par le gouvernement, il est apparu dans sa phase expérimentale et de veille technologique, des éléments nouveaux et pertinents sur la scène énergétique, aussi bien nationale qu'internationale, nécessitant la révision du programme de développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique. Parmi ces éléments, il convient de citer :

- Une meilleure connaissance du potentiel national en énergies renouvelables à travers les études engagées, lors de cette première phase, notamment les potentiels solaire et éolien;
- La baisse des coûts des filières photovoltaïque et éolienne qui s'affirment de plus en plus sur le marché pour constituer des filières viables à considérer (maturité technologique, coûts compétitifs ...);
- Les coûts de la filière CSP (solaire thermique) qui restent élevés associés à une technologie non encore mature notamment en termes de stockage avec une croissance très lente du développement de son marché.

Ainsi, le programme des énergies renouvelables actualisé consiste à installer une puissance d'origine renouvelable de l'ordre de 22 000 MW à l'horizon 2030 pour le marché national, avec le maintien de l'option de l'exportation comme objectif stratégique, si les conditions du marché le permettent.

A la faveur de ce nouveau programme, les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique se placent au cœur des politiques énergétique et économique menées par l'Algérie.

Ainsi d'ici 2030, 37 % de la capacité installée et 27 % de la production d'électricité destinée à la consommation nationale, seront d'origine renouvelable.

A travers son programme d'énergies renouvelables, l'Algérie compte se positionner comme un acteur déterminé dans la production de l'électricité à partir des filières solaire et éolienne en intégrant la biomasse, la cogénération et la géothermie. Ces

filiales énergétiques seront les moteurs d'un développement économique durable à même d'impulser un nouveau modèle de croissance économique [4].

#### **I.4. Potentiel national en énergies renouvelables :**

Le potentiel national en énergies renouvelables étant fortement dominé par le solaire, l'Algérie considère cette énergie comme une opportunité et un levier de développement économique et social, notamment à travers l'implantation d'industries créatrices de richesse et d'emplois.

Cela n'exclut pas pour autant le lancement de nombreux projets de réalisation de fermes éoliennes et la mise en œuvre de projets en biomasse, en géothermie et en cogénération.

##### **I.4.1. Potentiel éolien :**

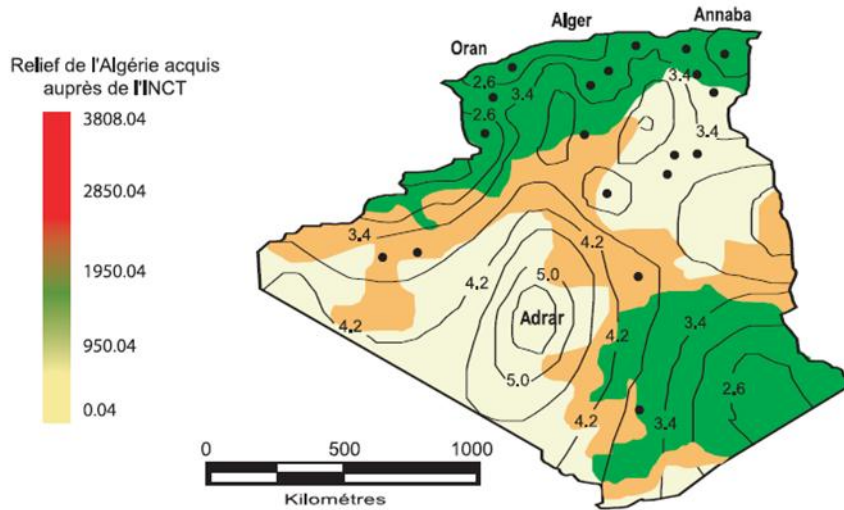
La ressource éolienne en Algérie varie beaucoup d'un endroit à un autre.

Ceci est dû principalement à une topographie et un climat très diversifiés.

En effet, notre vaste pays, se subdivise en deux grandes zones géographiques distinctes.

Le Nord méditerranéen est caractérisé par un littoral de 1200 km et un relief montagneux, représenté par les deux chaînes de l'Atlas tellien et l'Atlas saharien. Entre elles, s'intercalent des plaines et les hauts plateaux de climat continental. Le Sud, quant à lui, se caractérise par un climat saharien.

La carte représentée ci-dessous montre que le Sud est caractérisé par des vitesses plus élevées que le Nord, plus particulièrement dans le Sud ouest, avec des vitesses supérieures à 4 m/s et qui dépassent la valeur de 6 m/s dans la région d'Adrar. Concernant le Nord, on remarque globalement que la vitesse moyenne est peu élevée. On note cependant, l'existence de microclimats sur les sites côtiers d'Oran, Bejaïa et Annaba, sur les hauts plateaux de Tiaret ainsi que dans la région délimitée par Bejaïa au Nord et Biskra au Sud.



*Tracé des vitesses moyennes du vent à 10 m du sol*

**Figure I-4: Carte du relief de l'Algérie. Source CDER**

#### **I.4.2. Le potentiel géothermique :**

Les calcaires jurassiques du Nord algérien qui constituent d'importants réservoirs géothermiques, donnant naissance à plus de 200 sources thermales localisées principalement dans les régions du Nord-est et Nord-Ouest du pays. Ces sources se trouvent à des températures souvent supérieures à 40°C, la plus chaude étant celle de Hammam Meskhoutine (96°C). Ces émergences naturelles qui sont généralement les fuites de réservoirs existants, débitent à elles seules plus de 2 m<sup>3</sup>/s d'eau chaude. Ceci ne représente qu'une infime partie des possibilités de production des réservoirs.

Plus au Sud, la formation du continental intercalaire, constitue un vaste réservoir géothermique qui s'étend sur plusieurs milliers de Km<sup>2</sup>. ce réservoir, appelé communément « nappe albiennne » est exploité à travers des forages à plus de 4 m<sup>3</sup>/s. l'eau de cette nappe se trouve à une température moyenne de 57 °C.

Si on associe le débit d'exploitation de la nappe albiennne au débit total des sources thermales, cela représenterait, en termes de puissance, plus de 700 MW.

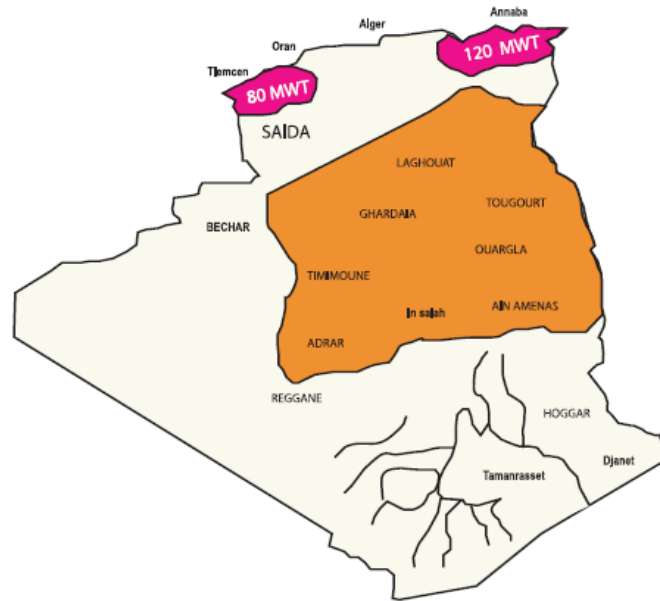


Figure I-5 : Carte géothermique de l'Algérie. Source CDER

### I.4.3. Potentiel de la Biomasse :

#### I.4.3.1. Potentiel de la forêt :

Géographiquement parlant, l'Algérie se subdivise en deux parties :

- Les régions selvatiques qui occupent 25.000.000 hectares environ, soit un peu plus de 10% de la superficie totale du pays.
- les régions sahariennes arides couvrant presque 90% du territoire.

Dans le nord de l'Algérie, qui représente 10% de la surface du pays, soit 2.500.000 hectares, la forêt couvre 1 800 000 hectares et les formations forestières dégradées en maquis 1 900 000 hectares.

Le pin maritime et l'eucalyptus sont des plantes particulièrement intéressantes pour l'usage énergétique : actuellement elles n'occupent que 5% de la forêt algérienne.

#### I.4.4. Potentiel hydroélectrique :

La part de capacité hydraulique dans le parc de production électrique total est de 5% ; soit 286 MW.

Cette faible puissance est due au nombre insuffisant des sites hydrauliques et à la non-exploitation des sites hydrauliques existants.

Dans les pays d'Afrique du Nord, la production d'électricité est principalement basée sur les combustibles fossiles.

L'Algérie présente la plus faible part d'énergies renouvelables (hydraulique) dans la structure de sa production électrique, plus de 99% de la production totale d'électricité provient des combustibles fossiles.

Le peu qui reste (0,7%) provient des énergies renouvelables qui se résument pratiquement à une production hydroélectrique.

#### **I.4.5. Le potentiel Solaire :**

L'Algérie dispose d'un des plus grands gisements solaires au monde, la durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara).

L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m<sup>2</sup> est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 kWh/m<sup>2</sup>/an au Nord et 2263 kWh/m<sup>2</sup>/an au sud du pays.

Les diverses études entreprises jusqu'à présent sur le potentiel énergétique solaire en Algérie font apparaître un potentiel considérable pour l'utilisation et l'exploitation de cette forme d'énergie. En effet, l'Algérie avec plus de deux millions de km<sup>2</sup> de superficie, reçoit l'équivalent de 300 milliards de tep par an en énergie solaire.

Consciente de l'intérêt grandissant de l'énergie solaire et de ses enjeux, l'Algérie a intégré dans sa politique énergétique le développement de ce créneau par : l'adoption d'un cadre juridique favorable à l'expansion de cette énergie, la planification d'importants projets d'hybridation de centrales diesel, le lancement de deux grands programmes d'électrification et la projection d'une usine de fabrication de modules photovoltaïques en est la parfaite illustration.

**Tableau I-1 : le potentiel solaire en Algérie.**

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

Cette richesse d'énergies renouvelables, donne à notre pays une longévité de consommation énergétique propre, dont le solaire prend la part du lion, les figures (I.8) et I.9, illustrent cette quantité énergétique au mois de juillet, contre le cas le plus défavorable, celle d'octobre.

Années

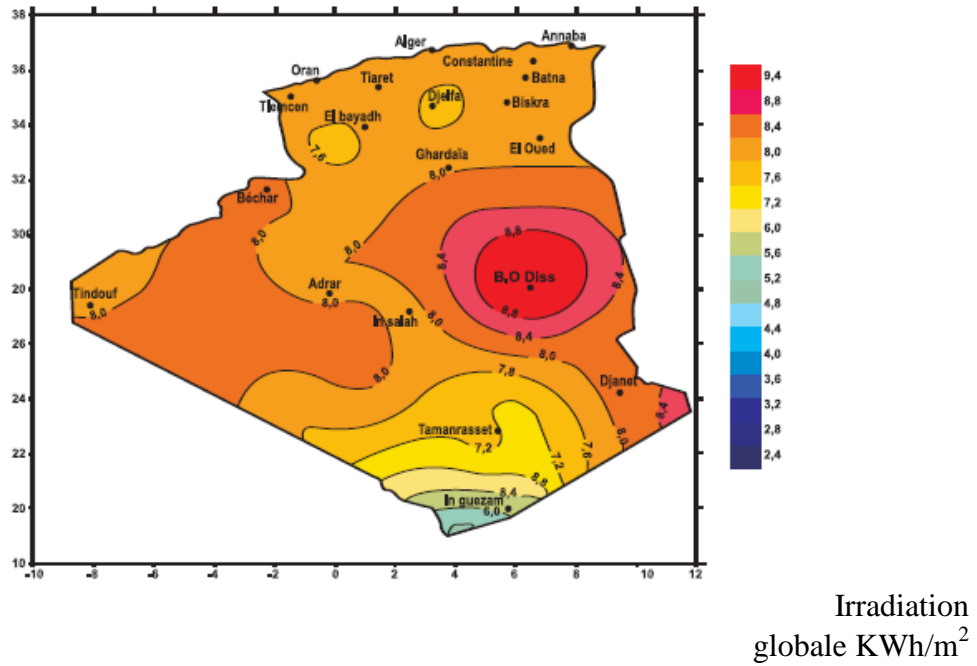


Figure I-6 : Irradiation globale journalière reçue sur plan horizontal au mois de juillet.

Années

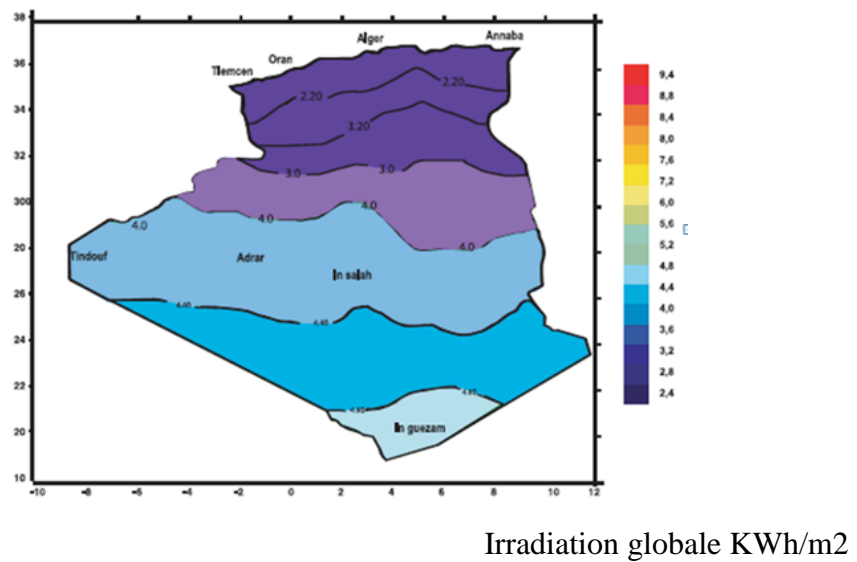


Figure I-7 : Irradiation globale journalière reçue sur plan horizontale au mois de décembre

Les projets des énergies renouvelables de production de l'électricité dédiés au marché national seront menés en deux étapes:

Première phase 2015 - 2020 : Cette phase verra la réalisation d'une puissance de 4000 MW, entre photovoltaïque et éolien avec une soixantaine de centrales, ainsi que 500 MW, entre biomasse, cogénération et géothermie.

Deuxième phase 2021 - 2030 : Le développement de l'interconnexion électrique entre le nord et le sud (Adrar), permettra l'installation de grandes centrales d'énergies renouvelables dans les régions d'In Salah, Adrar, Timimoun et Béchar et leur intégration dans le système énergétique national.

A cette échéance, le solaire thermique pourrait être économiquement viable.

La stratégie de l'Algérie en la matière vise à développer une véritable industrie des énergies renouvelables associée à un programme de formation et de recherche ainsi que l'acquisition de l'expérience nécessaire, qui permettra, à terme, d'employer le génie local algérien, pour toutes les phases de développement de ces domaines.

Le programme des énergies renouvelables, pour les besoins d'électricité du marché national, permettra la création de plusieurs dizaines de milliers d'emplois directs et indirects.

La production d'électricité est estimée atteindre 90 TWh en 2020 et à 170 TWh en 2030.

L'intégration du renouvelable dans le mix énergétique constitue un enjeu majeur en vue de préserver les ressources fossiles, de diversifier les filières de production de l'électricité et de contribuer au développement durable.

Toutes ces considérations justifient, dès aujourd'hui, la forte intégration des énergies renouvelables dans la stratégie d'offre énergétique à long terme, tout en accordant un rôle important à l'efficacité énergétique.

Associée au développement des énergies renouvelables, l'efficacité énergétique permet une réduction des investissements nécessaires à la satisfaction des besoins énergétiques, à travers une bonne maîtrise de la consommation et du rythme de croissance de la demande.

### I.5. Programme de développement des énergies renouvelables :

A travers le programme de développement des énergies renouvelables, l'Algérie s'est engagée sur la voie des énergies renouvelables afin d'apporter des solutions globales et durables aux défis environnementaux et aux problématiques de préservation des ressources énergétiques d'origine fossile.

Ce programme porte sur le développement du photovoltaïque et de l'éolien à grande échelle. L'introduction du solaire thermique (CSP) ainsi que les filières de la biomasse, de la cogénération et de la géothermie interviendra graduellement.

Les capacités et types d'énergies renouvelables seront installés selon les spécificités de chaque région:

- Région du Sahara, pour l'hybridation des centrales diesel existantes et l'alimentation des sites éparses compte tenu de l'important potentiel solaire et éolien existant au niveau de cette région;
- Région des Hauts Plateaux, pour son potentiel d'ensoleillement et d'exposition au vent, avec la disponibilité de terrains.
- Région du littoral selon la disponibilité des assiettes de terrain avec l'exploitation de tous les espaces où des potentiels renouvelables existent.

Par ailleurs, les besoins complémentaires pour d'autres domaines d'application font partie, également, de la capacité totale du photovoltaïque prévue dans le programme, tels que le résidentiel, l'agriculture, le pompage, les ressources en eau, l'industrie, l'éclairage public et les services.

**Tableau I-2 : les capacités cumulées du programme énergie renouvelable, par type et phase, sur la période 2015 - 2030**


	1 <sup>ère</sup> phase 2015-2020	2 <sup>ème</sup> phase 2021- 2030	TOTAL
<b>Photovoltaïque</b>	3000	10575	13575
<b>Eolien</b>	1010	4000	5010
<b>CSP</b>	-	2000	2000
<b>Cogénération</b>	150	250	400
<b>Biomasse</b>	360	640	1000
<b>Géothermie</b>	05	10	15
<b>TOTAL</b>	4525	17475	22000

Pour l'exportation de l'électricité verte, vers l'Europe, l'Algérie se prépare à entreprendre des partenariats dès que les conditions seront réunies, et ceci à travers la réalisation de capacités additionnelles.

Le tableau suivant résumé les Avantages et les Inconvénients de l'énergie renouvelable :

**Tableau I.3 : Les avantages et les inconvénients de l'énergie renouvelable**

<b>Les énergies</b>	<b>Les Avantages</b>	<b>Les inconvénients</b>
<b>l'énergie solaire</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-une bonne source d'énergie renouvelable.</li> <li>- une énergie non-polluante.</li> <li>-la lumière ne coute rien.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-A besoin de beaucoup d'espace.</li> <li>-le placement peut modifier l'énergie pris dans les panneaux.</li> <li>-panneau fragile.</li> </ul>
<b>l'énergie hydraulique</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- une énergie naturelle non-polluante.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- une perturbation de l'équilibre écologique.</li> <li>- grands barrage couteux.</li> </ul>
<b>L'énergie éolienne</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- il y a toujours du vent dans un même en droit, donc jour et nuit.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- un impact visuel.</li> <li>-Le prix.</li> <li>-la migration des oiseaux.</li> </ul>
<b>L'énergie géothermique</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-pollution non-toxique.</li> <li>-beaucoup d'énergie pour peu de place</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-répartitions des sources.</li> <li>-le transport de l'énergie.</li> <li>-installation couteuse.</li> </ul>
<b>l'énergie biomasse</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La biomasse participe au traitement et à la destruction des déchets organiques.</li> <li>-A l'heure où le prix des carburants ne cesse d'augmenter, cette énergie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La production de biocarburant a un prix conséquent. En plus elle n'est pas encore totalement développée.</li> <li>- Pour produire de la biomasse il faut des terres agricoles, sauf qu'il n'y en-a peu de disponible.</li> </ul>



	<p>serait une bonne alternative au pétrole.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Les ressources de la biomasse sont disponibles à grande échelle.</li> <li>- La biomasse est une ressource renouvelable lorsqu'utilisée et gérée de façon durable.</li> </ul>	<p>Les cultures vivrières devront donc être rachetées ou abandonnées au profit de la production de biocarburants.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- La biomasse peut être polluante si elle est mal utilisée. (Ex : Un hectare de sol absorbe normalement 4 tonnes de dioxyde de carbone par an alors qu'un hectare mal-labouré rejette 1 tonne de dioxyde de carbone par an).</li> </ul>
--	---	--

# Chapitre 02

## Energie Solaire

## II.1. Introduction :

L'énergie solaire occupe une place très importante parmi les différentes sources d'énergies renouvelables. Un effort accru existe depuis ces dernières décennies pour développer l'utilisation directe de cette forme d'énergie afin de la transformer en chaleur, en électricité ou en une forme d'énergie chimique plus facilement stockable (hydrogène par exemple).

Une connaissance précise de la distribution de l'irradiation solaire sur un site géographique particulier est d'une grande importance pour le dimensionnement des systèmes photo thermiques ou photovoltaïques.

Le manque de moyens de mesure et la non disponibilité de stations météorologiques à grande échelle, représentent des difficultés qui ont permis aux chercheurs d'établir des méthodes d'estimation du rayonnement solaire en se basant sur les données météorologiques.

## II.2. Le soleil

Le Rayonnement lumineux et la chaleur du soleil sont utilisés par les humains depuis l'antiquité, ce qui a abouti à une série de technologies qui n'ont cessé de se développer.

Le Rayonnement solaire, ainsi que les ressources à énergie solaire secondaires telles que l'énergie éolienne et marémotrice, l'énergie hydroélectrique et la biomasse, représentent la plupart de l'énergie renouvelable disponible sur terre.

Seule une minuscule part de l'énergie solaire disponible est utilisée.

La production d'électricité à énergie solaire repose sur des moteurs thermiques et sur l'effet photovoltaïque.

Les utilisations de l'énergie solaire n'ont de limites que celles du génie humain.

Pour ne citer que quelques-unes de ses applications :Le chauffage et la climatisation de locaux à travers une architecture solaire, la création d'eau potable via la distillation et la désinfection la domestication de la lumière du jour, l'eau chaude solaire, la cuisson solaire et la production de chaleur haute température à des fins

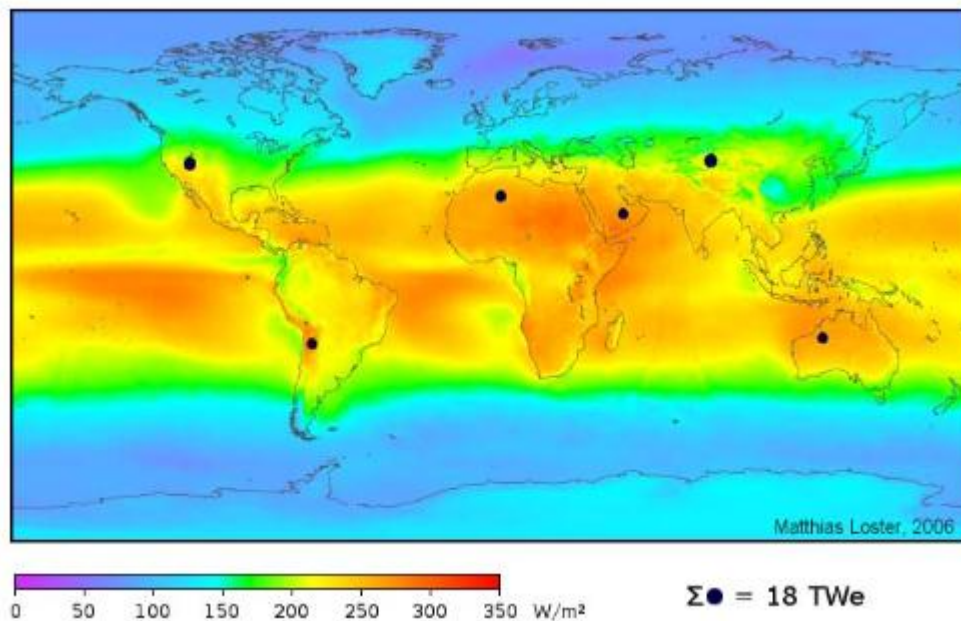
industrielles. Pour Collecter l'énergie solaire, le moyen le plus courant est d'utiliser des panneaux solaires.

### II.2.1. Les Technologies solaires

Sont largement caractérisées comme étant soit solaires passives, soit solaires actives selon la façon dont elles capturent, transforment et distribuent l'énergie solaire.

Les Techniques solaires actives incluent l'utilisation de panneaux photovoltaïques et de capteurs solaires pour exploiter l'énergie.

Les Techniques solaires passives incluent le fait d'orienter un bâtiment vers le soleil, de choisir des matériaux présentant une masse thermique ou des propriétés de dispersion de la lumière favorables, et de concevoir des locaux qui laissent circuler l'air naturellement [5].



**Figure II-1: la distribution de L'ensoleillement qui frappe sur le monde**

L'ensoleillement qui frappe les régions sous les points noirs pourrait alimenter en énergie le monde entier: Si elles étaient installées dans les zones marquées par les six points sur la carte, des cellules solaires avec un rendement de conversion de seulement 8 % produiraient, en moyenne, 18 TW d'énergie électrique.

C'est plus que l'énergie totale actuellement disponible grâce à toutes nos sources d'énergie principales, y compris le charbon, le pétrole, le gaz, le nucléaire et l'hydraulique.

Les Couleurs indiquent le rayonnement solaire, en moyenne, sur trois ans, en tenant compte des nuits et de la couverture nuageuse

### II.2.2 L'origine du soleil

Le soleil est une sphère avec une matière extrêmement chaude et gazeuse avec un diamètre de  $1,39.10^9$  m et est à distance moyenne de  $1,49 \times 10^{11}$  m de la terre.

Il présente en effet, un réacteur de fusion continu avec ses constituants sous forme gazeuse retenue par des forces gravitationnelles, plusieurs réactions de fusion sont déclenchées pour intensifier l'énergie rayonnée par le soleil qui est de  $234.4 \times 10^{26}$  joule/minute.

Le processus le plus important est la transformation de l'hydrogène en hélium par une réaction thermonucléaire.

L'énergie produite à l'intérieur de la sphère solaire à une température de l'ordre de plusieurs millions de degrés est transférée à la surface extérieure puis transférée par rayonnement dans l'espace.

La constante solaire est l'énergie solaire reçue par unité de temps et unité de surface d'une superficie perpendiculaire à la direction de propagation du rayonnement solaire, sa valeur est estimée à  $1367 \text{ W/m}^2$  [6].

### II.2.3 Coordonnées horizontales

#### II.2.3.1. L'azimut du soleil (a)

C'est l'angle que fait sur le plan horizontal la projection de la direction du soleil avec la direction du sud. Cet angle (a) est noté avec les mêmes conventions que l'azimut du plan  $\alpha$ .

#### II.2.3.2. La hauteur du soleil (h)

C'est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le plan horizontal, elle varie entre  $90$  (Zénith) et  $-90$  (Nadir).

La hauteur du soleil varie à chaque instant de la journée et de l'année selon la relation suivante :

$$\sin(h) = \cos(\delta) \cdot \cos(\varphi) \cdot \cos(H) + \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) \dots\dots\dots(\text{II.1})$$

$h > 0$  correspond au jour

$h < 0$  correspond à la nuit

$h = 0$  correspond au lever et au coucher du soleil

Les coordonnées horizontales sont illustrées sur la figure (II.2)

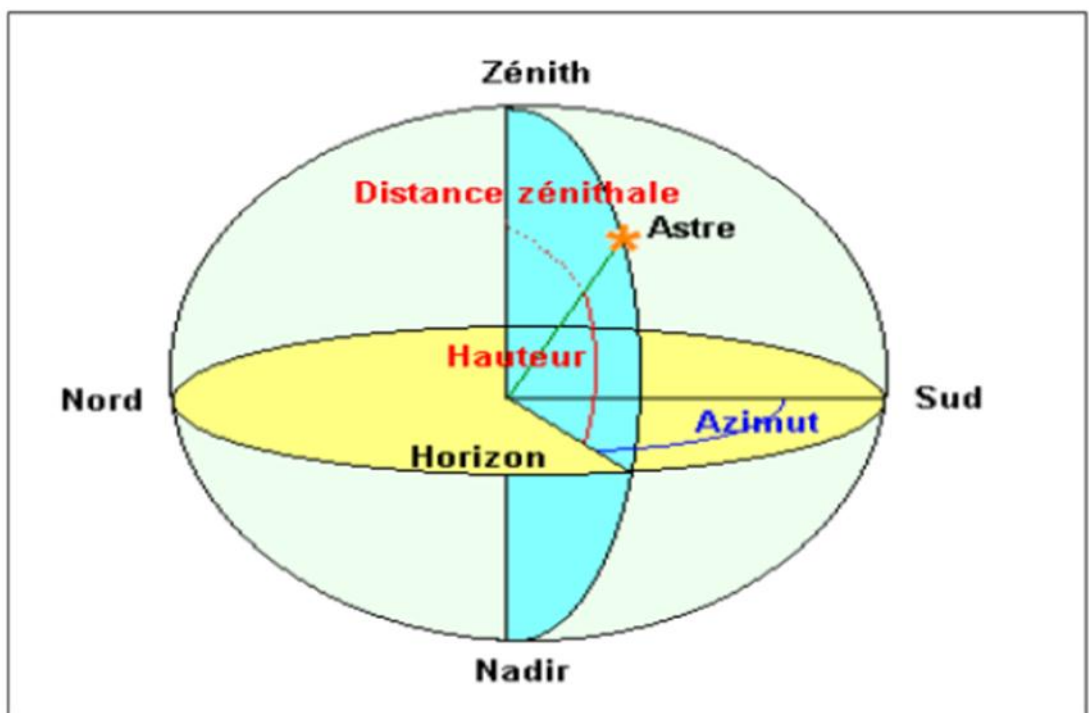


Figure II-2: Coordonnées horizontales

**II.2.4. Coordonnées équatoriales**

**II.2.4.1. L'angle horaire (H)**

C'est l'angle que font sur le plan équatorial les projections de la direction du soleil et de la direction du sud pour le lieu considéré figure (II.3).

Il rend compte de la rotation quotidienne de la terre autour de l'axe des pôles et on a la relation:

1 heure de temps = 150d'angle horaire [7].

$H < 0$  le matin

H > 0 après midi

H = 0 à midi.

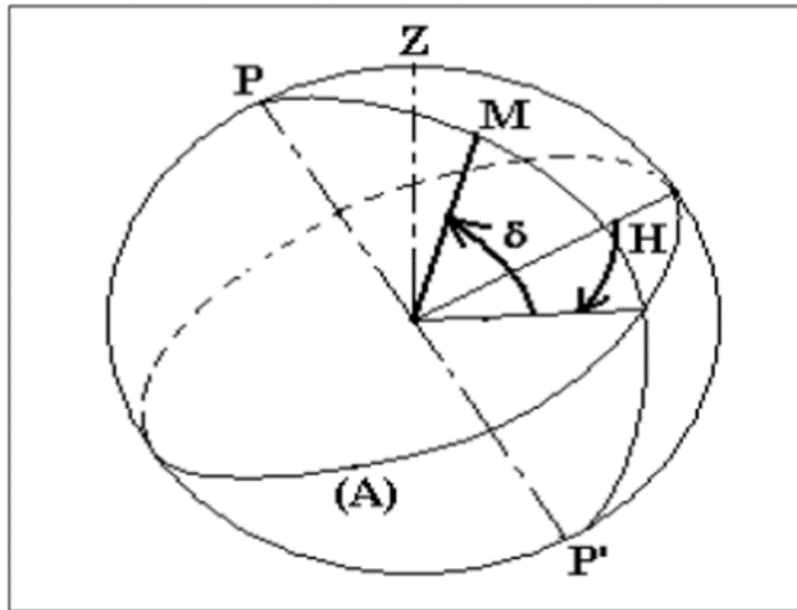


Figure II-3: Coordonnées équatoriales. source [Web].

**II.2.4.2. La déclinaison du soleil δ :**

C'est l'angle de la direction du soleil avec le plan équatorial (Figure (I.3)), δ varie entre deux valeurs extrêmes :  $-\delta_0 \leq \delta \leq \delta_0$ , Avec  $\delta_0 = 23^\circ 27'$ . La déclinaison δ (N), en fonction du jour de l'année, est représentée par la formule approchée suivante:

$$\sin(\delta) = 23.45 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{365} \cdot (284 + N)\right) \dots\dots\dots (II.2)$$

La déclinaison varie sinusoidalement au cours de l'année.

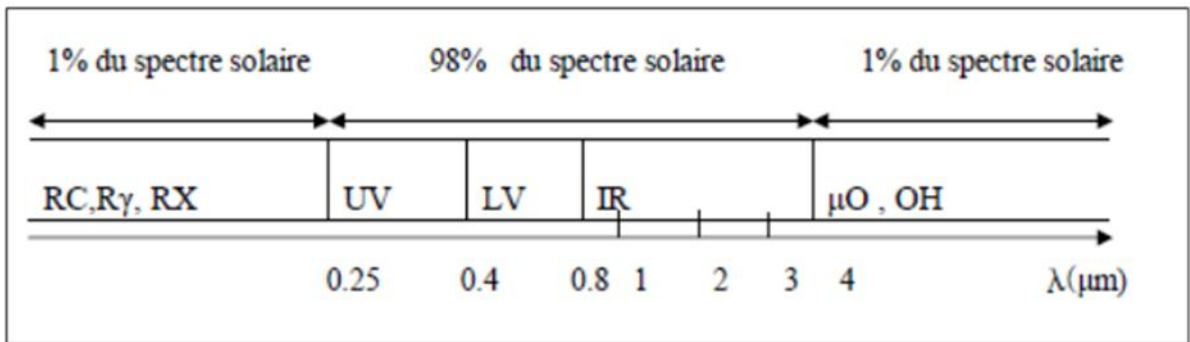
Elle est maximum (23.27') le 22 juin, au solstice d'été; minimum (-23.27') le 21 décembre, au solstice d'hiver. Aux périodes de solstice, les variations de la déclinaison sont la déclinaison est nulle le 21 mars et le 23 septembre, aux équinoxes de printemps et d'automne, périodes de variation rapide de la déclinaison faibles d'un jour à l'autre.

**II.2.5. Spectre du rayonnement solaire**

Le rayonnement solaire est la lumière qui provient du soleil sous forme d'onde électromagnétique dont 98% d'énergie est comprise entre  $\lambda = 0,25\mu\text{m}$  et  $\lambda = 4\mu\text{m}$ , le reste représente 1% au-dessus et 1% au-dessous de cet intervalle (Figure II.4).

La répartition d'énergie en fonction de la longueur d'onde est :

- Pour  $0,25 \mu\text{m} < \lambda < 0,4\mu\text{m}$  : c'est le domaine de l'ultraviolet (invisible), il représente 7 % de l'énergie totale émise par le soleil.
- Pour  $0,4 \mu\text{m} < \lambda < 0,8\mu\text{m}$  : c'est le domaine du visible, il représente 47,5 % de l'énergie totale émise par le soleil.
- Pour  $0,8 \mu\text{m} < \lambda < 4 \mu\text{m}$  : c'est le domaine de l'infrarouge (invisible), il représente 45,5 % de l'énergie totale émise par le soleil.



**Figure II-4: Spectre électromagnétique. source [Web]**

Le rayonnement solaire est assimilable à celui d'un corps noir à la température  $T = 5800\text{K}$  dans l'intervalle du spectre  $[0,25\mu\text{m} - 4\mu\text{m}]$ .

L'énergie rayonnée par le soleil n'est pas uniformément répartie pour toutes les longueurs d'onde, elle passe par un maximum pour une longueur d'onde donnée par la loi de WIEN :

$$\lambda_m.T = 2898 \mu\text{m.K} \dots\dots\dots (II.3)$$

Pour :  $T = 5800 \text{ K}$ , la longueur d'onde maximale est,  $\lambda_m \approx 0,5\mu\text{m}$

**II.2.6. Energie reçue par une surface horizontale située à l'extérieur de l'atmosphère**

Le rayonnement hors atmosphère ou rayonnement extra-terrestre, reçu sur un plan horizontal en un point M de la terre est le rayonnement qui serait reçu sur une

surface horizontale en un point M s'il n'y avait pas d'atmosphère ou bien c'est le rayonnement reçu en un point M' situé à la limite de l'atmosphère à la verticale de M. L'intensité de ce rayonnement vaut:  $I_0 = 1367 \text{ W/m}^2$ .

Cette quantité c'est la constante solaire, c'est la puissance incidente hors atmosphère sur une surface de  $1\text{m}^2$  perpendiculaire au rayon du soleil à la distance  $d = 1\text{UA}$  du soleil [7].

Cependant l'intensité de l'éclairement reçu par terre varie autour de cette valeur au cours de l'année puisque la distance terre-soleil change.

La constante solaire sera affectée d'un facteur de correction C (N) défini comme la correction de la distance terre-soleil. La puissance de ce rayonnement par unité de surface horizontale (normale au rayonnement) est notée par  $g_n$  [ $\text{W/m}^2$ ], elle exprimée par la relation suivante:

$$g_n^e = C(N). I_0 \dots \dots \dots \text{(II.4)}$$

$$g_n^e = I_0 \left[ 1 + 0.034 \cos \left( \frac{2\pi(N-2)}{365} \right) \right] \dots \dots \dots \text{(II.5)}$$

L'énergie du rayonnement reçue par une surface réceptrice horizontale, hors atmosphère notée  $G_{horz}$  [ $\text{Wh/m}^2$ ], présente l'intégrale de la puissance du rayonnement.

Par unité de surface entre le lever et le coucher du soleil, elle est donne la formule suivante :

$$G_{horz}^e = \frac{24}{\pi} g_n^e \cdot [\cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(H_0) + \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) \cdot H_0] \dots \dots \text{(II.6)}$$

Avec:

$H_c$  désigne le coucher du soleil, il est exprimé par la relation suivante:

$$H_c = \arccos (-\text{tg}(\delta) \cdot \text{tg}(\varphi))$$

$\varphi$ : Latitude du lieu

$\delta$ : Déclinaison du soleil

**II.2.7. Type de l'énergie solaire**

**II.2.7.1. Energie solaire Photovoltaïque**

Le phénomène photovoltaïque est la transformation directe de la lumière en électricité à l'échelle atomique.

Certains Matériaux se caractérisent par une propriété connue sous le nom d'effet photoélectrique qui leur fait absorber les photons de la lumière et libérer des électrons.

Lorsque ces électrons libres sont capturés, il en résulte un courant électrique qui peut être utilisé comme de l'électricité [8].

### II.2.7.2. Energie solaire thermique

L'énergie solaire thermique est une forme d'énergie solaire.

Elle désigne l'utilisation de l'énergie thermique du rayonnement solaire dans le but d'échauffer un fluide (liquide ou gaz).

L'énergie reçue par le fluide peut être ensuite utilisée directement (eau chaude sanitaire, chauffage, etc.) ou indirectement (production de vapeur d'eau pour entraîner des alternateurs et ainsi obtenir de l'énergie électrique, production de froid, etc.).

L'énergie solaire thermique provient de la chaleur transmise par le soleil par rayonnement et ne doit pas être confondue avec d'autres formes d'énergie solaire et notamment l'énergie solaire photovoltaïque qui utilise l'effet photoélectrique afin de transformer les photons émis par le soleil en électricité.

Le capteur solaire est l'instrument utilisé pour transformer le rayonnement solaire en chaleur.

Les principes physiques fondamentaux sur lesquels se basent cette production d'énergie sont notamment l'absorption, et la conduction thermique.

Dans le cas particulier des systèmes à concentration (centrale solaire thermodynamique, four solaire, etc.), la réflexion joue aussi un rôle important[6].

#### II.2.7.2.1. Intérêt du solaire thermique

Le captage de l'énergie solaire thermique à plusieurs avantages :

- Chauffage : Les capteurs destinés au chauffage sont relativement simples, rustiques et durables.
- Électricité :
  - ✓ Les systèmes de turbine à vapeur classiquement utilisés reposent sur des composants parfaitement sûrs et éprouvés ;

- ✓ Dans les zones très ensoleillées, la rentabilité est prouvée : une centrale solaire thermique est au Maroc amortie au niveau énergétique en 5 mois (c'est-à-dire qu'elle aura produit plus d'énergie qu'en a nécessité sa construction et son démarrage, ce qui est comparable à l'éolien (4 à 7 mois), mais bien plus rapide que les modules photovoltaïques en silicium (qui nécessitent actuellement encore 3 à 5 ans pour rembourser leur dette énergétique, mais qui nécessiteront moins de frais et de travail pour leur entretien et fonctionnement).
- ✓ Fort potentiel de développement dans plusieurs pays en développement, avec impact a priori modéré sur l'environnement (déserts, zones arides, etc.). Selon le DLR, une capacité de plus de 3 GW est réaliste en Europe, et de 15 GW pour toute la planète<sup>4</sup>.
- Purification de l'eau : Le distillateur solaire peut fournir de l'eau potable en suffisance dans les zones tropicales et subtropicales.

### II.3. Moyen naturel

La plus grande partie de l'utilisation de l'énergie solaire est consacrée au réchauffement de la terre, ce qui rend possibles les formes connues d'existence biologique à proximité de la surface, suivie par la photosynthèse des plantes.

La plupart des organismes, y compris les humains, dépendent soit directement (en tant qu'herbivores), soit indirectement (en tant que carnivores) de l'énergie solaire.

Le combustible et les matériaux de construction en découlent également. Par ailleurs, l'énergie solaire est responsable des différences de pression d'air dans l'atmosphère, qui sont à l'origine du vent.

Enfin, le cycle hydrique de la terre est entraîné par l'énergie solaire.

Outre ces « effets » naturels, il existe de plus en plus d'applications techniques, en particulier dans le domaine de l'approvisionnement énergétique.



## II.4. Applications Techniques de l'énergie solaire:

En s'appuyant sur la technologie solaire, l'énergie solaire peut être profitable de plusieurs façons :

- Les Cellules solaires produisent de l'électricité à courant continu (photovoltaïque)
- Les Panneaux solaires génèrent de la chaleur (thermo solaire)
- Les Centrales héliothermiques génèrent de l'électricité à partir de la chaleur et de la vapeur
- Les plantes et les déchets végétaux peuvent être traités pour produire des liquides exploitables (par ex. éthanol, huile de colza) ou des gaz (comme du biogaz)
- Les centrales éoliennes et hydroélectriques génèrent de l'électricité (voir l'article sur l'énergie éolienne et l'énergie hydraulique)
- Les cuisinières solaires ou les fours solaires permettent de réchauffer les aliments ou de stériliser les équipements médicaux

# Chapitre 03

## Panneaux photovoltaïques

### III.1. Introduction

Les systèmes photovoltaïques transforment directement la lumière du soleil en électricité, et ce silencieusement et sans pièce mécanique en mouvement.

Les cellules photovoltaïques exploitent les propriétés semi-conductrices de certains matériaux comme le silicium. Soumises à la lumière, elles produisent un courant électrique continu. Si nécessaire, il peut être transformé en courant alternatif selon les caractéristiques des applications électriques à raccorder.

Les systèmes photovoltaïques peuvent ainsi alimenter de petits équipements portables (montres, calculatrices, ...), des applications en site isolé (habitations éloignées du réseau électrique, équipements de télécommunication, électrification rurale), ou être raccordées au réseau électrique.

La simplicité de l'installation, la facilité d'exploitation et le caractère silencieux de la production électrique sont des atouts considérables pour des applications dans le bâtiment.

### III.2. Le principe de l'effet photovoltaïque

C'est un phénomène physique qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière.

La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température et de vieillissement de la cellule[9].

### III.3. La cellule photovoltaïque

#### III.3.1 Définition d'une cellule solaire

La cellule photovoltaïque ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque.

Elle est composée de matériau semi-conducteur et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique.

Les cellules photovoltaïques sont constituées :

- D'une couche antireflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires.
- D'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode.
- Les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement.

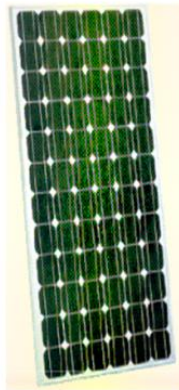
L'énergie solaire photovoltaïque désigne l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque. Plusieurs cellules sont reliées entre elles et forment un panneau solaire (ou module) photovoltaïque.

Plusieurs modules qui sont regroupés dans une centrale solaire photovoltaïque sont appelés champ photovoltaïque.

Le terme photovoltaïque peut désigner soit le phénomène physique - l'effet photovoltaïque - ou la technologie associée [9].



*cellule photovoltaïque*  
(monocristalline)



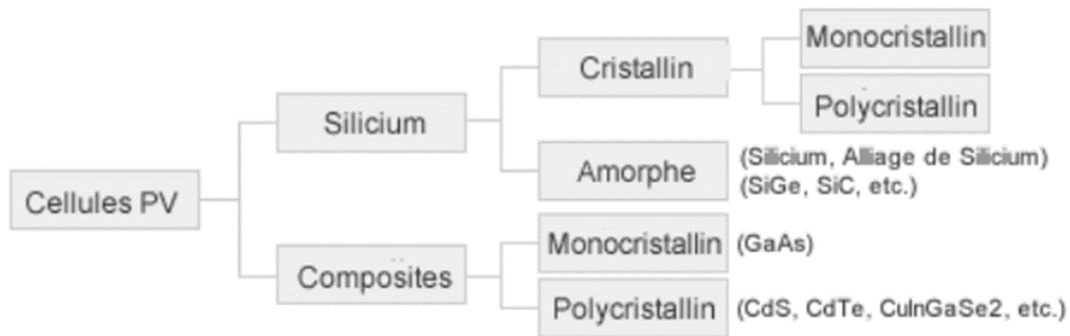
*Panneau photovoltaïque*



*Champ photovoltaïque*

**Figure III-1: Cellule, panneau, champ photovoltaïque**

### III.3.2. Les différentes technologies :



**Figure III-2: Type de cellule photovoltaïque.**

Il existe un grand nombre de technologies mettant en œuvre l'effet photovoltaïque.

Beaucoup sont encore en phase de recherche et développement. Les principales technologies industrialisées en quantité à ce jour sont : le silicium mono ou poly-cristallin (plus de 80% de la production mondiale) et le silicium en couche mince à base de silicium amorphe ou CIS (Cuivre Indium Sélénium)

### III.3.3. Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque

Il existe de nombreux paramètres qui permettent de caractériser une cellule solaire.

Ces paramètres sont appelés paramètres photovoltaïques et sont déduits de la caractéristique I(V).

La figure (III.3) représente une caractéristique courant-tension I(V) dans le noir et sous illumination typique d'une cellule photovoltaïque à jonction PN.

Le tracé de cette courbe permet d'accéder à bon nombre de paramètres physiques caractéristiques du composant.

Les premiers paramètres qui apparaissent sur la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque sont le courant de court circuit ( $I_{cc}$ ), la tension à circuit ouvert ( $V_{co}$ ) et le facteur de forme FF du composant.

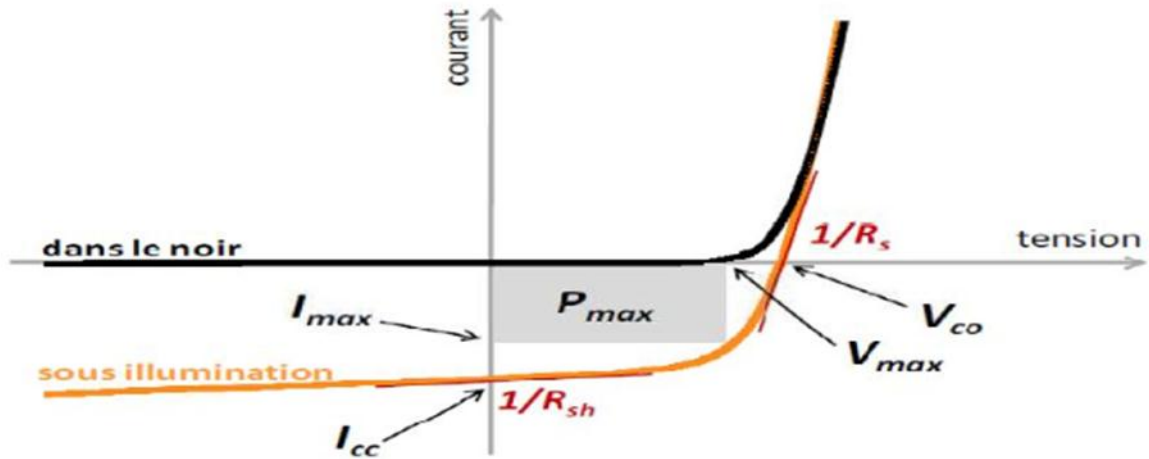


Figure III-3 : Caractéristique courant-tension et paramètres physiques d'une cellule photovoltaïque.

**III.3.3.1. Le courant de court-circuit (I<sub>cc</sub>)**

Il s'agit du courant lorsque le potentiel appliqué à la cellule est nul. C'est le plus grand courant que la cellule peut fournir.

Celui-ci est en fonction de la température, de la longueur d'onde du rayonnement, de la surface activé de la cellule, de la mobilité des porteurs. Ce courant est linéairement dépend de l'intensité lumineuse reçue [10].

**III.3.3.2. Tension du circuit-ouvert (V<sub>co</sub>)**

Comme son nom indique, c'est la tension aux bornes de la cellule lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge ou lorsqu'elle est connectée à une charge de résistance infinie.

Elle dépend essentiellement du type de cellule solaire (jonction PN, jonction Schottky), des matériaux de la couche active et de la nature des contacts de la couche active-électrode. Elle dépend de plus de l'éclairement de la cellule [11].

$$V_{co} = \frac{K.T_c}{q} \log \frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \dots\dots\dots (III.1)$$

Avec:

$K.T_c/q$  : Représentant la potentielle thermodynamique.

K: La constante de Boltzmann ( $1,381. 10^{-23}$  Joule/Kelvin).

$q$ : La charge d'un électron.

$T_c$ : La température absolue.

$I_s$ : Le courant de saturation.

$I_{ph}$ : Le courant photonique

Deux régimes peuvent être observés suivant le degré d'éclairement figure(III.4)

Régime des faibles flux lumineux : dans ce cas,  $I_{ph} \ll I_s$ , ce qui permet d'écrire:

$$\log \frac{I_{ph}}{I_s} + 1 = \frac{I_{ph}}{I_s} \dots \dots \dots (III. 2)$$

D'où :

$$V_{CO} = \frac{K \cdot T_c}{q} \cdot \frac{I_{ph}}{I_s} \dots \dots \dots (III. 3)$$

C'est la zone de comportement linéaire de la cellule. la formule précédente peut s'écrire aussi :

$$V_{CO} = R_0 \cdot I_{ph} \quad \text{En posant} \quad R_0 = \frac{K \cdot T_c}{q \cdot I_s}$$

$R_0$ : Est la résistance interne de la diode en polarisation externe nulle (circuit ouvert) est sous faible flux lumineux.

- Régime des flux lumineux suffisamment intenses pour que  $I_{ph} \gg I_s$ , soit :

$$\frac{I_{ph}}{I_s} \gg 1$$

D'où:

$$V_{CO} = \frac{K \cdot T_c}{q} \log \frac{I_{ph}}{I_s} \dots \dots \dots (III.4)$$

C'est le domaine du comportement logarithmique (figure III.4):

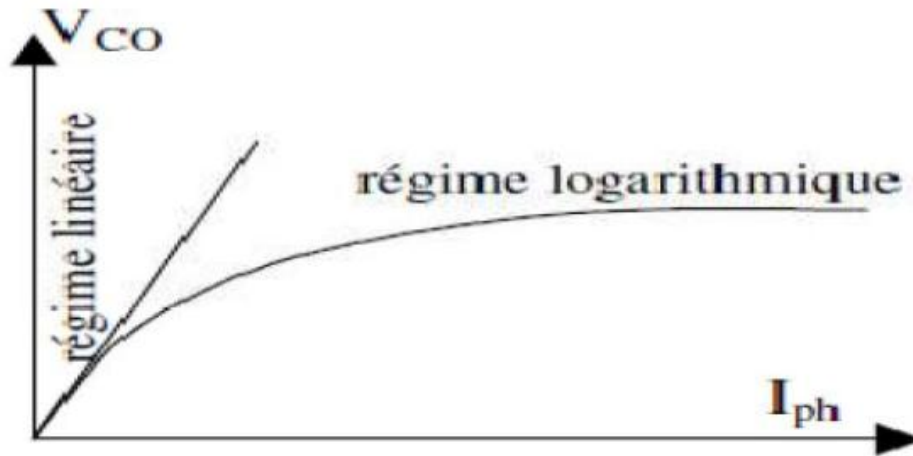


Figure III-4 : Différents régimes selon la puissance d'éclairement.

Il est important de remarquer que cette tension augmente avec le log d' $I_{ph}$ , donc avec le log de l'illumination. En revanche, elle décroît avec la température, malgré le terme  $K.T_{C/q}$ .

En effet, le courant de saturation,  $I_s$  dépend de la surface de la diode (donc de la cellule) et des caractéristiques de la jonction : il varie exponentiellement avec la température et cette dépendance en température compense largement le terme  $K.T_{C/q}$

Donc la tension de circuit ouvert  $V_{CO}$  baisse avec la température, ce qui est important dans le dimensionnement des systèmes.

**III.3.3.3. Le Facteur de forme :**

Un paramètre important souvent utilisé à partir de la caractéristique  $I(V)$  pour qualifier la qualité d'une cellule ou d'un générateur photovoltaïque : c'est le facteur de remplissage ou « fill factor (FF) ». Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée  $P_{max}$  et la puissance formée par le rectangle  $I_{cc} * V_{co}$ . Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable ne le sera également. Les meilleures cellules auront donc fait l'objet de compromis technologiques pour atteindre le plus possible les caractéristiques idéales [10].

Il est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{CO}I_{CC}} \dots \dots \dots (III.5)$$

La puissance des modules photovoltaïques s'exprime en Watts-Crète. Cette dernière représente la puissance qui peut fournir un module lorsqu'il est fermé sur sa charge nominale (optimale), sous un éclairement de  $1000\text{W/m}^2$  et à une température de  $25^\circ\text{C}$

#### III.3.3.4. Le rendement :

Le rendement  $\eta$  des cellules photovoltaïques désigne le rendement en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente  $P_{in}$ :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{FF \cdot I_{cc} \cdot V_{co}}{P_{in}} \dots \dots \dots (III.6)$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert.

Le rendement de conversion est un paramètre essentiel.

En effet, la seule connaissance de sa valeur permet d'évaluer les performances de la cellule.

#### III.3.4. Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique.

Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants :

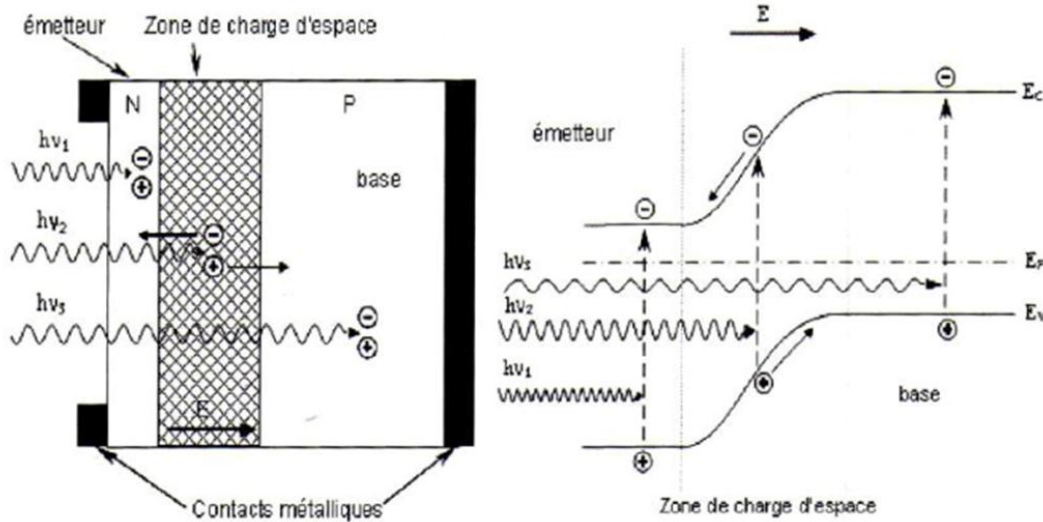
- Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif ;
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création des paires électron/trou dans le matériau semi-conducteur;
- Collecte des particules générées dans le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

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

Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électron/trou créés est nécessaire.

Pour cela on utilise le plus souvent une jonction P-N. d'autres structures, comme les hétérojonctions et les Schottky sont également être utilisées.

Le fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la figure (III.5)



**Figure III-5: Structure (gauche) et diagramme de bande (droite) d'une cellule photovoltaïque. Les dimensions respectives de différentes zones ne sont pas respectées.**

Les photons incidents créent des porteurs dans les zones N et P et dans la zone de charge d'espace. Les photo-porteurs auront un comportement différent suivant la région : Dans la zone N ou P, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace, sont envoyés par le champ électrique dans la zone P (pour les trous) ou dans la zone N (pour les électrons) ou ils seront majoritaires.

On aura un photo-courant de diffusion.

Dans la zone de charge d'espace, les paires électron/trou créés par les photons incidents sont dissociés par le champ électrique : les électrons vont aller vers la région N, les trous vers la région P. on aura un photo-courant de génération [12].

## III.3.4.1. Les modules photovoltaïques au silicium

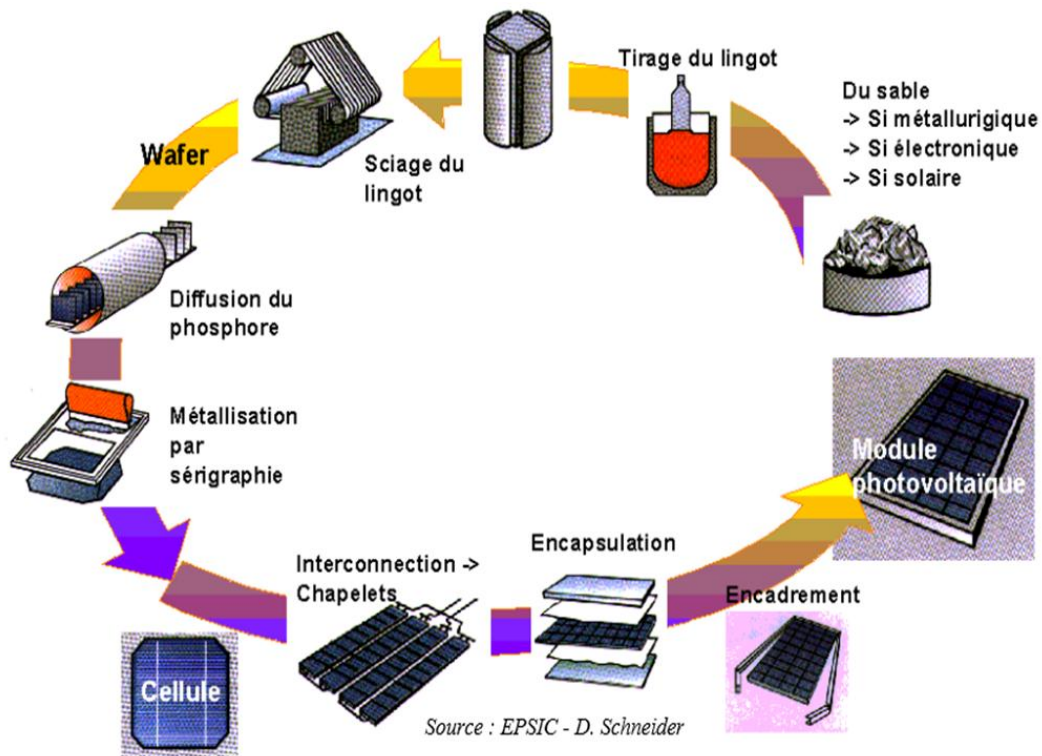


Figure III-6 : Processus de fabrication. Source : EPSIC - D. Schneider

Le Silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques disponibles à un niveau industriel.

Le silicium est fabriqué à partir de sable quartzeux (dioxyde de silicium).

Celui-ci est chauffé dans un four électrique à une température de 1700 °C. Divers traitements du sable permettent de purifier le silicium.

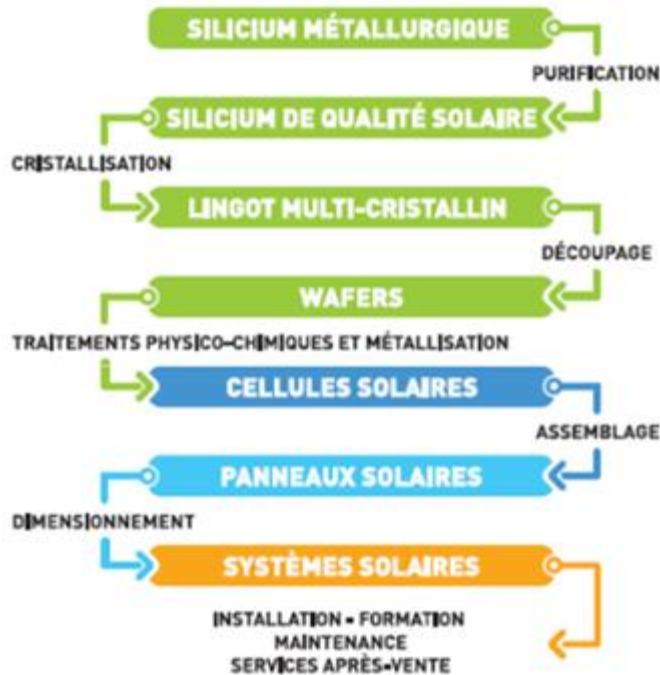
Le produit obtenu est un silicium dit métallurgique, pur à 98% seulement.

Ce silicium est ensuite purifié chimiquement et aboutit au silicium de qualité électronique qui se présente sous forme liquide, puis coulé sous forme de lingot suivant le processus pour la cristallisation du silicium, et découpé sous forme de fines plaquettes (wafers) [13].

Par la suite, ce silicium pur va être enrichi en éléments dopants (P, As, Sb ou B) lors de l'étape de dopage, afin de pouvoir le transformer en semi-conducteur de type P ou N.

La diffusion d'éléments dopants (bore, phosphore) modifie l'équilibre électronique de ces plaquettes (wafers), ce qui les transforme en cellules sensibles à la lumière.

La production des cellules photovoltaïques nécessite de l'énergie, et on estime qu'une cellule photovoltaïque doit fonctionner pendant plus de deux ans pour produire l'énergie qui a été nécessaire à sa fabrication [14].






**Figure III-7** La Chaîne Du Photovoltaïque Technologie Du Silicium Cristallin. Source : Teneosol

Les Cellules monocristallines et polycristallines sont fragiles.

Elles sont donc placées entre deux plaques de verre (encapsulation) afin de former un module.

Le matériau de base est le silicium qui est très abondant, mais la qualité nécessaire pour réaliser les cellules doit être d'une très grande pureté et son coût intervient de façon importante dans le coût de revient total.

La pénurie actuelle (2006) de silicium de qualité, a créé une tension sur le marché et une augmentation du prix des cellules.

 <p>Les panneaux PV avec des <b>cellules monocristallines</b> sont les photopiles de la première génération, elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal. Son procédé de fabrication est long et exigeant en énergie; plus onéreux, il est cependant plus efficace que le silicium polycristallin. Du silicium à l'état brut est fondu pour créer un barreau. Lorsque le refroidissement du silicium est lent et maîtrisé, on obtient un mono-cristal. Un Wafer (tranche de silicium) est alors découpé dans le barreau de silicium. Après divers traitements (traitement de surface à l'acide, dopage et création de la jonction P-N, dépôt de couche anti-reflet, pose des collecteurs), le wafer devient cellule. Les cellules sont rondes ou presque carrées et, vues de près, elles ont une couleur uniforme. Elles ont un rendement de 12 à 18%, mais la méthode de production est laborieuse.</p>	 <p>Les panneaux PV avec des <b>cellules polycristallines</b> sont élaborés à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vus de près, on peut voir les orientations différentes des cristaux (tonalités différentes). Elles ont un rendement de 11 à 15%, mais leur coût de production est moins élevé que les cellules mono-cristallines. Ces cellules, grâce à leur potentiel de gain de productivité, se sont aujourd'hui imposées. L'avantage de ces cellules par rapport au silicium monocristallin est qu'elles produisent peu de déchets de coupe et qu'elles nécessitent 2 à 3 fois moins d'énergie pour leur fabrication. Le wafer est scié dans un barreau de silicium dont le refroidissement forcé a créé une structure poly-cristalline. Durée de vie estimée : 30 ans. <i>Un cristal est un solide avec des façades polygonales, plus ou moins brillant, à structure régulière et périodique, formée d'un empilement ordonné d'un grand nombre d'atomes, de molécules ou d'ions.</i></p>	 <p>Les modules photovoltaïques <b>amorphes</b> ont un coût de production bien plus bas, mais malheureusement leur rendement n'est que 6 à 8% actuellement. Cette technologie permet d'utiliser des couches très minces de silicium qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide. Le rendement de ces panneaux est moins bon que celui des technologies polycristallines ou monocristallines. Cependant, le silicium amorphe permet de produire des panneaux de grandes surface à bas coût en utilisant peu de matière première. <i>Nota : En chimie, un composé amorphe est un composé dans lequel les atomes ne respectent aucun ordre à moyenne et grande distance, ce qui le distingue des composés cristallisés. Les verres sont des composés amorphes.</i></p>
--	---	--

Les cellules PV au silicium cristallin (mono ou multi) représentent la majorité de la production mondiale (29 et 51% de la production mondiale)

#### III.4.2. Les autres modules photovoltaïques composites et organiques

Plusieurs technologies des cellules photovoltaïques autres que la technologie

« Silicium » existent mais ne sont pas représentatives de la production actuelle mais plutôt du domaine de la recherche. Voici quelques-unes d'entre-elles.

#### III.3.4.3. Thin film au silicium amorphe ou CIS (cuivre-indium-sélénium)

Le thin film met en œuvre 1% seulement du silicium utilisé pour la fabrication de modules cristallins équivalents.

Les cellules thin film sont plutôt utilisées pour des applications « courant faible ».

Elles sont également souvent utilisées là où un fort échauffement des modules est à prévoir car le rendement ne chute pas avec la température.

Cependant, le rendement est de l'ordre de plus de 2 fois inférieur à celui du silicium cristallin et nécessite donc plus de surface pour la même puissance installée. Il y a un risque de toxicité vis-à-vis de l'environnement pour les modules CIS qui présentent un meilleur rendement que l'amorphe pur.

#### III.3.4.4. Les modules PV double face

Certains fabricants proposent des panneaux solaires comportant des cellules solaires sur les deux faces, sur la face avant exposée au soleil et sur la face arrière du panneau.

Les cellules sont en général montées sur une vitre, encapsulées dans un cadre aluminium. ces panneaux sont adaptés aux sites ayant des albédos importants des lacs, mers, les déserts, les surfaces enneigées.

La puissance du module double face est le double de la puissance du même module simple face mais l'énergie moyenne annuelle produite par le module double face n'est que supérieure que de 10 % plus élevée à celle produite par le même module simple face (le coût d'investissement par contre a presque doublé) [15].

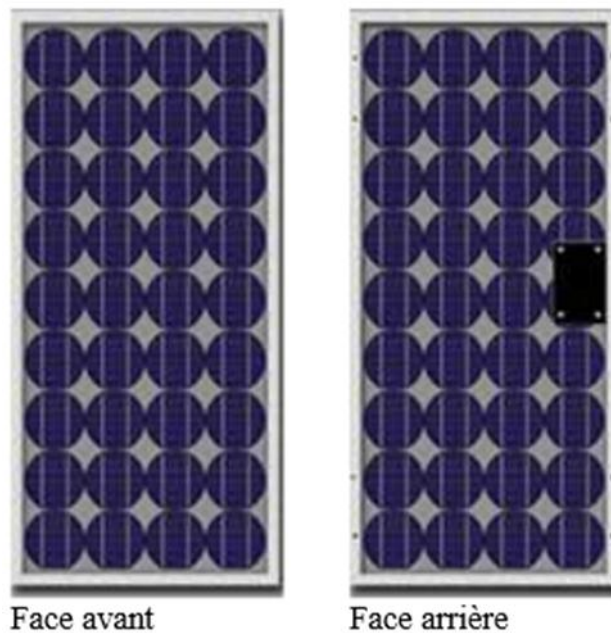


Figure III-8 : Face avant et arrière de panneau photovoltaïque.

### III.3.4.5. Principe de fonctionnement :

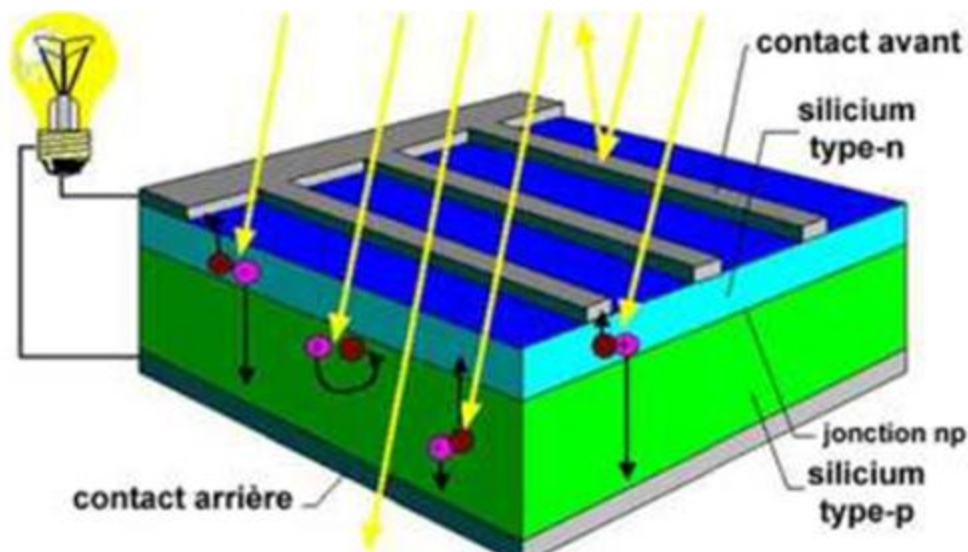
L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière.

Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p.

Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p.

La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement.

Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p. une jonction PN a été formée.



**Figure III-9 : Structure d'une cellule photovoltaïque. Source : CNRS**

Lorsqu'un matériau est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont " bombardés " par les photons constituant la lumière ; sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être " arrachés / décrochés " : si

l'électron revient à son état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau.

L'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique.

Par contre, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons " décrochés " créent une tension électrique continue faible.

Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique : c'est l'effet photovoltaïque.

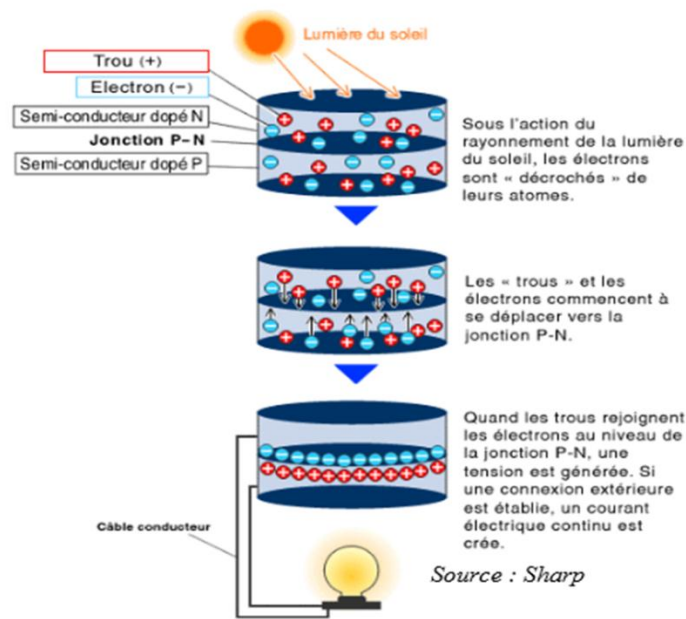


Figure III-10:principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.  
Source : Sharp

# Chapitre 04

## Les Batteries

## IV.1. Introduction

Les batteries solaires stockent l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques afin d'assurer l'alimentation électrique en toutes circonstances (jour ou nuit, ciel dégagé ou couvert).

Une batterie utilisée avec des panneaux solaires ou une éolienne est une batterie à décharge lente (appelée aussi batterie solaire).

Ces batteries sont spécifiquement conçues pour les applications solaires ou éoliennes. Elles n'ont pas les mêmes caractéristiques qu'une batterie de voiture par exemple, elles se déchargent plus progressivement et supportent mieux les décharges fréquentes peu profondes.

Vous pouvez brancher une batterie solaire directement sur un panneau solaire, mais vous risquez d'endommager la batterie si son niveau de charge dépasse les 90%. C'est pour cela qu'il est vivement recommandé d'installer un régulateur solaire entre le panneau solaire photovoltaïque et la/les batteries solaires.

Le rôle du régulateur dans une installation solaire est très important car le niveau de charge des batteries solaires ne doit être ni trop bas (pas en dessous de 40%) ni trop haut (ne pas dépasser 95%).

Des charges trop faibles ou trop importantes non régulées détériorent les batteries et limitent leur durée de vie.

Nous vous recommandons de bien vérifier que le cyclage (nombre de cycles complets de charge -décharge de la batterie) est clairement indiqué par le fabricant.

Le cyclage indique la durée de vie de la batterie solaire.

Les batteries solaires de qualité ont une durée de vie de plus de 500 cycles, soit de 7 ans jusqu'à 15 ans.

Les principales utilisations d'une batterie solaire sont : installation solaire en site isolé, camping car, caravaning, nautisme.

## IV.2. Les modèles de batteries

### IV.2.1. La batterie de voiture

Ce type de batterie est peu coûteux et très répandu de part le monde. Mais elle nécessite un entretien régulier (la densité du mélange eau/acide doit être suivi et ajusté régulièrement car l'eau s'évapore).

Utilisée pour une installation solaire, la durée de vie est de six mois



Figure IV-1 batterie de camion.

#### IV.2.2. Les batteries à décharge profonde

Même composition qu'une batterie de voiture (ces batteries peuvent être utilisées sur un véhicule).

La différence réside dans le taux de décharge de la capacité totale. Pour une batterie de voiture, il est conseillé de ne jamais dépasser une décharge de 20% de la capacité totale, sous peine d'endommager la batterie.

Ces batteries à « décharge profonde » - comme leur nom l'indique – peuvent être utilisées jusqu'à 80% de la capacité totale, donc parfaitement adaptées pour une installation photovoltaïque.

Cependant afin d'optimiser ces batteries, il est conseillé de ne pas dépasser 40 % de la capacité totale. Ces batteries sont assez répandues et leur coût restent abordable.

#### IV.2.3 La batterie de gel

La durée de vie de ces batteries est de 4 à 5 ans.

Elles sont reconnaissables par l'absence complète d'ouverture sur le dessus. La fixation des câbles se fait non plus sur des bornes identiques à celles des batteries au plomb mais bien sur des tiges filetées de 8mm.

C'est la meilleure batterie pour une installation solaire (durée de vie d'environ 10 ans), maintenant elle n'est pas du tout adaptée pour des climats tropicaux et son prix est exorbitant.



**Figure IV-2 : Batterie au gel**

### **IV.3. Système de stockage**

Dans une installation PV, le stockage correspond à la conservation de l'énergie produite par le générateur PV, en attente pour une utilisation ultérieure.

La gestion de l'énergie solaire nécessite d'envisager des stockages suivant les conductions météorologiques et qui vont répondre à deux fonctions principales [16] :

- Fournir à l'installation de l'électricité lorsque le générateur PV n'en produit pas (la nuit ou par mauvais temps par exemple)
- Fournir à l'installation des puissances plus importantes que ce les fournies par le générateur PV.

### **IV.4. Les Caractéristiques principales d'une batterie**

#### **IV.4.1. Capacité en Ampère heure :**

Les Ampères heure d'une batterie sont simplement le nombre d'Ampères qu'elle fournit multiplié par le nombre d'heures pendant lesquelles circule ce courant. Théoriquement, par exemple, une batterie de 200 Ah peut fournir 200 A pendant une heure, ou 50 A pendant 4Heures, ou 4 A pendant 50 heures.

Il existe des facteurs qui peuvent faire varier la capacité d'une batterie tels que :

##### **IV.4.1.1 Rapports de chargement et déchargement :**

Si la batterie est chargée ou déchargée à un rythme différent que celui spécifié, la capacité disponible peut augmenter ou diminuer.

Généralement, si la batterie est déchargée à un rythme plus lent, sa capacité augmentera légèrement. si le rythme est plus rapide, la capacité sera réduite.

#### IV.4.1.2. Température :

Un autre facteur qui influence la capacité est la température de la batterie et celle de son atmosphère. Le comportement d'une batterie est spécifié à une température de 27 degrés.

Des températures plus faibles réduisent leur capacité significativement.

Des températures plus hautes produisent une légère augmentation de leur capacité, mais ceci peut augmenter la perte d'eau et diminuer la durée de vie de la batterie [16].

#### IV.4.1.3. La charge :

Pendant la charge, l'accumulateur est un récepteur (environ 2, 2V) ; en fin de charge (Point M), on note un accroissement rapide de la tension, les plaques complètement polarisées, la fin de charge est atteinte à 2,6 ou 2,7V[17] (Figure IV.3).

#### IV.4.1.4. La décharge :

Durant une assez longue durée d'utilisation, la tension reste remarquablement constante à la valeur de 2V environ. A partir du point N, elle diminue brusquement à 1,8V, il faut alors recharger l'accumulateur [17](figure IV.3).

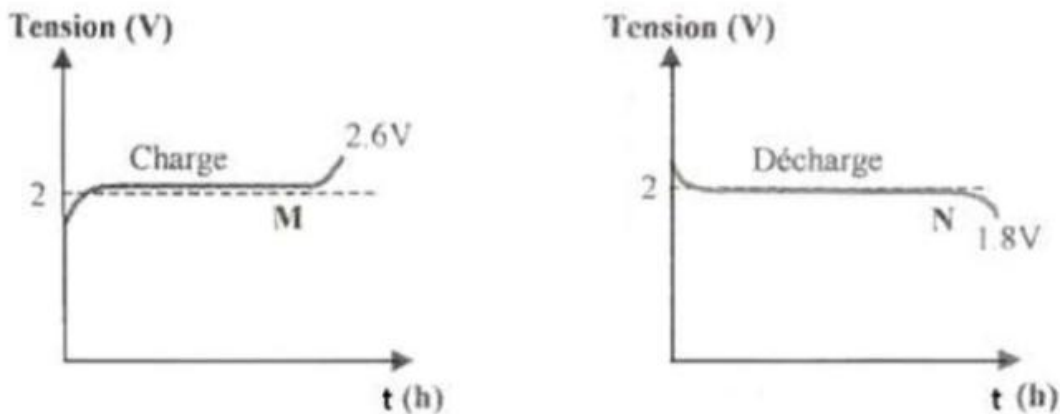


Figure IV-3 Caractéristique charge et décharge d'une batterie



#### IV.4.1.5. Profondeur de décharge :

La profondeur de décharge est le pourcentage de la capacité totale de la batterie qui est utilisée pendant un cycle de charge/décharge.

Les batteries de "cycle peu profond" sont conçues pour des décharges de 10 à 25% de leur capacité totale dans chaque cycle.

La majorité des batteries de "cycle profond" fabriquées pour les applications photovoltaïques sont conçues pour des décharges jusqu'à 80% de leur capacité, sans les endommager.

Les fabricants de batteries de nickel-Cadmium assurent qu'elles peuvent totalement être déchargées sans aucun dommage.

Cependant, même les batteries de cycle profond sont affectées.

Plus la décharge est grande plus la durée de vie de la batterie est réduite.

#### IV.4.1.6. La durée de vie

Un accumulateur peut être chargé puis déchargé complètement en un certain nombre de fois avant que ces caractéristiques ne se détériorent.

Par ailleurs, quel que soit le mode d'utilisation de l'accumulateur, il y a une durée de vie totale exprimée en année (ou en nombre de cycles) [17]

#### IV.4.1.7. La tension d'utilisation

C'est la tension à laquelle l'énergie stockée est restituée normalement à la charge.

#### IV.4.1.8. Le rendement

C'est le rapport entre l'énergie électrique restituée par l'accumulateur et l'énergie fournie à l'accumulateur.

#### IV.4.1.9. Le taux d'autodécharge

L'autodécharge est la perte de capacité en laissant l'accumulateur au repos (sans charge) pendant un temps donné [18]

La plupart des batteries modernes sont à faible autodécharge, c'est à dire qu'elles perdent moins de 3% de capacité par mois à 20°C.

### **IV.5. Types d'accumulateurs**

Il existe plusieurs types de stockage dans le système PV, les puissances rencontrées sont inférieures au MW, le seul stockage d'énergie électrique possible est le stockage électrochimique.

Les deux principaux types d'accumulateurs utilisés actuellement dans le système photovoltaïque sont :

#### **IV.5.1. Les Accumulateurs au plomb-acide**

La batterie au plomb acide est la forme de stockage de l'énergie électrique la plus courante, en raison de son coût qui est relativement faible et d'une large disponibilité.

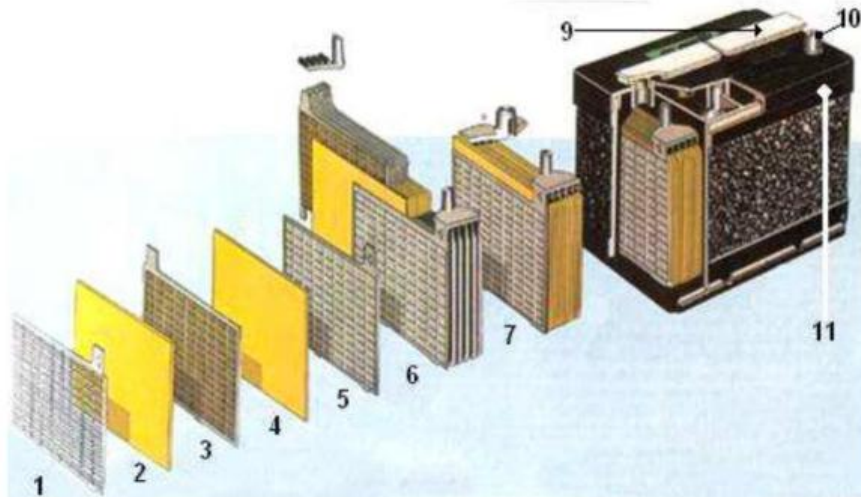
Par contre, les batteries nickel-cadmium sont plus chères, elles sont utilisées dans les applications où la fiabilité est vitale [19].

##### **IV.5.1.1. Composition d'une batterie solaire plomb-acide :**

Ces batteries sont composées de plusieurs plaques de plomb dans une solution d'acide sulfurique.

La plaque consiste en une grille d'alliage de Plomb avec une pâte d'oxyde de plomb marquée sur la grille (Figure IV.4).

La solution acide sulfurique et l'eau est appelée électrolyte



**Figure IV-4: Construction d'une batterie monobloc**

- |                       |                        |
|-----------------------|------------------------|
| 1 : Grille.           | 7 : Élément complet    |
| 2 : Séparateur.       | 8 : Pont               |
| 3 : Plaque positive.  | 9 : Rampe de bouchons. |
| 4 : Plaque négative.  | 10 : Borne.            |
| 5 : Barrette.         | 11 : Bac.              |
| 6 : Faisceau négatif. |                        |

Le matériel de la grille est un alliage de plomb parce que le plomb pur est un matériel physiquement faible, et pourrait se casser pendant le transport et le service de la batterie [20].

Peut-être l'alliage est en plomb avec 2-6% d'Antimoine. Moins la contenance en Antimoine sera grande, moins résistante sera la batterie pendant le processus de charge. Une petite quantité d'Antimoine réduit la production d'hydrogène et d'oxygène pendant la charge, et par conséquent la consommation d'eau.

D'autre part, une plus grande proportion d'Antimoine permet des décharges plus profondes sans endommager les plaques, ce qui implique une plus grande durée de vie des batteries. Ces batteries plomb-antimoine sont de type de "cycle profond".

Le Cadmium et le Strontium sont utilisés à la place de l'Antimoine pour fortifier la grille.

◆—————◆

Ceux-ci offrent les mêmes avantages et inconvénients que l'Antimoine, mais réduisent en outre le pourcentage d'autodécharge quand la batterie n'est pas en utilisation.

Le Calcium fortifie aussi la grille et réduit l'autodécharge. Toutefois, le Calcium réduit la profondeur de décharge recommandée dans non plus de 25%. D'autre part, les batteries de plomb-calcium sont de type "cycle peu profond".

Les plaques sont alternées dans la batterie, avec des Séparateurs entre elles, qui sont fabriqués d'un matériel poreux qui permet le flux de l'électrolyte.

Ils sont électriquement non conducteurs, ils peuvent être des mélanges de silice et de matières plastiques ou gommées.

Les séparateurs peuvent être des feuilles individuelles ou des "enveloppes". Les enveloppes sont des manchons, ouverts par en haut, qui sont uniquement placés sur les plaques positives.

Un groupe de plaques positives et négatives, avec des séparateurs, constituent un "élément". un élément dans un container plongé dans un électrolyte constitue une "cellule" de batterie.

Des plaques plus grandes, ou en plus grand nombre, entraînent une plus grande quantité d'ampères heure que la batterie peut fournir.

Indépendamment de la taille des plaques, une cellule fournira une tension varie entre 1,7 et 2 volts suivant l'état de charge en conceptions nominales de fonctionnement, et un rendement énergétique de l'ordre de 70% à 85% (pour plomb-acide).

Une batterie est constituée par plusieurs cellules ou des éléments reliés en série, interne ou externe, pour augmenter le voltage à des valeurs normales aux applications électriques.

Pour cette raison, une batterie de 6 V est composée de trois cellules, et une de 12 V de 6. Les plaques positives d'une part, et les négatives de l'autre, sont interconnectées au moyen de terminaux externes dans la partie supérieure de la batterie.

Les éléments des batteries sont souvent montés dans des bacs isolés du sol pour éviter le refroidissement de l'électrolyte par l'intermédiaire de support de bois, ces bacs sont réalisés en plastique transparent afin de bien visualiser le repérage de niveau de l'électrolyte.

Les liaisons entre les éléments doivent être dimensionnées de manière à avoir une chute de tension très faible quel que soit le régime [16].

#### IV.5.1.2 Principe de fonctionnement :

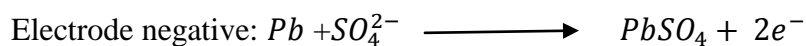
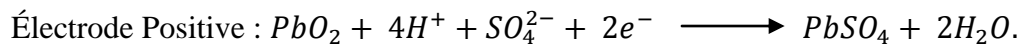
Une réaction chimique intervient lorsque la batterie alimente une charge connectée à ces deux électrodes.

Pendant la décharge, il y a une oxydation à la plaque négative qui se traduit par une perte d'électrons et réduction à la plaque positive ou gain d'électrons.

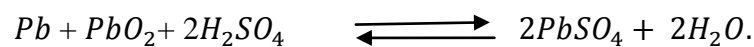
L'électrolyte en présence dans la batterie facilite le déplacement des charges électrochimiques sous forme d'ions.

Le processus inverse se produit quand la batterie se recharge on voit apparaître immédiatement une force électromotrice entre les deux électrodes.

Les équations des réactions suivantes décrivent la réaction principale:



Reactions:



#### IV.5.2. Les Accumulateurs au Nickel-cadmium

Les batteries de nickel-cadmium ont une structure physique semblable à celles du plomb-acide.

Au lieu du plomb, elles utilisent de l'hydroxyde de Nickel pour les plaques positives et de l'oxyde de Cadmium pour les plaques négatives.

L'électrolyte est de l'hydroxyde de Potassium. La tension de ce type d'accumulateur varie entre 1,15 et 1,17volt, par élément suivant l'état de charge.

Le rendement énergétique est de l'ordre de 70%.

En dépit d'un prix encore prohibitif, ce type d'accumulateur présente beaucoup d'avantages :

- Très bonne résistance mécanique.
- Possibilité de supporter des décharges profondes.
- Pas d'émanations toxiques à partir de l'électrolyte.
- Ne craint pas de gel.

#### **IV.6. Système de régulation**

Les systèmes de régulation de charge sont des éléments d'un système photovoltaïque qui ont pour but de contrôler la charge et la décharge d'une batterie afin d'en maximiser la durée de vie.

Son rôle principal est de réduire le courant lorsque la batterie est presque entièrement chargée.

Lorsqu'une batterie se rapproche d'un état de charge complète, de petites bulles commencent à se former sur les électrodes positives.

A partir de ce moment, il vaut mieux réduire le courant de charge non seulement pour éviter des dégâts mais aussi afin de mieux atteindre l'état de charge complète.

Un courant trop élevé peut provoquer une déformation des électrodes à l'intérieur, ce qui pourrait créer un court-circuit.

Le régulateur de charge assure deux fonctions principales :

- La protection des batteries contre les surcharges et les décharges profondes.
- L'optimisation du transfert d'énergie du champ photovoltaïque à l'utilisation

#### **IV.7. Technique de régulation**

Toute la régulation se fait grâce à la mesure de la tension aux bornes de la batterie. Une batterie déchargée possède une tension faible (autour de 11,4V pour une batterie de 12V), alors qu'une batterie chargée possède une tension forte (autour de 13,2 V).

---

Le régulateur de charge doit donc avoir une lecture précise de la tension aux bornes de la batterie, afin de savoir si elle se trouve dans une période de fin de charge ou en fin de décharge.

C'est pour cela que l'on place toujours le régulateur à proximité des batteries, pour éviter les chutes de tension dues à la distance et pour pouvoir prendre en compte la température environnante [20].

# Chapitre 05

## Application

## V.1 Introduction

Les modules photovoltaïques sont utilisés pour générer un courant continu (DC) à partir de l'irradiation incidente du soleil sur la surface du module PV.

Étant donné que le réseau de distribution électrique et des charges électriques fonctionnent sur le courant (AC) en alternance, les onduleurs sont utilisés pour convertir le courant continu provenant du module photovoltaïque en courant alternatif en fonction du réseau de distribution électrique.

Tension alternative toujours maintenue constante par l'onduleur selon les limites du réseau de distribution ; Cependant, le courant d'alimentation varie en fonction de la quantité du rayonnement incident provenant du soleil sur les modules photovoltaïques.

La sortie CA de l'onduleur est basse tension (BT), qui est intervenu jusqu'à 33 KV moyenne tension (MV) aux transformateurs de Step-up.

Les transformateurs sont ensuite connectés à l'appareillage sous une configuration en anneau et, qui se connecte au réseau de distribution d'électricité.

## V.2 Les systèmes photovoltaïques

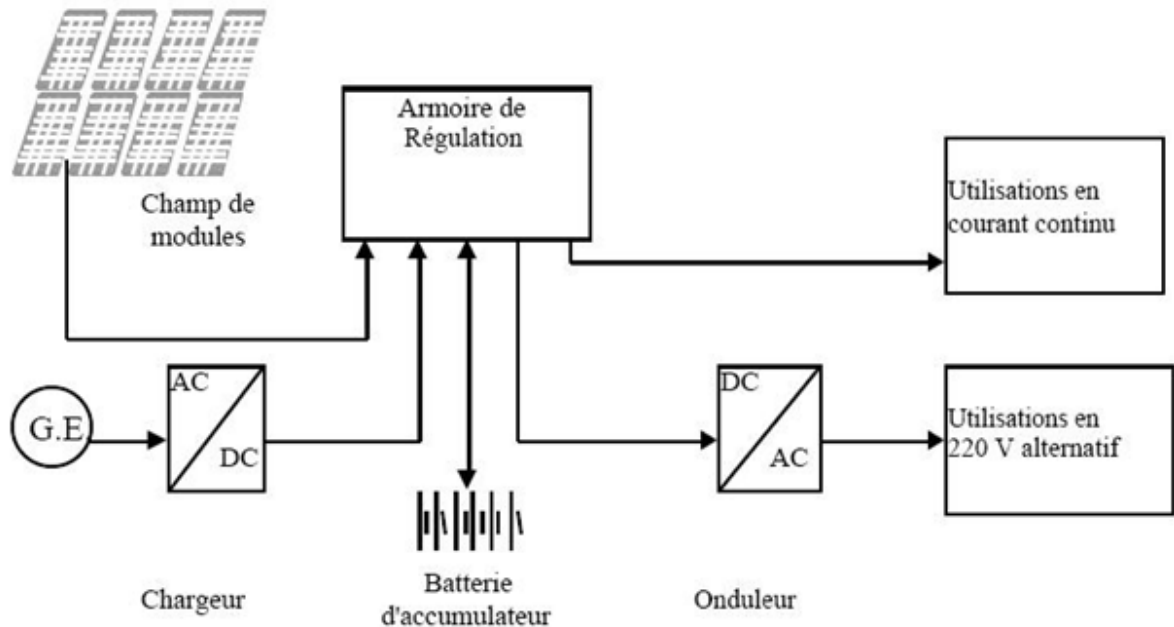
Bien que fondamental dans la chaîne que représente un système, le module photovoltaïque à lui seul ne peut pas grand-chose : pour répondre à un besoin défini, il faut en fait l'associer étroitement à un système complet correspondant à une application bien spécifique.

Un système photovoltaïque sera donc constitué du générateur précédemment décrit, généralement associé à l'un ou plusieurs des éléments suivants :

- Un système d'orientation ou de suivi (rencontré assez rarement sous nos latitudes),
- Une gestion électronique (stockage, mise en forme du courant, transfert de l'énergie),
- Un stockage palliant la nature aléatoire de la source solaire,
- Un convertisseur DC/AC
- Une charge en courant continu basse tension ou en courant alternatif standard.

La Figure (V.1) représente symboliquement les divers éléments du système le plus général.

Dans la pratique, bien sûr, les systèmes utilisent les éléments appropriés au type de charge et aux conditions locales.



**Figure V-1 : Schéma synoptique décrivant le système photovoltaïque le plus général**

### V.2.1. Type de systèmes photovoltaïques

Les systèmes PV les plus couramment utilisés sont de trois types :

#### V.2.1.1. Les systèmes PV avec stockage électrique

(Batterie d'accumulateurs électrochimiques). ceux-ci alimentent des appareils d'utilisation :

- Soit directement en courant continu
- Soit en courant alternatif par l'intermédiaire d'un convertisseur continu
- Alternatif (onduleur)

#### V.2.1.2. Les systèmes à couplage direct sans batterie

(Fonctionnement dit aussi "au fil du soleil").

Les appareils d'utilisation sont branchés soit directement sur le générateur solaire, soit, éventuellement, par l'intermédiaire d'un convertisseur continu - continu (adaptateur d'impédance).

Pour les systèmes sans batterie, il y a possibilité d'avoir recours à une forme de stockage qui ne soit pas de nature électrochimique.

**Exemples** : Pompage stockage par réservoir d'eau, Réfrigération : stockage de froid (stockage de glace ou eutectique), Electrolyse de l'eau : stockage d'hydrogène.

Le choix de tel ou tel système se fera en fonction de différents critères simplicité, application, environnement, etc.

### V.2.1.3. Les systèmes connectés au réseau local

Par l'intermédiaire d'un onduleur piloté à la fréquence du réseau, le réseau servant de stockage.

L'étude de systèmes photovoltaïques se ramène à l'étude de l'adaptation de la charge.

On recherchera optimiser le système pour avoir le meilleur rendement d'adaptation du système (rapport de l'énergie électrique fournie à l'utilisation à l'énergie électrique qu'aurait pu fournir le générateur fonctionnant toujours à son point de puissance maximum).

### V.2.2. Les panneaux solaires

Pour obtenir des puissances importantes, les modules solaires doivent être associés en série – parallèle pour constituer un panneau solaire.

Ceux-ci sont reliés électriquement et assemblés sur un châssis.

On a l'habitude de donner la taille d'un panneau solaire par sa puissance crête. Mais ce paramètre n'est pas suffisant pour définir le système, aussi est-il nécessaire de définir le mode de groupement des modules.

Selon la puissance de l'utilisation, la tension de la batterie peut être différente (6, 12, 24 ou 48 V par exemple). Un module de 36 cellules au silicium monocristallin étant adapté pour la charge d'une batterie de 12 V, la tension d'utilisation détermine le nombre de modules à mettre en série (2 pour 24V, 4 pour 48 V).

Le dimensionnement du système solaire détermine le nombre de branches à mettre en parallèle pour un fonctionnement satisfaisant de l'ensemble en fonction de la consommation de l'utilisation et de l'ensoleillement du lieu.

Dans ce cas en utilisant les panneaux de modèle Dokio FSP-100M, et sa caractéristique se représenter dans le tableau suivant :



Figure V-2 : panneau dokio FSP-100M

Tableau V-1 : Caractéristiques du produit de base

Caractéristiques du produit de base					
Longueur	Largeur	Hauteur	Poids	Matériel principal	Cadre matériel
660mm	530mm	50mm	8.80 Kg	Monocristallin	En aluminium

Tableau V-2 : Caractéristiques électriques performance conditions de test standard (stc \*)

Puissance maximale	$P_{max}$	100 Wp
Tension en circuit ouvert	$C_{ov}$	22.50 V
Maximum power point tension	$C_{tcv}$	18.00 V
Court-circuit actuel	$I_{sc}$	5.80 Un
Maximum power point courant	$I_{mpp}$	5.55 Un

### V.3. Les onduleurs

La transformation du courant photovoltaïque, de nature essentiellement continue, en courant alternatif usuel 230 V / 50 Hz est effectuée par des appareils électroniques appelés convertisseurs statiques, ou onduleurs.

Les onduleurs pour la connexion au réseau ont une puissance nominale d'environ 100 W à plusieurs centaines de kW. Jusqu'à 5 kW, ils fonctionnent en général en 230 V monophasé, alors qu'au-dessus, ils doivent être triphasés (basse ou moyenne tension).

Étant connecté directement sur le champ PV, leur tension et leur courant d'entrée sont donc très variables avec les conditions d'ensoleillement et de température ambiante. L'une des fonctions importantes de l'onduleur réseau est donc la recherche du point de puissance maximum (souvent notée MPPT pour « Maximum Power Point Tracking »), c'est-à-dire adaptation permanente de l'impédance d'entrée afin d'optimiser, à chaque instant, le produit  $P = U \cdot I$  sur la caractéristique du champ PV.

L'onduleur doit ensuite construire une (ou trois) tension(s) sinusoïdale(s) correspondant aux normes requises par le réseau.

### V.4. Boîtes combinatoires

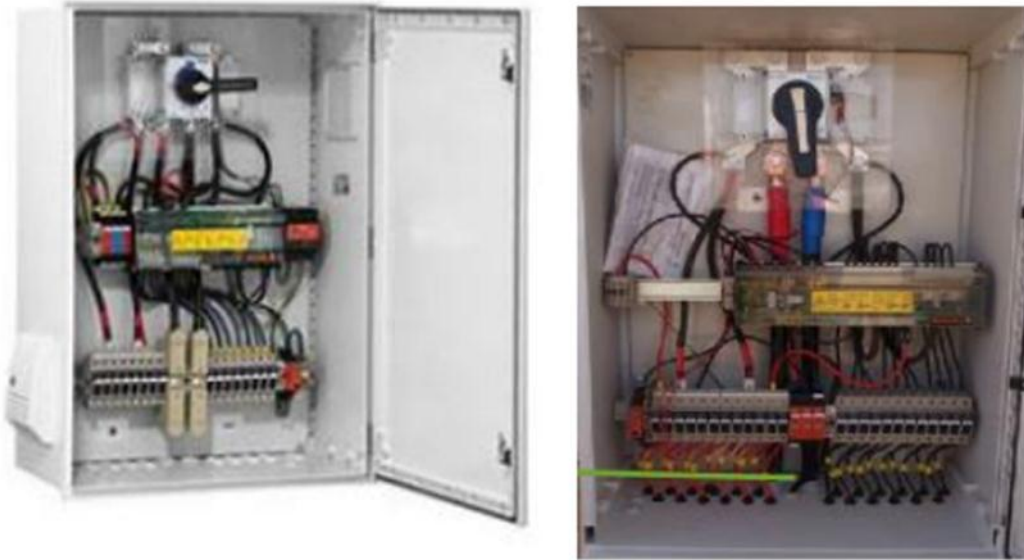
Sont utilisés pour combiner des groupes de chaînes de modules PV en une sortie commune et offrir une protection aux strings DC entrants en cas de panne.

La boîte de combiner est fournie par Weidmüller et équipée tactile sécurité porte fusibles avec des fusibles sur les deux pôles, positif et négatif, une protection contre les surtensions pour protéger le système contre les surtensions, la chaîne de mesure de courant et un sectionneur DC pour l'isolement en charge de l'Combiner. En cadre de l'onduleur pour l'entretien, les essais, les réparations et le remplacement. La boîte combiner une enceinte IP55 résistant aux intempéries et est testée pour le fonctionnement 1000 VDC.

Les fils positifs et négatifs des faisceaux de PV sont dirigés vers le fond de la boîte combinée et terminées au niveau du connecteur de fiche respectif. Les porte-fusibles sur chaque pôle sont reliés à une barre de bus commun, qui combine la sortie

de courant en parallèle et fournit simples pistes de sorties positives et négatives qui transportent le courant à un onduleur.

Il ya six, sept ou huit boites combiner connectées à un onduleur en fonction de la taille et la disposition.



**Figure V-3 : Une configuration typique d'une entrée 12 Combiner Box utilisé pour le projet**

Les porte-fusibles à l'intérieur des boites combiner sont alimentés par Weidmuller et sont conçu pour fonctionner de 30A moins de 1000VDC et sont spécifiquement conçu pour la protection des modules (PV).

Bussmann 30A fusibles solaires sont insérés dans les porte-fusibles comme indiqué ci-dessous. Ces fusibles ( $10 \times 38mm$ ) peuvent protéger en toute sécurité les modules photovoltaïques et les conducteurs de la marche arrière et sur les conditions actuelles.

Toutes les boites combinées sont équipés d'un interrupteur manuel de déconnexion DC pour faciliter la déconnexion du réseau associé à partir des composants en aval. Le sectionneur est ouvert lorsque la poignée est dans la position horizontale.

## V.5. Les transformateurs

Les transformateurs sont alimentés par Celme et accélèrent la sortie basse tension des onduleurs de moyenne tension à 33KV.

Chaque onduleur de la classe 1600 KVA est relié à deux inverseurs SMA 760CPXT et 500 KVA du transformateur est relié à la SMA 500CPXT.

Il y a un total de (8) stations avec désignations Salle a travers Chambre H.

Les transformateurs ont un changeur de prise pour régler le rapport du primaire à la tension secondaire.

Un total de huit (8) les mesures sont possibles avec une capacité de modification de 2.5% à partir de chaque -5% à + 15%. Le réglage de la SMA 760CPXT doit être à 5 et le 500 KVA doit être au 3.

Le transformateur est également équipé d'un thermomètre qui mesure la température de l'huile.

Dans le cas où la température se lève sur le niveau acceptable l'onduleur réduit la puissance de sortie.

Dans le cas où la température reste au-dessus du taux accepté, l'onduleur sera arrêté.

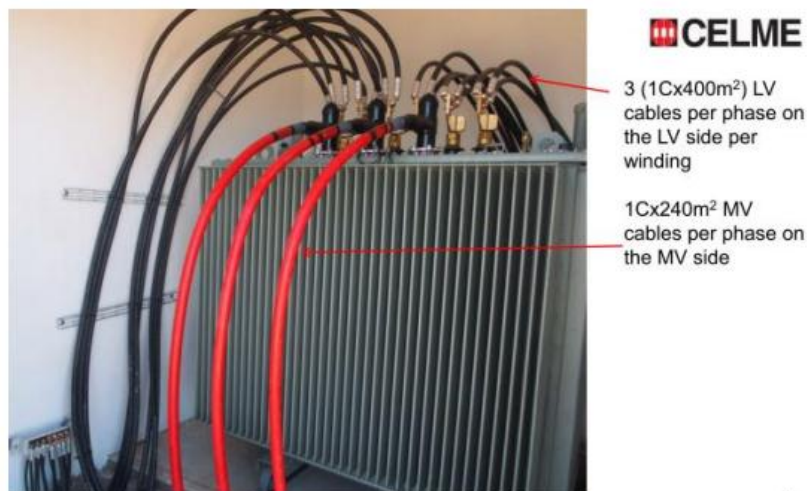


Figure V-4 : Transformateur

## V.6.Dimensionnement

Le dimensionnement d'un générateur PV a pour but de déterminer l'optimum technico-économique entre la puissance crête du champ de panneaux solaires et la capacité de batterie associée à partir des besoins électriques de l'utilisateur d'une part, des données d'ensoleillement du site d'autre part et du prix et de la qualité des composants dont on peut disposer sur le marché.

La détermination de la taille des composants doit permettre de garantir une fourniture d'énergie tout au long de l'année ou éventuellement sur une période déterminée.

### V.6.1.Données d'ensoleillement.

Les données d'ensoleillement pour une région déterminée sont généralement disponibles mois par mois dans les atlas solaires et correspondent à l'irradiation globale quotidienne moyenne sur un plan horizontal.

Les unités sont exprimées soit en cal/cm<sup>2</sup> ou l'angles, soit en kWh/m<sup>2</sup> sachant que les valeurs de l'ensoleillement sont évidemment fonction de la latitude mais aussi des conditions climatiques locales et des masques naturels ou artificiels.

Pour déterminer l'énergie incidente heure par heure et mois par mois sur le plan des panneaux, on effectue le calcul à partir des données d'ensoleillement sur un plan horizontal<sup>8</sup> et de l'inclinaison donnée aux panneaux solaires.

Si les panneaux doivent rester fixes, l'inclinaison et l'orientation optimales sont déterminées en fonction de la saisonnalité de la demande, de l'irradiation correspondante et de la capacité correspondante des batteries de stockage.

### V.6.2.Principe de calcul

A partir des données de consommation fournies par l'utilisateur, on détermine l'énergie annuelle qui lui est nécessaire et l'énergie journalière moyenne WU consommée.

On fait comme première hypothèse qu'en moyenne, sur une année, l'énergie journalière fournie par le champ de panneaux solaires (WS) doit être au moins égale, à un coefficient correctif K près, à l'énergie journalière moyenne consommée par l'utilisation (WU).

Pour déterminer l'énergie quotidienne moyenne incidente dans le plan des modules, on effectue le calcul à partir des données d'ensoleillement sur un plan horizontal et de l'inclinaison donnée aux modules à l'aide du programme de calcul de l'apport solaire passif tenant compte des masques.

Cécile peut être obtenue de façon précise qu'avec un logiciel de dimensionnement solaire.

Dans le cas d'un système avec stockage par batterie, la méthode proposée est de comparer les Ah/jour consommés par l'utilisation avec les Ah/jour fournis par les panneaux solaires dans des conditions d'ensoleillement et de température bien définis. Cette méthode permet de s'affranchir de la tension qui dépend de deux paramètres : son état de charge et sa température.

Lorsqu'on fait du stockage inter saisonnier, en été l'énergie moyenne fournie par le panneau est supérieure à l'énergie consommée : la batterie se charge. En hiver, l'énergie moyenne fournie par le panneau est inférieure à l'énergie consommée: la batterie se décharge.

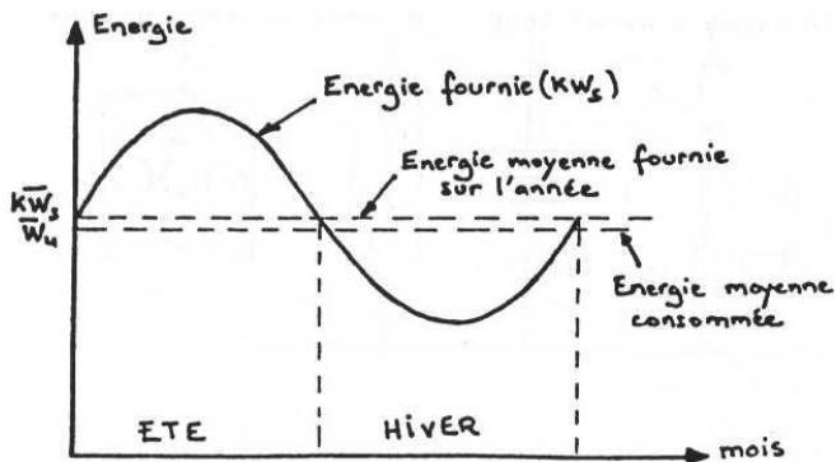


Figure V-5 : Evaluation de la consommation journalière

#### V.6.2.1. Calcul de la puissance module requise.

La détermination de la puissance crête du champ de panneaux revient à déterminer le nombre total de modules c'est-à-dire le nombre connecté en série multiplié par le nombre de branches en parallèle.

Le nombre de modules en série est connu dès lors que la tension de l'utilisation est spécifiée.

Le nombre de branches parallèles peut être rapidement déterminé par un calcul simple.

Si l'irradiante est donnée en l'angle, il est commode de multiplier l'irradiation en  $\text{cal/cm}^2/\text{j}$  par le facteur 0,0116 pour convertir l'énergie incidente totale reçue sur une journée en un nombre d'heures d'ensoleillement équivalent à  $1 \text{ kW/m}^2$ .

En effet, la puissance d'un module exprimée en  $W_c$  est donnée pour un ensoleillement de

$1 \text{ kW/m}^2$  (Puissance STC).

Ainsi, en première approximation, la production journalière d'énergie (en Ah/j) pour une branche est obtenue en multipliant le courant de module  $I_{pmax}$  par le nombre d'heures (h) d'ensoleillement équivalent à  $1 \text{ kW/m}^2$ . En fait, nous avons vu en TD que les conditions STC de mesure de la puissance crête d'un module ( $1 \text{ kW/m}^2$  à une température de cellules de  $25^\circ\text{C}$ ) sont irréalistes; si elle sont données par le constructeur, il vaut mieux prendre les valeurs à la NOCT (TUC), et après avoir vérifié que la tension  $V_{pnoct}$  est toujours supérieure à la tension requise pour la fin de charge de batterie : 15,1 V. (On peut éventuellement prendre la valeur  $I_{pnoct}$  à condition de la multiplier par le nombre d'heures d'ensoleillement équivalent à  $800 \text{ W/m}^2$ , par définition plus élevé que le nombre d'heures équivalent plein soleil.).

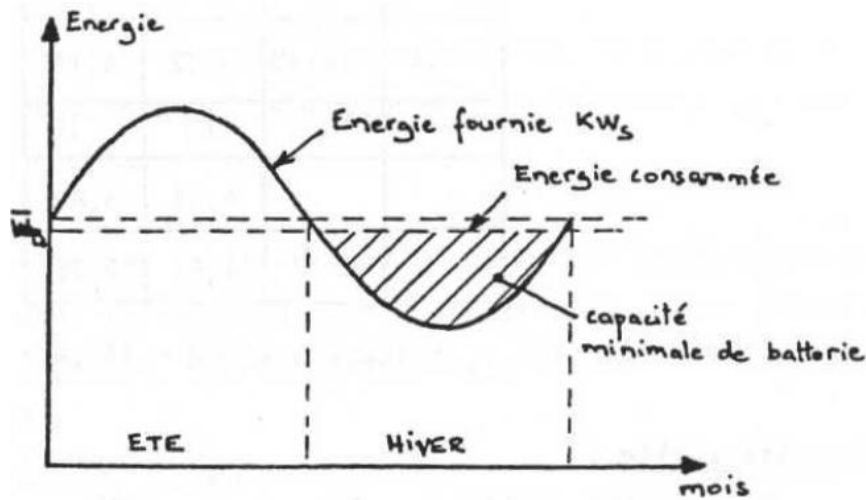
Si la consommation journalière de la charge (en Ah/j) doit être satisfaite tout au long de l'année, on somme sur l'année les productions journalières d'énergie obtenues.

Le nombre de branches en parallèle est obtenu simplement, au coefficient K correctif près, en divisant la consommation annuelle de l'utilisation (en Ah/j) par la production annuelle (en Ah/j) délivrée par une branche.

L'inclinaison optimale du champ de module est d'abord fixée par la minimisation du nombre de branches parallèles nécessaires.

Elle est en général proche de la latitude  $-10^\circ$ .

### V.6.2.2. Calcul de la capacité de batterie requise



**Figure V-6 : Stockage saisonnier de la batterie**

Si le besoin est permanent sur l'année et qu'il y a un déficit hivernal, le programme de dimensionnement prendra directement en compte la capacité correspondante minimale des batteries de stockage.

### V.6.2.3 Calcul économique

On fait alors un premier calcul de coût prenant en compte : Coût modules, Coût installation modules, Coût batteries, Coût installation batteries, Coût régulateur de charge.

Puis dans un deuxième temps, on corrige l'inclinaison des modules jusqu'à minimiser le déficit.

Si le déficit reste tel qu'il nécessite encore un parc de batteries important et donc trop coûteux, on augmentera le nombre de modules, quitte à générer une forte surproduction en été, jusqu'à l'obtention d'un minimum pour le coût global de l'installation.

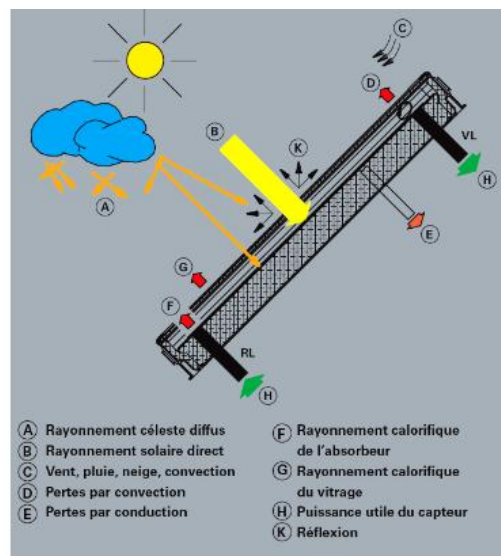
## V.7. La puissance rayonnée :

Le rayonnement solaire est un flux d'énergie émis uniformément par le Soleil dans toutes les directions. Une puissance de  $1,36 \text{ kW/m}^2$  (constante solaire) est reçue par la Terre en dehors de l'atmosphère.

Cette valeur est appelée constante solaire. Au cours de sa traversée de l'atmosphère terrestre, le rayonnement solaire est affaibli par la réflexion, les diffusions multiples et l'absorption par les particules de poussière et les molécules de gaz (Figure V 7).

La part du rayonnement qui traverse sans encombre l'atmosphère rencontre directement la surface terrestre : c'est le rayonnement direct.

La part du rayonnement solaire réfléchi ou absorbé par des particules solides ou de gaz et rayonné à nouveau rencontre la surface terrestre dans toutes les directions: c'est le rayonnement diffus.

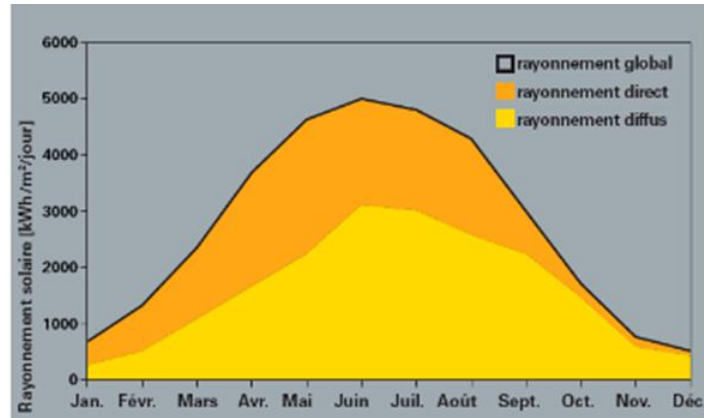


**Figure V-7 : Utilisation du rayonnement solaire dans le capteur**

La somme des rayonnements direct et diffus (Figure V.8) est appelée rayonnement global  $R_g$ .

Il est de  $1\ 000\ \text{W/m}^2$  maximum dans des conditions optimales (ciel clair et sans nuages, à midi).

Les capteurs solaires sont, selon le modèle et le dimensionnement de l'installation, en mesure d'utiliser jusqu'à 75 % environ du rayonnement global.



**Figure V-8 Puissance rayonnée quotidiennement par le Soleil sur une année**

### **V.8. Influence de l'orientation, de l'inclinaison et de l'ombrage sur la quantité d'énergie captée**

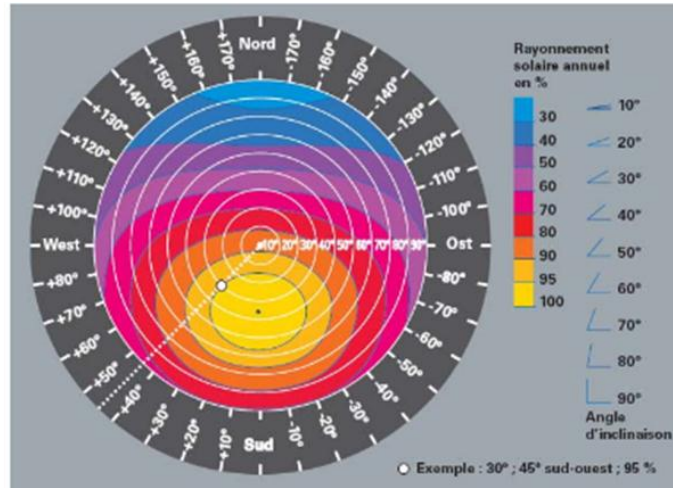
L'orientation sud et une inclinaison de 30 à 45° environ par rapport à l'horizontale assurent les meilleurs rendements pour une installation solaire à nos latitudes. Mais même avec des écarts importants (orientation sud-ouest à sud-est, inclinaison de 25 à 70°), une installation solaire reste rentable (Figure V 9).

Une inclinaison plus faible est conseillée si les capteurs ne peuvent pas être orientés vers le sud.

Des capteurs solaires inclinés à 30° et orientés à 45° sud-ouest présentent encore 95 % de la puissance optimale. Et même en cas d'orientation est ou ouest, il est possible d'espérer encore 85 % si le toit est incliné de 25 à 40°.

Une inclinaison plus forte du capteur offre l'avantage d'une fourniture d'énergie lissée sur l'année.

Une inclinaison inférieure à 20° est à déconseiller pour éviter tout encrassement excessif des capteurs.

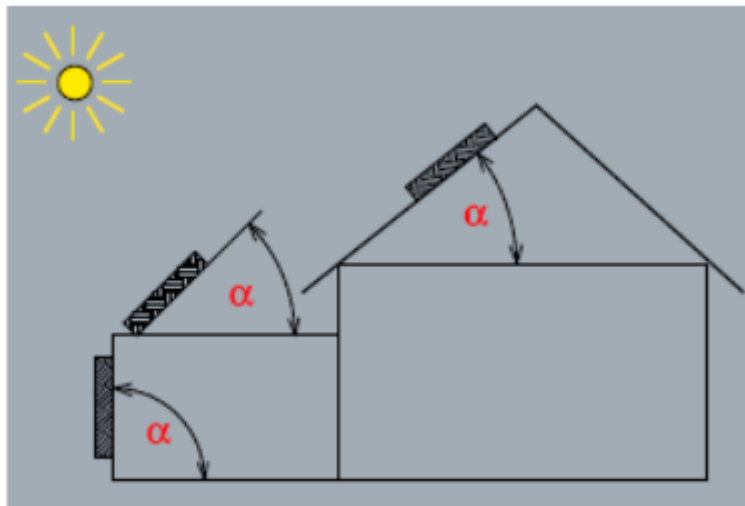


**Figure V-9 Influence de l'orientation, de l'inclinaison et de l'ombrage sur l'énergie rayonnée**

**V.8.1. Angle d'inclinaison  $\alpha$**

Une récupération maximale de l'énergie suppose un angle d'inclinaison des capteurs solaires par rapport à la surface de la Terre en conséquence (figure V.10).

Si le capteur est sur un toit à versants, l'angle d'inclinaison est celui du toit. L'absorbeur du capteur pourra capter le maximum d'énergie si le plan du capteur est perpendiculaire au rayonnement solaire.



**Figure V-10 : angle d'inclinaison des capteurs solaires par rapport à la surface de la Terre**

### V.8.2. Angle azimutal

L'angle azimutal (figure V.11) est l'angle que fait le plan du capteur par rapport au Sud ; plan du capteur orienté plein Sud = angle azimutal de  $0^\circ$ .

Comme le rayonnement solaire est le plus intensif vers midi, le plan du capteur devra être si possible orienté vers le Sud.

Des angles allant jusqu'à  $45^\circ$  par rapport au Sud sont cependant acceptables. Des angles supérieurs pourront être compensés en augmentant légèrement la surface de capteurs.

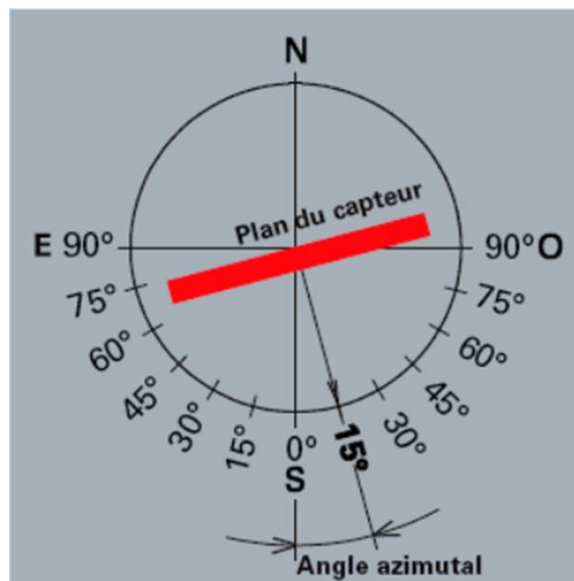


Figure V-11 :Angle azimutal

## V.9. Le châssis

Dans la plupart des systèmes isolés, le panneau solaire est constitué de modules photovoltaïques assemblés sur un support généralement métallique. Cette charpente est réalisée le plus souvent en aluminium ou en acier galvanisé.

Ce choix de matériau est justifié par des contraintes telles que :

- Résistance mécanique (vent)
- Tenue à la corrosion
- Conductivité thermique
- Facilité d'assemblage
- Poids, etc.

De nombreux types de châssis existent et sont fonction du nombre de modules et de leur taille, du support d'implantation (dalle, mur, toit, ...), de leur hauteur, et de leur inclinaison.

Leur hauteur doit être telle que les modules solaires soient hors de portée d'éléments indésirables (flore, faune ...). Leur inclinaison est généralement fixe et déterminée par le dimensionnement.

### V.10. Le câblage

Le câblage a pour but de regrouper électriquement les modules solaires. Généralement, les modules sont câblés tout d'abord en série pour réaliser des branches qui comportent chacune leur diode en série.

La mise en parallèle de branches est réalisée, pratiquement, à l'aide de boîtes de jonction fixées sur les châssis.

Il est indispensable d'apporter un soin particulier au serrage des cosses et au câblage de l'installation. Une chute de tension trop importante dans les connexions et dans les câbles peu traduire le courant de charge de la batterie.

Cette chute de tension est loin d'être négligeable lorsque de forts courants sont fournis sous de faibles tensions.

Cette contrainte impose l'utilisation de câbles résistant aux intempéries et dont la section sera fonction de la distance entre panneau solaire et batterie.

La chute de tension dans les câbles est donnée par la formule :

$$\Delta U = 2 R \cdot l \cdot I$$

Avec  $U$  en volts,  $R$  en  $\Omega/m$ ,  $l$  en m,  $I$  en A

**Tableau V-3 : Résistance de câbles de type H07RNF**

Section (mm <sup>2</sup> )	1,5	2,5	4	6	10	16
Résistance 2R en $\Omega/m$	0,0267	0,0160	0,0100	0,0067	0,0040	0,0025

Les sections de câbles doivent être calculées de façon à limiter la perte de puissance à 1%.

$$\Delta P = I_N^2 \cdot [(\rho \cdot 2 \cdot l)/A]$$

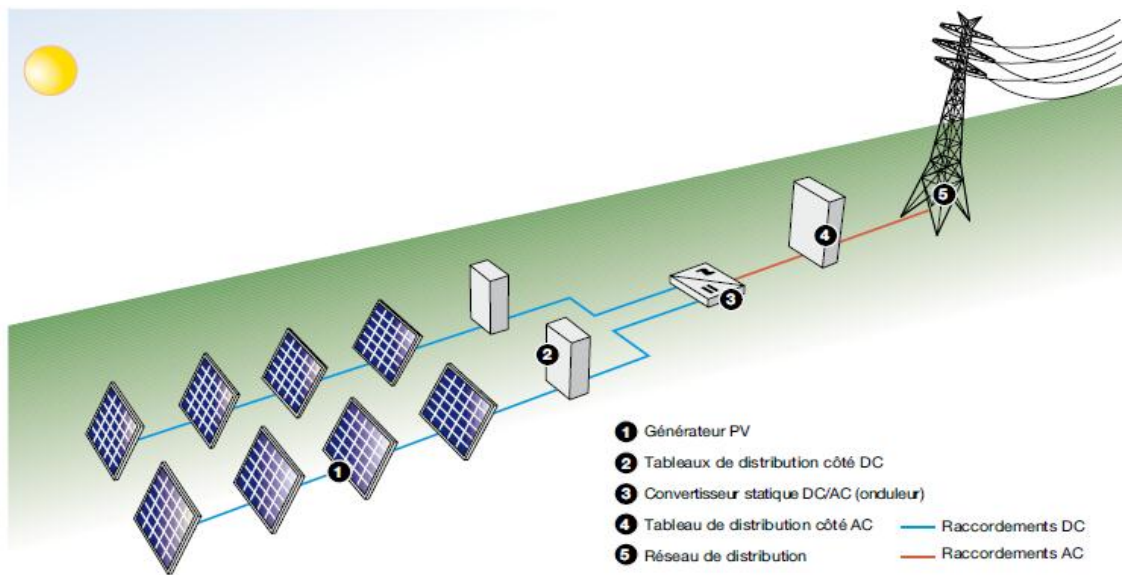
$\Delta P$  = Perte de puissance [W]

$I_N$  = Courant nominal [A]

$\rho$  = Résistance spécifique

$l$  = Longueur totale du câble [m]

$A$  = Section de câble [mm<sup>2</sup>]



**Figure V-12 : principe d'une installation photovoltaïque raccordée au réseau.**

## V.11. Calcul

La consommation journalière est définie à partir des données ci-dessus (Tableau V.4).

On détermine ainsi la consommation moyenne journalière en Ah.

Et l'on ramène cette consommation à une puissance moyenne permanente.

### V.11.1. Données de consommation

Dans ce travail nous étudier un système connecté au réseau local, avec des caractéristiques qui sont indiqués dans le tableau suivant :

Tableau V-4 : Données de consommation

<b>6.7 GWh</b>	La Centrale Solaire à une puissance installée de 6.7 gigawatts-crêtes.
<b>2622maisons</b>	La production de la centrale est équivalente à la consommation électrique de plus de 2622 maisons
<b>20 ans</b>	La durée d'exploitation initiale de la centrale.
<b>26223</b>	Le nombre de panneaux solaires photovoltaïques installés sur la centrale
<b>(222m*209m) 46500 m<sup>2</sup>*</b>	Les panneaux couvrent une superficie d'environ m <sup>2</sup>

**V.11.2 : Données de production**

Production nécessaire (Wh/j) 700

Production nécessaire (Ah/j) 40

Inclinaison optimale (°) 45

La production électrique de centrale par jour : 18356.1 KW

**A.N :**

❖ La production nécessaire de panneau solaire :

Puissance installée :  $6,7 \text{ GW} \text{ an } 6.7 \text{ GW} = 6,7 * 10^9 \text{ W}$

$$\frac{6,7 * 10^9}{365 * 26223} = 700 \text{ Wh} \setminus J$$

$$1 \text{ A} = \frac{1 \text{ W}}{1 \text{ V}} \frac{700}{18} \approx 40 \text{ A}$$

❖ La production électrique de centrale par jour :

$$E_P = 700 \text{ W} * 26223 = 18356100 \text{ W}$$

## V.12. Fiche technique

En centrale photovoltaïque on trouve 54 champs photovoltaïques :

La distance entre les champs 4 m.

Chaque champ contient 1 transformateur.

Chaque champ contient 500 panneaux divisés en 10 rangés.

La dimension de champ photovoltaïque  $33 \times 15m$

La distance entre les rangés 112 cm.

Chaque rangé contient 1 onduleur.

### ✓ Dimensionnement des panneaux photovoltaïques :

Pour dimensionner la surface de panneaux nécessaires on procède en trois étapes :

**Etape 1:** Calcul de l'énergie qui sera consommée par jour (voir bilan des puissances et énergies)

**Etape 2:** Calcul de l'énergie à produire Pour que les besoins du client soit assurés il faut que l'énergie consommée ( $E_C$ ) égale l'énergie produite ( $E_P$ ) à un coefficient près

$$E_P = \frac{E_C}{K} \quad \longrightarrow \quad E_C = E_P * K$$

$$E_C = 18356100 * 0.65$$

$$E_C = 119314565 \text{ W}$$

Le coefficient k tient compte des facteurs suivant :

- L'incertitude météorologique ;
- L'inclinaison non corrigé des modules suivant la saison ;
- Le point de fonctionnement des modules qui est rarement optimal et qui peut être aggravé par : la baisse des caractéristiques des modules, la perte de rendement des modules dans le temps (vieillessement et poussières) ;
- Le rendement des cycles de charge et de décharge de la batterie (90%) ;

- Le rendement du chargeur et de l'onduleur (de 90 à 95%) ;
- Les pertes dans les câbles et connexions

Pour les systèmes avec parc batterie, le coefficient  $k$  est en général compris entre 0,55 et 0,75. La valeur approchée que l'on utilise pour les systèmes avec batterie sera souvent de 0,65.

**Etape 3 :** Calcul de la taille du générateur photovoltaïque (ensemble des panneaux) à installer.

La puissance crête des panneaux à installer dépend de l'irradiation du lieu d'installation. On la calcule en appliquant la formule suivante

$$P_c = \frac{E_p}{K \cdot I_r} \longrightarrow I_r = \frac{E_p}{P_c \cdot K}$$

$P_c$  : Puissance crête en Watt crête ( $W_c$ )

$E_p$  : Énergie produite par jour ( $Wh/j$ )

$I_r$  : Irradiation quotidienne moyenne annuelle ( $kWh/m^2 \cdot jour$ )

Ce qui revient à écrire :

$$P_c = \frac{E_c}{K \cdot I_r} \longrightarrow I_r = \frac{E_c}{P_c \cdot K}$$

$P_c$  : Puissance crête en Watt crête ( $W_c$ )

$E_c$  : Énergie consommée par jour ( $Wh/j$ )

$I_r$  : Irradiation quotidienne moyenne annuelle ( $kWh/m^2 \cdot jour$ )


- Calcule d'installation de panneau solaire :

Les données :

Les dimensions de panneau solaire :  $66 \times 53 \text{ cm}$

L'angle d'inclinaison :  $45^\circ$

Surface de consommation


$$\cos \frac{\pi}{4} = \frac{\sqrt{2}}{2} = \frac{x}{53}$$

$$x = \frac{\sqrt{2}}{2} * 53 \quad \Rightarrow \quad \boxed{x = 37,47}$$

## *Conclusion*

La consommation d'énergie sous toutes les formes à travers le monde, notamment les énergies fossiles, a atteint son extrémité. Cette augmentation de la consommation de l'énergie est due principalement à la croissance démographique et la forte consommation qui l'accompagne (transport, l'électrification,...).

Selon les experts, les échanges internationaux en énergie fossile occupent la part de lion par rapport à l'ensemble des autres échanges.

Ce constat est centre des préoccupations de plusieurs pays dans un contexte d'insuffisance de la production des hydrocarbures, engendré par l'épuisement des réserves, face à la demande de plus en plus croissante des énergies fossiles. En plus de principal caractère non renouvelable de l'énergie fossile, son extraction, transport et utilisation engendrent beaucoup de problème principalement sur l'environnement et donc, sur l'écosystème. L'action conjuguée de l'amenuisement des ressources fossiles et des gaz à effet de serre conduit à l'adoption inéluctable d'un mix énergétique dont les énergies fossiles constituent une composante incontournable. Les prévisions de la future pénurie des ressources fossiles et leur principal inconvénient sur l'écologie, incitent le monde entier à se tourner vers l'exploitation des autres types d'énergies renouvelables et propres.

Les réserves de combustible fossiles sont mal connues, car les opérateurs et les spécialistes déclarent des chiffres plus politiques que techniques. Donc, le pic de la production du principal combustible qui est le pétrole est prévu entre 2020 et 2050, ce qui pose un problème de la satisfaction de la mondiale en énergie du fait de son caractère non renouvelable.

La contribution des énergies renouvelables dans la régularisation de ce défi est primordiale. C'est pour cela, il est fortement indispensable de s'intéresser à ce type d'énergie durable en développant les technologies nécessaires pour assurer une bonne exploitation de celle-ci, dans le but d'arriver à un rendement efficace. Aussi, la contribution des énergies renouvelables nous permet d'une part, de garder un environnement propre et sain et d'autre part, pour assurer la protection de la biodiversité.

Dans ce projet, on donne une conception d'une centrale photovoltaïque de puissance 6.7 GWh annuellement interconnectée au réseau de distribution électrique moyenne tension.

La production de cette centrale est équivalente à de consommation électrique de plus de 2622 maisons et sa durée d'exploitation est 20 ans.

## **Historique de la cellule photovoltaïque**

Quelques dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque :

- 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 4 000 km en Australie.

La première cellule photovoltaïque (ou photopile) a été développée aux États-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. Mais en dépit de l'intérêt des scientifiques au cours des années, ce n'est que lors de la course vers l'espace que les cellules ont quitté les laboratoires. En effet, les photopiles représentent la solution idéale pour satisfaire les besoins en électricité à bord des satellites, ainsi que dans tout site isolé.

## ***Bibliographie***

- [1] : Denis BONNELLE , RENAUD DE RICHTER, << 21 énergie renouvelables insolites, pour le 21<sup>e</sup> siècle >> édition ELLIPS , Février 2010
- [2] : A. Bennouna ; D. Zejli ; R. Benchrifia Les Energies Renouvelables Pour un développement durable et globale CER 2007 (CNRST)
- [3] : <http://www.energiepropre.net/pvconcept.html> ; consulté le 03/05/11
- [4] : [www.energie-renouvelable.tv](http://www.energie-renouvelable.tv)
- [5] : [http://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_energy](http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_energy)
- [6] : mémoire < l'énergie solaire et fonctionnement de la centrale solaire de cheikh zayed >
- [7]: <http://en.wikipedia.org>
- [8] : <http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2002/solarcells/>,
- [9] : mémoire de magister < contribution à l'étude de conception d'une centrale photovoltaïque de puissance 1 MW. (AMARA karima)
- [10] : [www.enerzine.com](http://www.enerzine.com)
- [11] : M. Nkouimi, «Outil d'aide au dimensionnement des systèmes photovoltaïques domestiques», Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur de conception, École National Supérieur Polytechnique de Yaoundé, 2010
- [12] : M. LOPEZ (contribution à l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolé) Thèse de docteur université paris sud 11.2008
- [13] : EPSIC-D.SCHNEIDER
- [14]: Source tenesol
- [15] : Source Krasone znamya
- [16] : N. Achaïbou, A. Malek , N. Bacha, « Modèle de vieillissement des batteries plomb acide dans l'installation PV », Revue des Energies Renouvelables, N. spécial (CHEMSS), pp61-66, 2000.

[17]: I.Tsuda, K. Kurokawa et K. Nozaki, «Annual simulation results of photovoltaic system with redoxflow battery», Solar Energy Materials and solar cells, volume35, pp. 503-508,1994

[18]: A.Oi ,«Design and simulation of photovoltaic water pumping system»,Partial Fulfullementof the Requirements for the degré of master of science in Electrical Engineering, Faculty of California Plytechnic State University San Luis Obispo, september 2005.

[19]: D. Thévenard and M.Ross, «Validation and Verification of Component Models and System Models for the PV », CETC-internal report 2003-035, Canada,2003

[20]: P. Derk «Electrochemical Energy Storage for Renewable Sourceand Grid Blancing»,ouvrage ISBN:978-0-444-62616-5,2014.

## ***RESUME***

Principe de l'énergie solaire photovoltaïque: transformer le rayonnement solaire en électricité à l'aide d'une cellule photovoltaïque.

Ce travail est une contribution à l'étude de conception d'une centrale photovoltaïque de puissance (6.7GW) interconnectée au réseau de distribution électrique moyenne tension.

## ***Mots Clés :***

Energie renouvelable, énergie solaire, cellule photovoltaïque, batterie, panneaux solaire

## ***ABSTRACT***

Principle of solar photovoltaic energy: transforming solar radiation into electricity using a photovoltaic cell.

This work is a contribution to the design study of a photovoltaic power plant (6.7 GW) interconnected to the medium voltage electrical distribution network.

## ***Key words:***

Renewable energy, solar energy, photovoltaic cell, battery, solar panels