

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

FACULTE DES SCIENCES  
DEPARTEMENT DE CHIMIE

N°...../2021



***CHIMIE ENVIRENNEMENT***  
*Mémoire présenté pour l'obtention*  
*Du diplôme de Master Académique*

Réalisé par :

- ✓ MEDJENAH BOUCHRA
- ✓ FAR YAQOT
- ✓ BOUDRAF SARA

Intitulé

***LA PRODUCTION PHOTOVOLTAIQUE***  
***ELECTRICITE***

Devant le jury composé de :

Dr Ledghem Chikouche Mohamed Djemal Université Mohamed Boudiaf- M'sila Président

DR Djeriou Ammar Université Mohamed Boudiaf- M'sila Rapporteur

DR Tourchi Ismail Université Mohamed Boudiaf- M'sila Examineur

Année universitaire : 2020/2021

## *DÉDICACES*

*Nous dédions ce travail à toutes les personnes qui nous ont encouragé de près ou de loin pour achever cette mémoire.*

*A nos chers parents tout en*

*Nous inclinant pour leur témoigner nos remerciements et notre  
Reconnaissance envers les sacrifices et le soutien moral qu'ils  
ont fourni*

*Pendant toute la durée de mes études.*

*A nos frères et toutes nos familles.*

*A notre encadreur, nos professeurs qui nous ont soutenu tout le  
long de Nos études.*

*Et enfin à tous nos amis sans exception surtout tous nos  
collègues des Études.*

## **Remerciements**

*Tout d'abord, nous remercions Dieu Tout-Puissant de nous avoir donné le courage et la volonté de faire ce travail, et nous tenons à remercier notre superviseur **M. Djeriou** pour avoir présenté un projet très intéressant et pour ses conseils et son soutien. Un grand merci à tous les membres du jury pour l'intérêt qu'ils portent à notre travail.*

*Un grand merci à l'étudiant **BAKOUR Ala eddine** pour son soutien et sa coopération avec nous.*

*Et tous nos camarades, amis, et tous ceux qui nous ont aidés dans le bon déroulement de ce travail et tout personne qui nous aidé à atteindre ce point-là.*

## RESUME :

Aujourd'hui les énergies renouvelables sont devenues un enjeu incontournable pour la survie de l'humanité en raison de leur présence permanente et de leur source inépuisable. L'énergie solaire est jusqu'à aujourd'hui l'énergie renouvelable la plus prometteuse sous ses différentes sortes : photovoltaïque et thermique. L'énergie photovoltaïque transforme directement la lumière du soleil en électricité. Elle a l'avantage d'être non polluante, souple et fiable. Cette énergie n'est possible que par des panneaux photovoltaïques. Elle résulte de la conversion directe dans un semi-conducteur d'un photon en électron donc en électricité. Mais cette technologie ne cesse d'évoluer avec l'utilisation de cellules d'une épaisseur de l'ordre de quelques microns c'est-à-dire en couche très mince sur un substrat (verre, céramique, polymères). Economiquement, le coût de revient de ces cellules reste faible par rapport aux cellules classiques.

**Mots clés : Energie renouvelable, énergie solaire, les panneaux solaires, photovoltaïque, couche mince.**

## ملخص :

أصبحت الطاقات المتجددة اليوم قضية أساسية لبقاء البشرية بسبب وجودها الدائم ومصدرها الذي لا ينضب. حتى الآن، تعد الطاقة الشمسية هي الطاقة المتجددة الواعدة بأشكالها المختلفة: الضوئية والحرارية. الطاقة الضوئية تحول ضوء الشمس مباشرة إلى كهرباء. انها ميزة كونها غير ملوثة ومرنة وموثوق بها. هذه الطاقة لا يمكن تحقيقها إلا من خلال الألواح الكهروضوئية. وينتج عن التحويل المباشر في أشباه الموصلات من الفوتون إلى الإلكترون ومنه إلى كهرباء. لكن هذه التكنولوجيا تستمر في التطور مع استخدام الخلايا التي يبلغ سمكها بضعة ميكرونات ، وهي طبقة رقيقة جدًا على طبقة سفلية (زجاج ، سيراميك ، بوليمرات). من الناحية الاقتصادية ، تبقى تكلفة هذه الخلايا منخفضة مقارنة بالخلايا التقليدية.

**الكلمات المفتاحية: الطاقة المتجددة ، الطاقة الشمسية ، الألواح الشمسية ، الفوتونات الضوئية ، الطبقة الرقيقة.**

## Abstract :

Today, renewable energies have become an essential issue for human survival because of their permanent existence and inexhaustible source. So far, solar energy is the most promising renewable energy in its various forms: photovoltaic and thermal. Light energy converts sunlight directly into electricity. It has the advantage of being non-polluting, flexible and reliable. This energy can only be achieved through photovoltaic panels. It results from the direct conversion in semiconductors from a photon to an electron and from there to electricity. But this technology continues to evolve with the use of cells a few microns thick, which are very thin on a substrate (glass, ceramics, polymers). Economically, the cost of such cells remains low compared to conventional cells.

**Keywords : renewable energy, solar energy, solar panels, photovoltaic, thin film.**

## Liste des figures :

<b>LES FIGURES</b>	<b>LES TITRES</b>	<b>PAGE</b>
<b>Figure 1.1</b>	Part des énergies primaires dans le TPES mondial en 2014	06
<b>Figure 1.2</b>	Evolution de la part des énergies dans la consommation finale dans le monde, en 1973 et en 2014	07
<b>Figure 1.3</b>	Chute libre	10
<b>Figure 1.4</b>	Effet de lumière	11
<b>Figure 1.5</b>	conversion des 06 forme d'énergies	12
<b>Figure 1.6</b>	centrale hydraulique	15
<b>Figure 1.7</b>	Fonctionnement d'une éolienne	17
<b>Figure 1.8</b>	centrale biomasse	19
<b>Figure 1.9</b>	Schéma de la centrale géothermique de la Bouillante	20
<b>Figure 1.10</b>	l'énergie solaire	22
<b>Figure 2.1</b>	Composants du rayonnement solaire	25
<b>Figure 2.2</b>	Schéma d'une cellule photovoltaïque	26
<b>Figure 2.3</b>	Trois grandes familles des matériaux	28
<b>Figure 2.4</b>	Les trois chercheurs américains	29
<b>Figure 2.5</b>	Principe de la conversion photovoltaïque	32
<b>Figure 2.6</b>	Caractéristiques I(V) de modules en série	33
<b>Figure 2.7</b>	Caractéristiques I(V) de modules en parallèle	33
<b>Figure 2.8</b>	Caractéristiques I(V) Association de modules mixte.	34
<b>Figure 2.9</b>	Puissance maximale idéale et pratique	34
<b>Figure 2.10</b>	Cellules connectées en série avec leur caractéristique courant-tension	35
<b>Figure 2.11</b>	Cellules connectées en parallèle avec leur caractéristique courant-tension	35
<b>Figure 2.12</b>	Caractéristiques I(V) P(V) pour différentes valeurs de température.	36

<b>Figure 2.13</b>	Caractéristiques I(V) P(V) pour différentes valeurs du rayonnement	37
<b>Figure 2.14</b>	<i>Systèmes photovoltaïque autonome [20]</i>	37
<b>Figure 2.15</b>	<i>Système photovoltaïque hybride [20]</i>	38
<b>Figure 2.16</b>	<i>Systèmes photovoltaïque connectés au réseau.</i>	39
<b>Figure .3.1</b>	Principe de fonctionnement d'un système PV autonome	41
<b>Figure .3.2</b>	Caractéristiques des panneaux	42
<b>Figure .3.3</b>	Raccordement des batteries en sérié	44
<b>Figure .3.4</b>	Raccordement des batteries parallèle	45
<b>Figure .3.5</b>	Orientation du champ PV	48
<b>Figure .3.6</b>	Angle d'inclinaison des modules photovoltaïques	48
<b>Figure .3.7</b>	Cellules photovoltaïques	50
<b>Figure .3.8</b>	Régulateur choisie	51
<b>Figure .3.9</b>	Batterie adaptée	51
<b>Figure .3.10</b>	Mesure électrique de l'arbre et des panneaux fixés	53
<b>Figure .3.11</b>	Courant en fonction de la tension	54
<b>Figure .3.12</b>	Variation de la puissance production avec le temps	55

## Liste des tableaux

<b>Liste des tableaux</b>	<b>Page</b>
<b>Tableau 2.1:</b> Classification de Différents types de cellules photovoltaïques au silicium	<b>31</b>
<b>Tableau 3.1:</b> Caractéristiques des panneaux	<b>42</b>
<b>Tableau 3.2:</b> Irradiation moyenne mensuelle de M'sila	<b>49</b>
<b>Tableau 3.3 :</b> l'intensité en fonction de l'inclinaison	<b>52</b>
<b>Tableau 3.4:</b> résultat de l'intensité et la tension	<b>53</b>

# Table des matières

Liste des figures.....	I
Liste des tableaux.....	III
<b>Introduction Générale: .....</b>	<b>01</b>

## **CHAPITRE 1 :Généralité Sur L'Energie**

<b>1.1. Introduction.....</b>	<b>04</b>
<b>1.2. Généralité sur l'énergie.....</b>	<b>04</b>
1.2.1. Définition de l'énergie .....	04
1.2.2. Aperçu historique sur l'énergie.....	05
1.2.3. La situation énergétique.....	06
1.2.4- Les ressources d'énergie.....	08
1.2.5. L'énergie cinétique et potentielle.....	09
1.2.6. Convertisseur énergétique.....	11
1.2.7. L'utilisation d'énergie.....	12
<b>1.3. Généralité sur les énergies renouvelables .....</b>	<b>13</b>
1.3.1. Historique Des Energies Renouvelable.....	13
1.3.2. Définitions les énergies renouvelables.....	14

## **CHAPITRE 2 :Technologie Photovoltaïque**

<b>2.1. Introduction .....</b>	<b>24</b>
<b>2.2. L'énergie du soleil .....</b>	<b>24</b>
2.2.1. La ressource solaire.....	24
2.2.2. Rayonnement solaire.....	24
2.2.3. Les panneaux solaires.....	26
<b>2.3. Historique les cellules photovoltaïques.....</b>	<b>28</b>
<b>2.4. Fabrication des cellules photovoltaïques.....</b>	<b>30</b>
<b>2.5. Technologie des cellules solaires.....</b>	<b>30</b>
<b>2.6. L'effet et le principe de fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque.....</b>	<b>31</b>
<b>2.7. Montages des modules photovoltaïques.....</b>	<b>32</b>
2.7.1. Montage en série .....	32
2.7.2. Montage en parallèle.....	33
2.7.3. Association de modules solaires mixte série /parallèle.....	34
<b>2.8. Constitution d'un générateur photovoltaïque.....</b>	<b>34</b>
2.8.1. Association en série.....	35
2.8.2. Association en parallèle.....	35
<b>2.9. L'effet de la variation des conditions météorologiques.....</b>	<b>36</b>
2.9.1. Influence de la température sur le rendement .....	36
2.9.2. Influence du rayonnement sur les cellules .....	36
<b>2.10. Différents types de systèmes photovoltaïques .....</b>	<b>37</b>
2.10.1. Les systèmes autonomes.....	37
2.10.2. Les systèmes hybrides .....	38
2.10.3. Les systèmes connectés au réseau.....	38

## **Chapitre 3 :Dimensionnement et réalisation de l'arbre solaire**

<b>3.1. Dimensionnement d'un système photovoltaïque.....</b>	<b>41</b>
3.1.1-Constitutions D'un Système Photovoltaïque.....	41
<b>3.2. Etude expérimentale.....</b>	<b>47</b>
3.2.1. Région de M'sila .....	47
3.2.2. Le climat.....	47
3.2.3. Orientation du champ PV.....	48
3.2.4. L'angle d'inclinaison.....	48
<b>3.3. Détermination du gisement solaire.....</b>	<b>48</b>
<b>3.4. Réalisation de l'arbre solaire.....</b>	<b>50</b>
3.4.1. Cellules photovoltaïques .....	50
3.4.2. Barres de fer.....	50
3.4.3. Branchement les cellules.....	51
3.4.4. Câblage électrique.....	51
3.4.5. Régulateur.....	51
3.4.6. Batterie.....	51
<b>3.5. Résultat experimental.....</b>	<b>52</b>
3.5.1. L'inclinaison.....	52
3.5.2. Branchement des cellules photovoltaïques.....	53
3.5.3. Puissance électrique.....	53
3.5.4. Paramètres influant sur le rendement de l'arbre.....	56
<b>3.6. Avantages et inconvénients de l'énergie solaire .....</b>	<b>56</b>
3.6.1. Avantages .....	56
3.6.2. Les inconvénients.....	56
<b>Conclusion Générale.....</b>	<b>58</b>
<b>References Bibliographiques.....</b>	<b>60</b>

# ***INTRODUCTION GENERALE***

# ***INTRODUCTION GENERALE***

---

## **Introduction générale :**

Avant la raréfaction des énergies fossiles il devient primordial pour l'humanité de trouver de nouvelles sources d'énergie. Le soleil fournit à la Terre en permanence une source d'énergie inépuisable en quantité plus ou moins importante un peu partout à la surface du globe.

L'énergie solaire semble donc être une excellente alternative face aux besoins croissants en énergie. Il existe trois manières d'exploiter l'énergie solaire : la filière thermique pour le chauffage direct de l'eau ou de locaux, la filière thermodynamique qui consiste à réchauffer un fluide caloporteur servant à chauffer de la vapeur d'eau qui entraîne un turboalternateur pour produire de l'électricité et la filière photovoltaïque très attractive puisqu'elle transforme directement le rayonnement solaire en électricité.

Des avancées significatives ont été réalisées ces dernières années dans le domaine de la photovoltaïque en la rendant prometteuse pour l'avenir. A l'instar de domaine éolien, la production d'électricité issue du soleil n'étant pas continue et modulable où il est nécessaire de stocker l'énergie afin de pouvoir la fournir à la demande comme le font par exemple les centrales de production d'électricité thermique. Le développement de la filière photovoltaïque repose donc non seulement sur les progrès réalisés dans le domaine de la conversion de la lumière en électricité mais aussi dans celui du stockage de l'énergie.

L'objectif de ce travail est de développer les informations concernant l'énergie solaire et notamment l'énergie solaire photovoltaïque qui est considérée comme une des énergies renouvelables qui peut couvrir la demande mondiale en énergie pour aussi longtemps. De ce fait, le travail de cette étude se présente comme suite :

- ✚ Le premier chapitre abordera des généralités sur l'énergie.
- ✚ Le second chapitre intéresse une description de l'énergie photovoltaïque, les propriétés générales des cellules solaires en couche mince ainsi leurs techniques de déposition et le mécanisme de l'électrodéposition.
- ✚ Le troisième chapitre nous présentons un dimensionnement des systèmes photovoltaïques, la réalisation d'un arbre solaire et son étude expérimentale ces dernières qui sera suivi par une conclusion sur notre travail.

***CHAPITRE 1:***  
***Généralité Sur L'Energie***

## **1.1. L'introduction**

L'énergie est au centre de tous les processus de l'univers. L'énergie est chaleur, mouvement, lumière. Autrement dit, elle est la vie. Même s'il est difficile de saisir l'énergie dans son ensemble, puisque « tout est énergie », nous percevons ses effets chaque jour tout autour de nous, et en nous.

L'énergie est essentielle pour améliorer la qualité de la vie et ouvrir des perspectives dans les pays développés et en développement, c'est pourquoi nos pays et l'humanité tout entière doivent relever le défi qui consiste à

garantir un approvisionnement énergétique suffisant, viable et respectueux de l'environnement à un prix reflétant les paramètres fondamentaux de marché

Par énergie renouvelable, on entend des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse.

Nous présentons dans ce chapitre la définition de l'énergie, la situation énergétique (énergie primaire et secondaire, finale), l'importance de l'énergie dans notre vie avec une présentation de ces différentes sources et formes d'utilisation. Ainsi, nous présentons les historiques de l'énergie, la généralité sur l'énergie renouvelable.

## **1.2. Généralité sur l'énergie**

### **1.2.1. Définition de l'énergie**

L'énergie est une grandeur physique nécessaire à la réalisation d'un travail (mécanique, chimique, ...) matérialisée sous différentes formes : énergie calorifique ou énergie thermique (chaleur), énergie électrique (électricité), énergie mécanique, énergie chimique, énergie nucléaire

- les énergies que nous utilisons actuellement sont :
- les énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz,)
- l'énergie nucléaire (uranium)
- et les énergies renouvelables (énergie éolienne, énergie solaire, énergie bois, géothermie, biomasse, énergie hydraulique, énergie marémotrice, etc...) [1].

- Le pétrole et le gaz naturel sont le principal nerf énergétique car ils brûlent bien et c'est un élément qui intervient dans tous les actes quotidiens de l'homme. Les énergies jouent un rôle

significatif dans le développement des secteurs technologiques, industriels, économiques et sociaux d'un pays.

### **1.2.2. Aperçu historique sur l'énergie**

Depuis toujours, l'homme a consommé de l'énergie. Cette consommation était relativement linéaire et l'origine presque exclusivement renouvelable (biomasse, énergie hydroélectrique, énergie animale, ...) jusqu' à la révolution industrielle. C'est durant cette période, marquée par des développements industriels toujours plus énergivores, que l'essor des énergies fossiles (essentiellement le charbon à l'époque) a vu le jour. Leur consommation commença alors à augmenter de façon exponentielle. La découverte du charbon, si abondant dans la nature et les avancées technologiques dans son utilisation sont à l'origine de la révolution industrielle. La prospérité et l'expansion post-industrielle de l'après-guerre sont indéniablement liées à l'usage du pétrole et puis après le gaz naturel. L'un de ses fruits ; l'énergie électrique.

Une grande proportion de l'électricité produite dans le monde provient du charbon et du gaz naturel et ceci pour plus d'un siècle. L'électricité est la forme « première » [2].

de l'énergie, grâce à la facilité de son usage et de sa distribution. La demande est en croissance permanente, due à l'usage de plus en plus grand d'appareils électriques et électroniques par les consommateurs, par l'augmentation de l'activité industrielle associée et par son élargissement au monde entier.

Pour l'homme moderne, le rêve de domination de la nature s'est traduit essentiellement par une tension obsessionnelle vers une production et une consommation toujours plus grande et plus excessive. Extraire de la nature un maximum de bien-être matériel a été, et demeure pour une large part, l'idéal des sociétés industrielles et a fortiori des pays en développement. Chacun dès lors garde les yeux rivés sur le taux de croissance du PIB, qui de simple indicateur économique est devenu une véritable religion, l'idole des temps modernes.

Malheureusement, avec la révolution industrielle, l'économie va s'affirmer comme science mécaniste, désincarnée de la nature et d'un homme réduit à l'état l'homme economicus. En perdant toute référence éthique, l'économie se coupe des motivations de conservation, de solidarité et de transmission aux générations futures d'un patrimoine naturel.

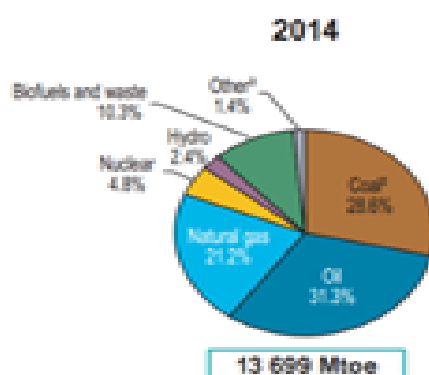
### 1.2.3. La situation énergétique

Les énergies primaires conventionnelles intègrent le pétrole, le charbon et le gaz naturel. Ce sont des énergies disponibles, faciles à transporter, à stocker et à utiliser. Leur maîtrise a permis le développement industriel et économique. Mais l'inégale répartition de ressources à la surface de la Terre, la fluctuation des coûts et Leur épuisement prévisible posent aujourd'hui la question de Leur préservation.

Le système énergétique distingue l'énergie « primaire », le « vecteur énergétique » et l'énergie « finale ».

#### 1.2.3. a) L'énergie primaire

L'énergie primaire est l'énergie potentielle du Soleil et de la Terre contenue dans les ressources naturelles avant toute transformation. Pour se donner un aperçu de la demande primaire en énergie, qu'elle soit directement extraite du sol (combustibles fossiles) ou transformée via des technologies vertes, on utilise le TPES, acronyme de « Total Primary Energy Supply », traduit par « approvisionnement total en énergie primaire » ou « consommation énergétique primaire », qui comptabilise à la fois l'énergie extraite d'un pays et l'énergie importée pour répondre à la demande. Statistiquement, les principales ressources naturelles utilisées aujourd'hui sont les combustibles fossiles – pétrole, charbon et gaz – qui constituent 81% de l'approvisionnement énergétique dans le monde en 2014, ce qui représente 13 699 Mtoe (millions de tonnes équivalent pétrole), soit 573,5 EJ (Exa Joule) (figure cidessous). Le pétrole est en tête, avec 4 287 Mtoe, soit 179,5 EJ produits (représentant 31,3% dans la part des énergies primaires), suivi du charbon (28,6%) et du gaz (21,2%). La biomasse (10,3%) et l'uranium (4,8%) sont deux autres ressources naturelles également très utilisé



**Fig1.1** : Part des énergies primaires dans le TPES mondial en 2014,  
**Source** : Agence internationale de l'énergie [AIE], 2016 [3]

1.2.3.b) Un vecteur énergétique

Un vecteur énergétique, ou énergie secondaire, est une forme d'énergie transformée que l'on ne retrouve pas directement dans la nature et qui sert à « véhiculer » une autre forme d'énergie. Il existe deux vecteurs énergétiques : l'électricité et l'hydrogène. L'hydrogène, est l'élément le plus simple et le plus abondant de l'univers. Sur Terre, il est un vecteur énergétique qui n'existe presque pas à l'état naturel. L'hydrogène sous forme de gaz, soit du dihydrogène (H<sub>2</sub>), devient un vecteur énergétique servant de phase intermédiaire entre l'énergie primaire et finale. Cependant il n'existe pas à l'état naturel. Combiné à l'oxygène pour former de l'eau (H<sub>2</sub>O) ou au carbone pour former des chaînes carbonées telles que les hydrocarbures (pétrole, charbon), on doit utiliser un apport énergétique pour l'extraire de ces molécules. L'avantage incontestable du dihydrogène est qu'il est, contrairement à l'électricité, stockable. On le stocke généralement dans une pile à combustible (EIA, 2017) [4].

1.2.3.c) L'énergie finale

L'énergie finale est l'énergie consommée et facturée à chaque bâtiment, en tenant compte des pertes liées à la production, au transport et à la transformation de l'énergie primaire. Pour la mesurer, on utilise le TFC, acronyme de « total final consumption », estimé à 9 425 Mtoe en 2014.

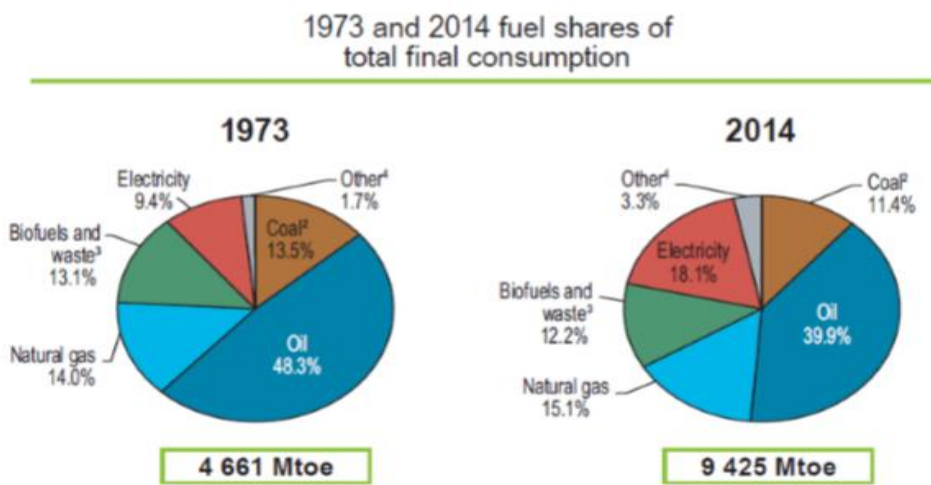


Fig1.2 : Evolution de la part des énergies dans la consommation finale dans le monde, en 1973 et en 2014

Source : Agence internationale de l'énergie, [AIE], 2016 [5]

### **1.2.4- Les ressources d'énergie**

Une source d'énergie est un phénomène physique ou chimique qui sert à produire un autre type d'énergie. Cette dernière peut être primaire ou secondaire, selon si elle est issue d'un mécanisme naturel ou si elle est transformée volontairement.

#### **1.2.4.a) Les énergies non renouvelables**

La Ressources naturelles non renouvelables (ou plus simplement ressources non renouvelables) : les ressources naturelles qui ne se régénèrent pas suffisamment (en termes de quantités ou de vitesse de régénération) pour permettre une extraction économique durable à l'échelle du temps humain.

Comme Leur nom l'indique, elles correspondent à des sources d'énergies limitées, polluantes et elles ne se renouvellent pas. Il s'agit principalement :

- Les combustibles fossiles : pétrole, gaz naturel et charbon qui sont des formes d'énergies chimique provenant de la biomasse stockée des millions d'années.
- La fission nucléaire : est dérivée de l'uranium constitue le "combustible nucléaire.

#### **1.2.4.b) Problématique énergétique**

La consommation actuelle repose presque entièrement sur l'usage des énergies fossiles : (le pétrole, le gaz naturel, le charbon et l'uranium). Les réserves d'énergies avec ce augmente (alors que la consommation mondiale d'énergie sont limitées fossiles sont ressources non renouvelables ces ressources) et économique remarquable-développement socio, (augmentation des émissions de gaz à effet de serre tel que le gaz carbonique polluantes avec pour conséquence un réchauffement climatique global de la planète). Il est nécessaire d'engager une transition énergétique vers un modèle plus durable, donc utilisation d'autres ressources : énergies renouvelables.

#### **1.2.4. C) Les énergies renouvelables**

Ressources naturelles renouvelables (ou plus simplement ressources renouvelables), les ressources naturelles qualifiées d'inépuisables, sans limite de temps, et dont le taux de régénération est supérieur au taux d'exploitation ou de consommation.

Elles ont été les premières employées par l'homme et continuent largement de l'être. Il s'agit de : l'énergie solaire, la géothermie, l'énergie éolienne, l'énergie hydroélectrique et l'énergie

biomasse. Bien que ces énergies soient pratiquement inépuisables (échelle humain) elles se présentent sous forme de flux et non de stock ce qui pose problème pour leur exploitation [6].

### **1.2.5. L'énergie cinétique et potentielle**

Ces deux formes d'énergie sont indispensables pour construire le concept de conservation, et notamment les notions de conversion et de transfert d'énergie. Comme pour toutes activités de sciences, la manipulation et l'expérimentation sont nécessaires pour s'approprier des connaissances, d'autant plus qu'il s'agit d'un concept très difficile d'accès. C'est ce que défend Colomb : " il Ya toute la question fondamentale de l'aspect expérimentale et des manipulations, d'autant plus nécessaires que le concept est difficile." (1985, p. 23) [7].

#### **1.2.5.1. L'énergie cinétique**

L'énergie Cinétique est l'énergie que possède un corps du fait de son mouvement. L'énergie cinétique d'un corps est égale au travail nécessaire pour faire passer ledit corps du repos à son mouvement. On peut déduire de cela, dans le cadre de la physique newtonienne, qu'une variation d'énergie cinétique d'un corps pendant une certaine durée est égale au travail des forces externes exercées sur ce corps. C'est le théorème de l'énergie cinétique.

Le terme même d'énergie cinétique semble remonter au physicien William Thomson, plus connu sous le nom de Lord Kelvin. Il dérive en fait du mot grec kinési signifiant mouvement. Toutefois, le concept est plus ancien puisqu'il provient des réflexions sur la mécanique de Gottfried Leibniz et Johann Bernoulli, qui décrivaient l'énergie cinétique comme une vis Viva, en latin, c'est-à-dire la force vivante responsable du mouvement des corps. Leibniz se fit l'avocat d'une définition mathématique de la vis Viva, qu'il introduisit comme le produit de la masse d'un objet par le carré de sa vitesse ( $mv^2$ ), pendant les années 1676-1689, par opposition à la quantité de mouvement  $mv$  de Descartes et Newton censée jouer un rôle similaire [8].

#### **1.2.5.2. l'énergie potentielle**

Lorsqu'un corps est soumis à une force (par exemple une bille chutant d'une hauteur H au-dessus du sol), ce dernier peut se déplacer sur une certain

Stance sous l'action de cette force qui effectue un travail. On peut donc considérer qu 'au début de la mise en mouvement du corps sous l'action de la force, il possédait une réserve d'énergie, liée à cette force, qui va être utilisée par le travail de celle-ci lorsqu'elle déplace le corps. Cette considération est à l'origine du concept d'énergie potentielle.

L'énergie potentielle est une notion fondamentale en physique, en particulier en dynamique (→ mécanique).

Comme toute énergie, l'énergie potentielle s'exprime en joules (J).

À chaque type d'interaction correspond une énergie potentielle particulière : de pesanteur, électrique, élastique, etc...

### 1.2.5.2. a) l'énergie potentielle de pesanteur



**Fig1.3** : Chute libre

L'énergie potentielle de pesanteur est proportionnelle à l'altitude  $z$  du corps et à l'intensité  $g$  du champ de pesanteur considéré. Elle se note  $E_{pp}$  et est exprimée en joules (J). Cette énergie est définie par rapport à une position choisie arbitrairement servant de référence, en général le sol :

$$E_{pp} = M \cdot g \cdot Z$$

avec  $m$  en kilogrammes (kg),  $g$  en newtons par kilogramme ( $N \cdot kg^{-1}$ ) et  $z$  en mètres (m).

### 1.2.5.2.b) l'énergie potentielle élastique :



**Fig1.4 :** Effets de lumière

Une particule chargée placée dans un champ électrique ( $\rightarrow$  électricité) possède une énergie potentielle électrique, notée  $E_{pe}$ . Cette énergie dépend de la charge  $q$  de la particule et du potentiel électrique  $V$  du point où se trouve la particule :

$$E_{pe}=q.V$$

avec  $q$  en coulombs (C) et  $V$  en volts (V).

L'énergie potentielle élastique est l'énergie potentielle emmagasinée dans un corps élastique ( $\rightarrow$  solide) lorsque ce dernier est comprimé ou étiré par rapport à sa position naturelle. Lorsque la force comprimant ou étirant le corps élastique cesse, celui-ci tend naturellement à retourner à sa position naturelle et transforme ainsi son énergie potentielle en énergie cinétique [9].

### 1.2.6. Convertisseur énergétique

L'énergie ne peut ni se créer ni se détruire mais uniquement se transformer d'une forme à une autre. C'est le principe de conservation de l'énergie. Il est nécessaire de convertir l'énergie afin de la rendre compatible avec l'utilisation [7].

Voici un graphique indiquant les principaux convertisseurs d'énergie :



- les usages mécaniques ou force motrice fixe ou mobile
- les usages spécifique de l'électricité (électrolyse + froid ).

### **1.2.7. c- le résidentiel, tertiaire et l'agriculture**

Au niveau mondiale, ce secteur est et le premier consommateur d'énergies commerciales et il absorbe également la quasi-totalité de milliard de tep d'énergies traditionnelles (seules les ressources de population les plus pauvres) [10].

## **1.3. Généralité sur les énergies renouvelables**

### **1.3.1. HISTORIQUE DES ENERGIES RENOUVELABLES**

SI le Terme énergie renouvelable est relativement récent apparition en 1970, la totalité des énergies qu'existe depuis quasiment l'origine de la terre et leur utilisation par l'homme remonte à plusieurs centaines voir à plusieurs milliers d'années.

La crise pétrolière du début des années 1970 a révélé au grand public, mais également aux gouvernements, que la dépendance vis-à-vis du pétrole pouvait aussi entraîner une certaine vulnérabilité au chantage. En régulant le prix du pétrole sur les marchés des matières premières, les pays producteurs pouvaient influencer le cours du dollar et les possibilités d'exportation ; ils avaient ainsi directement prise sur le marché mondial.

Différents mécanismes, dont le recours accru au gaz naturel, ont certes permis de limiter cette influence, mais le choc pétrolier comme il a alors été nommé a profondément marqué l'Allemagne. Le gouvernement fédéral tenta de réduire la dépendance au pétrole en développant le nucléaire utilisation plus importante du charbon. Parallèlement, des fonds furent débloqués pour la recherche en matière de système de production d'énergie alternatif. L'université de Stuttgart reprit le développement et les essais d'installations éoliennes et le projet Growian vit la construction d'une grande éolienne elle serait aujourd'hui plutôt considérée comme une installation moyenne. Le projet fut cependant un échec, car il nécessitait de nombreuses mises au point complémentaires. Ce travail de perfectionnement se réalisa cependant assez peu dans les universités et les instituts de recherche allemands, mais plutôt dans d'innombrables arrière-cours et garages où des bricoleurs passionnés fabriquaient pour eux-mêmes, mais parfois aussi pour quelques clients isolés, des installations de production d'électricité à partir du vent, de l'eau et du soleil ou de la chaleur stockée via des capteurs solaires, afin de couvrir leurs propres besoins en électricité. Cette évolution se poursuivit durant toutes les années 1980 et ce n'est qu'au début des années 1990 que

les premières usines apparurent et entamèrent la production en série de telles installations. Ainsi, l'une des sociétés leaders dans la production d'installations éoliennes, Enercon, a vu le jour au fond d'un garage. C'est grâce à une aide octroyée par la coalition rouge-verte qui gouvernait alors le Land que la société a pu financer le développement de sa première construction en série d'éoliennes [11].

### **1.3.2. Définitions les énergies renouvelables**

Les énergies renouvelables sont des sources d'énergie d'origine naturelle dont le renouvellement est suffisamment rapide à l'échelle humaine du temps pour qu'elles puissent être considérées comme presque inépuisables. Elles sont issues du rayonnement solaire, des vents, du cycle de l'eau, de la biomasse (tout ce qui est d'origine biologique, principalement végétale), du flux de chaleur interne de la Terre, de l'effet de l'attraction lunaire et solaire sur les océans... Elles s'opposent ainsi aux énergies minières et fossiles, dont les stocks sont forcément limités puisqu'ils se sont constitués lors de la formation du système solaire (uranium, thorium, potassium) ou encore au cours des âges géologiques, à partir d'une fraction de la biomasse terrestre qui a pu se fossiliser et se transformer (au cours de millions d'années) en charbon, pétrole et gaz naturel. Les énergies renouvelables sont loin de constituer une nouveauté puisqu'elles ont été les premières à être utilisées par les hommes.

Si un intérêt s'est manifesté pour les énergies renouvelables après le premier choc pétrolier de 1973, le recours à celles-ci constitue, depuis les années 1990, une alternative aux combustibles fossiles afin de préserver l'environnement et de lutter contre le réchauffement climatique, lié en grande partie à l'émission de gaz à effet de serre provenant des diverses utilisations des énergies fossiles. C'est aussi un type de politique énergétique qui repose sur l'indépendance et la sécurité de l'approvisionnement. Le développement des énergies renouvelables dans un tel contexte de transition inévitable nécessite l'émergence de technologies radicalement différentes de celles utilisées pour exploiter les énergies fossiles, d'où un coût initialement important qui a longtemps freiné leur essor [12].

Il existe plusieurs types de sources d'énergies renouvelables parmi eux : l'énergie hydroélectrique, l'énergie éolienne, l'énergie de la biomasse et l'énergie photovoltaïque. Les sources d'énergies renouvelables proviennent directement ou indirectement du soleil. Elles sont donc disponibles.

### 1.3.2.1. L'énergie hydraulique

L'énergie hydraulique est une énergie renouvelable très faiblement émettrice de gaz à effet de serre. Cette source d'énergie renouvelable exploite les mouvements de l'eau actionnés par le Soleil et la gravité à travers le cycle de l'eau, les marées et les courants marins. Qu'elles utilisent les chutes d'eau naturelles (cascades) ou artificielles (barrages hydroélectriques), le débit des cours d'eau ou les courants marins (marée, circulation thermo haline, etc.), les centrales hydrauliques produisent de l'énergie mécanique convertie la plupart du temps en électricité (hydroélectricité) [8].

#### 1.3.2.1.a) Fonctionnement d'une centrale hydraulique

Le fonctionnement d'une centrale hydraulique ou barrage consiste à utiliser l'énergie donnée par une quantité d'eau en mouvement pour pouvoir produire de l'énergie électrique. Un barrage est donc utilisé pour retenir une grande quantité d'eau sous la forme d'un lac de retenue. Quand on veut produire de l'électricité, on ouvre les vannes du barrage, l'eau rentre par ces vannes et passe par un conduit dans le barrage qui va lui permettre d'augmenter sa vitesse. Après cette conduite, l'eau, grâce à cette vitesse va faire tourner une turbine qui est reliée à un alternateur qui va produire de l'électricité. L'eau est ensuite libérée au pied du barrage et reprend son cours normal.

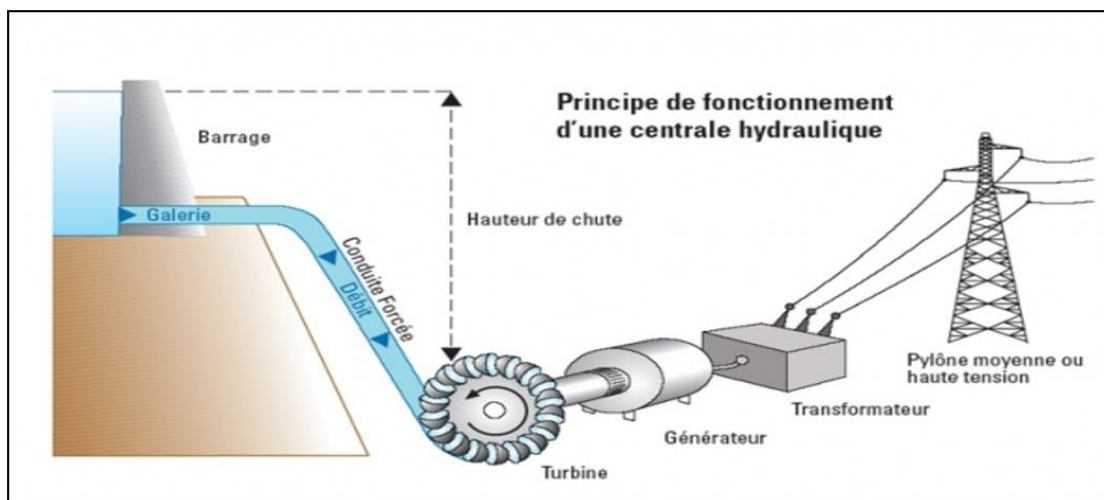


Fig1.6 centrale hydraulique

#### 1.3.2.2- l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est une source d'énergie qui dépend du vent. Le soleil chauffe inégalement la Terre, ce qui crée des zones de températures et de pression atmosphérique différentes tout autour

du globe. De ces différences de pression naissent des mouvements d'air, appelés vent. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité dans des éoliennes, appelées aussi aérogénérateurs, grâce à la force du vent.

### **1.3.2.2. a) LE fonctionnement d'une éolienne**

Une éolienne produit de l'électricité grâce au vent. Sa force actionne les pales du rotor, qui met en mouvement un alternateur.

#### **1. La rotation des pales**

Sous l'effet du vent, le rotor, se met en marche. Ses pales tournent.

Le rotor est situé au bout d'un mât car les vents soufflent plus fort en hauteur. Suivant le type d'éoliennes, le mât varie entre 10 et 100 m de haut.

Le rotor comporte généralement 3 pales.

#### **2. La production d'électricité**

Pour pouvoir démarrer, une éolienne nécessite une vitesse de vent minimale d'environ 15 km/h.

Pour des questions de sécurité, l'éolienne s'arrête automatiquement de fonctionner lorsque le vent dépasse 90 km/h.

Le rotor entraîne un axe dans la nacelle, appelé arbre, relié à un alternateur.

Grâce à l'énergie fournie par la rotation de l'axe, l'alternateur produit un courant électrique alternatif.

#### **3. L'adaptation de la tension**

Un transformateur situé à l'intérieur du mât élève la tension du courant électrique produit par l'alternateur pour qu'il puisse être plus facilement transporté dans les lignes à moyenne tension du réseau [13].

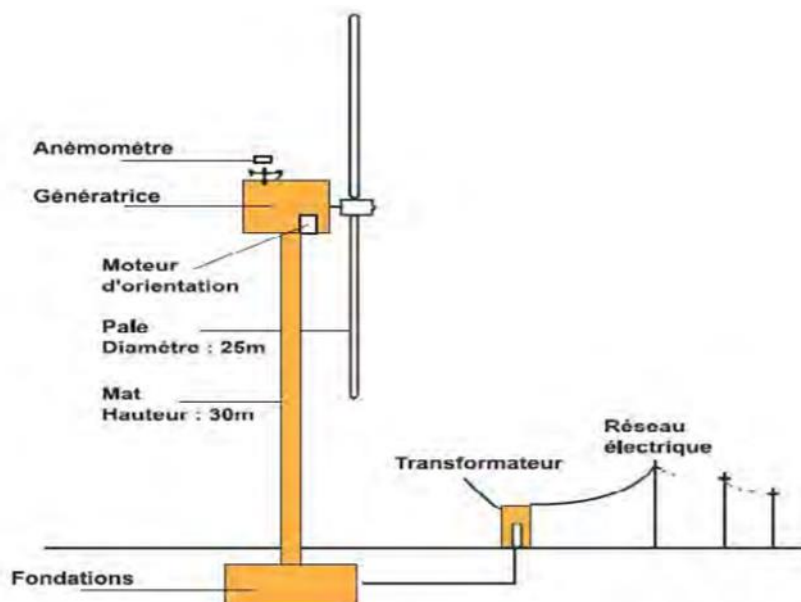


Fig 1.7: Fonctionnement d'une éolienne.

### 1.3.2.3. 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.

#### 1.3.2.3.a) Bois L'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.

**1.3.2.3.b) Le bio carburant :**

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.

**1.3.2.3.c) Le biogaz :**

Le biogaz est un mélange composé essentiellement de méthane (CH<sub>4</sub>) et de gaz carbonique (CO<sub>2</sub>). Suivant sa provenance [14], il contient aussi des quantités variables d'eau, d'azote, dihydrogène sulfuré (H<sub>2</sub>S), d'oxygène, d'aromatiques, de composés organo- halogénés (chlore et fluor) et des métaux lourds, ces trois dernières familles chimiques étant présentes à l'état de traces. Le biogaz est produit par un processus de fermentation anaérobie des matières organiques animales ou végétales, qui se déroule en trois étapes (hydrolyse, acidogènes et méthanogènes) sous l'action de certaines bactéries. Il se déroule spontanément dans les centres d'enfouissement des déchets municipaux, mais on peut le provoquer artificiellement dans des enceintes appelées "digesteurs" où l'on introduit à la fois les déchets organiques solides ou liquides et les cultures bactériennes. Cette technique de méthanisation volontaire peut s'appliquer :

- Aux ordures ménagères brutes ou à leur fraction fermentescible,
- Aux boues de stations d'épuration des eaux usées urbaines ou industrielles,
- Aux déchets organiques industriels, (cuirs et peaux, chimie, parachimie...),
- Ainsi qu'aux déchets de l'agriculture et de l'élevage (fientes, lisier, fumier...).

Les voies de valorisation du Biogaz sont : chaleur seule, électricité seule, cogénération, carburant automobile, injection dans le réseau de gaz naturel.

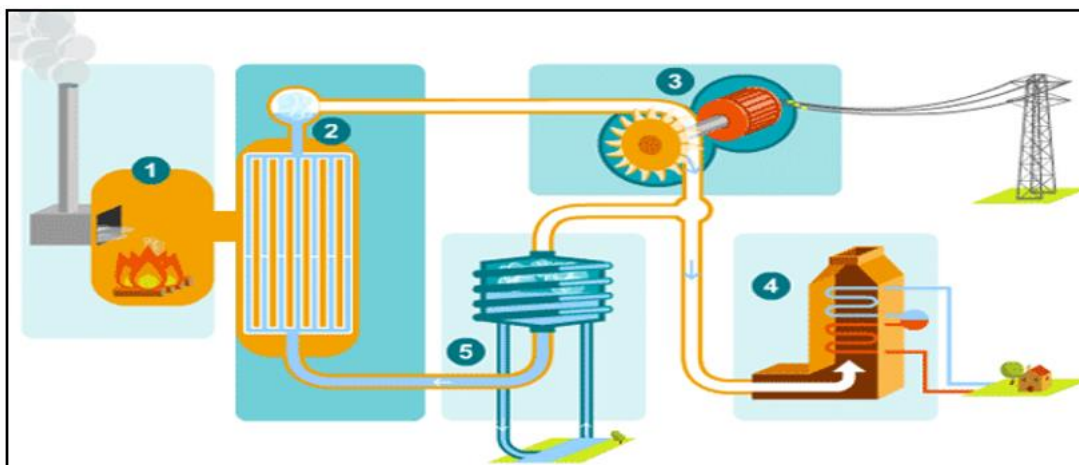


fig 1.8 centrale biomasse

#### 1.3.2.4. L'énergie de la Géothermie

L'énergie géothermique est localement exploitée pour chauffer ou disposer d'eau chaude depuis des millénaires, par exemple : en Chine, dans la Rome antique et dans le bassin méditerranéen.

La géothermie est une énergie renouvelable provenant de l'extraction de l'énergie contenue dans le sol. Cette chaleur résulte essentiellement de la désintégration radioactive des atomes fissiles contenus dans les roches. Elle peut être utilisée pour le chauffage, mais aussi pour la production d'électricité. Il s'agit de l'une des seules énergies ne dépendant pas des conditions atmosphériques.

En revanche, elle dépend de la profondeur à laquelle elle est puisée. La géothermie profonde (quelque 2.500 mètres pour 150 à 250 °C) permet de produire de l'électricité.

La géothermie moyenne dans les gisements d'eau notamment de 30 à 150 °C alimente les réseaux de chaleur urbains.

La géothermie à très basse énergie entre 10 et 100 mètres de profondeur et inférieure à 30 °C est celle exploitée par les pompes à chaleur.

Notons toutefois que pour que l'énergie géothermique demeure durable, le rythme auquel est puisée cette chaleur ne doit pas dépasser la vitesse à laquelle celle-ci voyage à l'intérieur de la Terre [8]

### 1.3.2.4.a) Principe de Fonctionnement de la Géothermie

Une centrale géothermique produit de l'électricité grâce à la chaleur de la Terre qui transforme l'eau contenue dans les nappes souterraines en vapeur et permet de faire tourner une turbine et un alternateur.

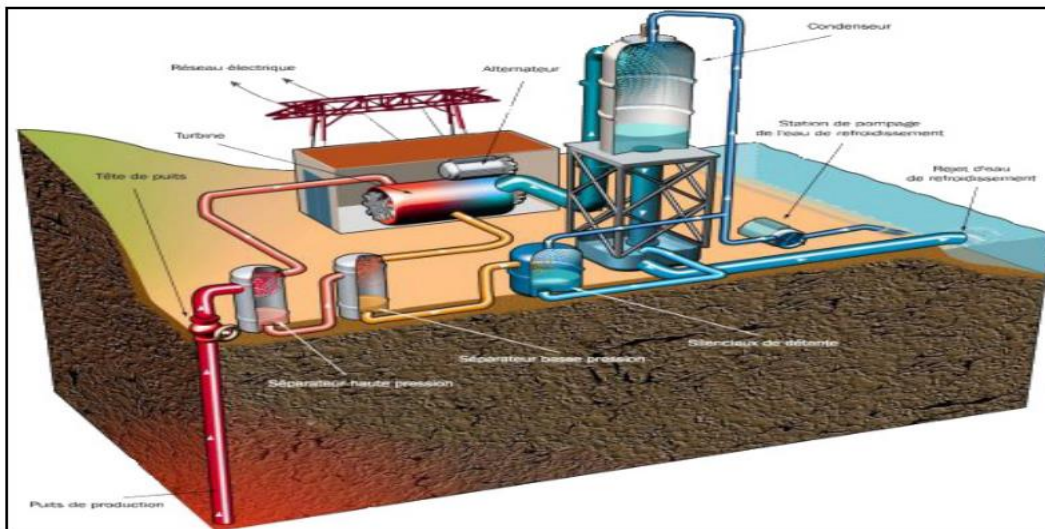


Fig1.9 : Schéma de la centrale géothermique de la Bouillante

### 1.2.3.5. L'énergie solaire

Le rayonnement solaire constitue la ressource énergétique la mieux partagée sur la terre et la plus abondante. La quantité d'énergie libérée par le soleil et captée par la planète terre pendant une heure et pourrait suffire à couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant un an. Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1367 Watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre pour une distance moyenne terre-soleil de 150 Million de km, c'est ce que l'on appelle la constante solaire qui est égale à  $1367\text{W/m}^2$ . La partie d'énergie reçue sur la surface de la terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser. Celle-ci est caractérisée par le nombre de masse d'air (AM). Le rayonnement qui atteint le niveau de la mer à midi dans un ciel clair est de  $1000\text{W/m}^2$  et est décrit en tant que rayonnement de la masse d'air "1" (ou AM1). Lorsque le soleil se déplace plus bas dans le ciel, la lumière traverse une plus grande épaisseur d'air, et perdant plus d'énergie. Puisque le soleil n'est au zénith que durant peu de temps, la masse d'air est donc plus grande en permanence et l'énergie disponible est donc inférieure à  $1000\text{W/m}^2$  [15].

L'énergie solaire est l'énergie diffusée par le rayonnement du Soleil. Des ondes radio aux rayons gamma en passant par la lumière visible, tous ces rayonnements sont constitués de photons, les composants fondamentaux de la lumière et les vecteurs de l'énergie solaire. L'énergie solaire est issue des réactions de fusion nucléaire qui animent le Soleil.

Sur Terre, l'énergie solaire est à l'origine du cycle de l'eau, du vent et de la photosynthèse du règne végétal. Le règne animal, y compris l'humanité, dépendent des végétaux sur lesquels sont fondées toutes les chaînes alimentaires.

L'énergie solaire est ainsi à l'origine de toutes les formes de production énergétique aujourd'hui utilisées sur Terre, à l'exception de l'énergie nucléaire, de la géothermie et de l'énergie marémotrice. L'homme utilise l'énergie solaire pour la transformer en d'autres formes d'énergie : énergie chimique (les aliments que notre corps utilise), énergie cinétique, énergie thermique, énergie électrique ou biomasse.

#### **1.3.2.5.a) Fonctionnement d'une installation solaire**

3 éléments sont nécessaires à une installation photovoltaïque : des panneaux solaires, un onduleur et un compteur. Ces trois éléments permettent de récupérer l'énergie transmise par le soleil, de la transformer en électricité puis de la distribuer à l'ensemble des clients connectés au réseau.

- Intégrés au toit, les panneaux solaires convertissent directement la lumière en courant électrique continu.
- L'onduleur permet ensuite de transformer l'électricité obtenue en courant alternatif compatible avec le réseau. Le compteur mesure la quantité de courant injectée dans le réseau[16].



**fig 1.10:** l'énergie solaire

### **1.3.2.6. L'énergie photovoltaïque**

Le mot « photovoltaïque » vient du grec « phôtos » signifiant lumière et de « Volta » du nom du physicien italien qui, en 1800, découvrit la pile électrique. Mais c'est en 1839 que le français Antoine Edmond Becquerel fut le premier à mettre en évidence cette conversion particulière d'énergie.

Par l'utilisation de panneaux photovoltaïques, une partie du rayonnement solaire est directement transformée en électricité. Ces panneaux solaires sont composés de cellules photovoltaïques constituées principalement de silicium. Le principe de l'obtention du courant par les cellules photovoltaïques se nomme effet photoélectrique, qui consiste à l'émission d'électrons par un matériau soumis à l'action de la lumière. Cette production d'énergie électrique peut alors être stockée dans des batteries ou convertie à l'aide d'un onduleur pour être distribuée dans le réseau électrique [17].

Les cellules photovoltaïques sont fabriquées avec des matériaux semi-conducteurs principalement produits à partir de silicium. Ces matériaux émettent des électrons lorsqu'ils sont soumis à l'action de la lumière. Ceux-ci sont éjectés du matériau et ils circulent dans un circuit fermé, produisant ainsi de l'électricité.

***Chapitre 2***  
***Généralité Technologie***  
***Photovoltaïque***

## **2.1. Introduction**

Aujourd'hui dans le monde entier, L'énergie solaire est un besoin fondamental au développement économique, en plus de ça l'énergie solaire est une source d'énergie qui dépend du soleil. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité à partir des panneaux photovoltaïques ou des centrales solaires thermiques, grâce à la lumière du soleil captée par des panneaux solaires. Elle est à plusieurs avantages: il s'agit d'une énergie inépuisable puis qu'elle est issue des rayons du soleil et, de ce fait, elle fiable et respecte la nature et l'environnement. Par ailleurs, l'intégration des panneaux photovoltaïques est simple et l'installation est facile d'emploi. Le coût de fonctionnement est faible .

## **2.2- L'énergie du soleil**

### **2.2.1 -La ressource solaire**

Le soleil est une immense sphere de plasma de diamètre 109 fois supérieur à celui de la terre, de densité 1,41 fois; la pression qui y règne à sa surface est de plusieurs milliards de fois plus forte que celle observée au niveau de la surface terrestre. Le constituant principal du soleil est L'hydrogène, des réactions thermonucléaires se produisent alors en permanence Provo quant la fusion de L'hydrogène en Helium. La température à la surface du soleil est de 5800°K et peut atteindre 20.106 à son centre. A chaque seconde, le soleil perd 4,5.106 tonnes de matières sous forme de rayonnement électromagnétique se propageant à la vitesse de 300.000 km/s. notons toutefois que la perte de matière est infime vis-à-vis de la masse totale du soleil. Ce rayonnement solaire est équivalent au rayonnement qui serait émis par un corps noir à 5800°K. [18] En d'autres termes, c'est un rayonnement électromagnétique, dont le spectre couvre toutes les fréquences possibles et dont l'intensité est maximum dans la gamme visible .

### **2.2.2 - Rayonnement solaire**

Notre soleil est une étoile naine qui se compose de 74% d'hydrogène, 25% d'hélium Et d'une fraction d'éléments plus lourds, sa température à la surface est d'environ 5530°C [19].

#### **a- Le rayonnement direct :**

Le rayonnement direct est la différence entre le rayonnement global et le rayonnement Diffus.

C'est le rayonnement solaire qui se forme de rayons parallèles provenant du soleil sans avoir été dispersé par l'atmosphère.

Le rayonnement direct est le rayonnement incident sur un plan donné en provenance d'un petit angle solide centré sur le disque solaire, il parvient en ligne droite et par temps clair.

### **b - Le rayonnement diffus :**

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

Le rayonnement diffus est constitué des photons diffusés par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). Sa structure varie avec les conditions météorologiques. Par temps couvert, on admet qu'il est isotrope, c'est-à-dire qu'on reçoit un rayonnement identique de toutes les directions de la voûte céleste.

### **C - Le rayonnement réfléchi ou l'albédo du sol :**

C'est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige, etc....) [19]. ci-dessous est schématisé l'ensemble des rayonnements solaires reçus sur une surface terrestre

### **d- Le rayonnement global :**

Le rayonnement global est subdivisé en rayonnements directs, diffus et reflété par le Sol). Dans la (figure 2.1)

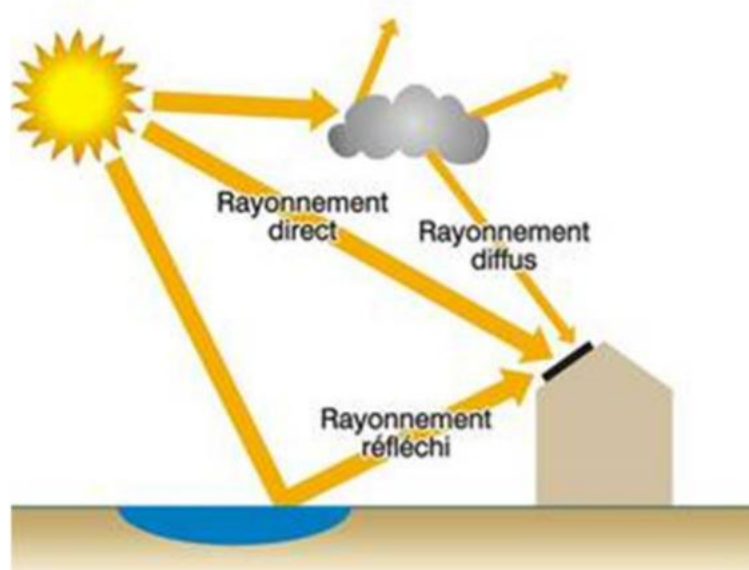


Figure 2.1 : Composants du rayonnement solaire .

### 2.2.3- Les panneaux solaires :

#### 2.2.3.a- Définition

Un panneau photovoltaïque est constitué de plusieurs cellules en série ou en Parallèle afin d'obtenir une tension souhaitée.

#### 2.2.3.b- Cellules photovoltaïque

La cellule photovoltaïque ou encore photopile est l'élément constitutif des modules Photovoltaïques.

La cellule photovoltaïque est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe L'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique [20].

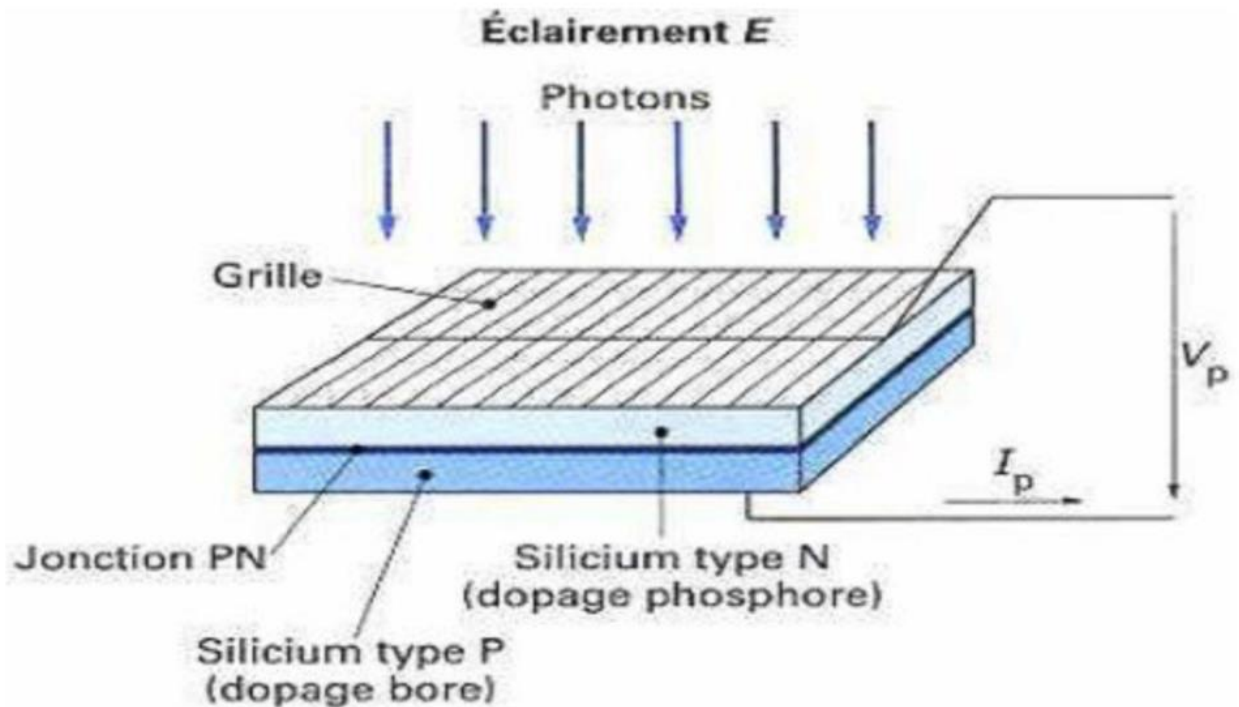


Figure 2.2: Schéma d'une cellule photovoltaïque

#### 2.2.3.C- Semi-conducteur

Un semi-conducteur est un matériau qui a les caractéristiques électriques d'un isolant, mais pour lequel la probabilité qu'un électron puisse contribuer à un courant électrique, quoique faible, est suffisamment importante. En d'autres termes, la conductivité électrique d'un semi-conducteur est intermédiaire entre celle des métaux et celle des isolants. Le comportement électrique des semi-conducteurs est généralement modélisé à l'aide de la théorie des bandes d'énergie. Ce modèle stipule qu'un électron dans un solide ne peut que prendre des valeurs d'énergie comprises dans certains intervalles que l'on nomme « bandes », plus spécifiquement bandes permises, lesquelles sont séparées par d'autres « bandes » appelées bandes d'énergie interdites ou bandes interdites. Deux bandes d'énergie permises jouent un rôle particulier :

- la dernière bande complètement remplie, appelée « bande de valence »
  - la bande d'énergie permise suivante appelée « bande de conduction » La bande de valence est riche en électrons mais ne participe pas aux phénomènes de conduction (pour les électrons). La bande de conduction, quant à elle, est soit vide (comme aux températures proches du zéro absolu dans un semi-conducteur) soit semi-remplie (comme dans le cas des métaux) d'électrons. Cependant c'est elle qui permet aux électrons de circuler dans le solide. Dans les conducteurs (métaux)

La bande de conduction et la bande de valence se chevauchent. Les électrons peuvent donc passer directement de la bande de valence à la bande de conduction et circuler dans tout le solide. Dans un semi-conducteur, comme dans un isolant, ces deux bandes sont séparées par une bande interdite, appelée couramment par son équivalent anglais plus court « gap ». L'unique différence entre un semiconducteur et un isolant est la largeur de cette bande interdite, largeur qui donne à chacun ses propriétés respectives. Dans un isolant cette valeur est si grande (aux alentours de 6 eV pour le diamant par exemple) que les électrons ne peuvent passer de la bande valence à la bande de conduction : les électrons ne circulent pas dans le solide. Dans les semi-conducteurs cette valeur est plus petite (1,12 eV pour le silicium, 0,66 eV pour le germanium, 2,26 eV pour le phosphore de gallium). Si on apporte cette énergie (ou plus) aux électrons, par exemple en chauffant le matériau, ou en lui appliquant un champ électromagnétique, ou encore dans certains cas en l'illuminant, les électrons sont alors capables de passer de la bande de valence à la bande de conduction, et de circuler dans le matériau [21].

Dans un atome isolé, les électrons prennent des niveaux d'énergie discrets (théorie de Niels Bohr en 1914). Lorsque, les atomes sont rassemblés pour former un solide, les niveaux discrets de

chaque atome se différencie pour former des bandes continues d'énergie. Cette structure électronique de bandes nous permet de classer les matériaux en trois grandes familles : les métaux, les isolants et les semi-conducteurs (Figure 2.3)

Pour un métal, tous les niveaux supérieurs au niveau de Fermi étant autorisés et la quasi-totalité de ces niveaux étant inoccupés à température ambiante, toutes les longueurs d'onde peuvent être alors absorbées, mais cette énergie absorbée est convertie en phonons (thermalisation des électrons).

Dans un isolant, le rayonnement solaire ne peut être absorbé par ce dernier car son gap (8-10 eV) est plus grand que les énergies de ce spectre. Par contre, un semi-conducteur a un gap plus faible que celui d'un isolant (0.6-2 eV). A titre d'exemple, le silicium cristallin (Si) a un gap de 1.12 eV, le germanium (Ge) de 0.7 eV, l'arsenic de gallium (GaAs) de 1.42 eV. Par conséquent, le spectre solaire absorbé par les semi-conducteurs fournit de l'énergie aux électrons et les libère dans le cristal pour participer à la conduction [21].

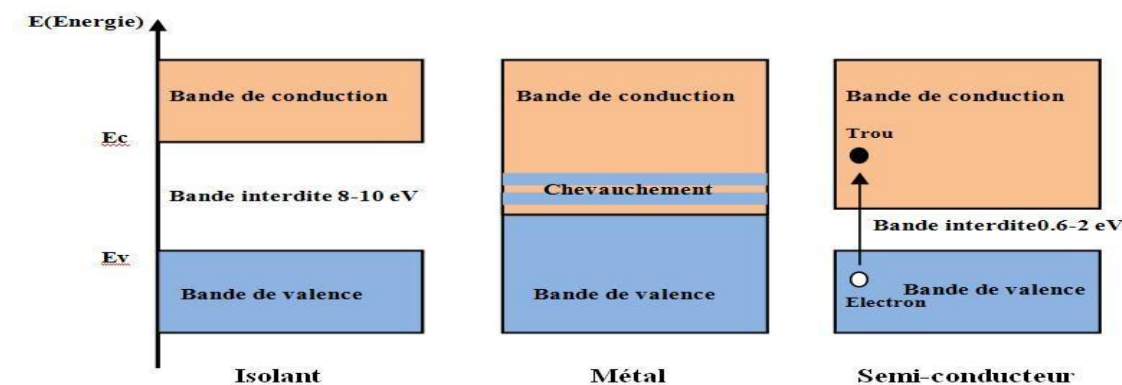


Fig 2.3 : Trois grandes familles des matériaux

### 2.3- Historique les cellules photovoltaïques

La conversion de la lumière en électricité, appelé effet photovoltaïque, a été découverte par E. Becquerel en 1839, mais il faudra attendre près d'un siècle pour que les scientifiques approfondissent et exploitent ce phénomène de la physique.

L'utilisation des cellules solaires dans les années quarante dans le domaine spatial. Les recherches d'après-guerre ont permis d'améliorer leurs performances et leur taille mais il faudra

attendre la crise énergétique des années septante pour que les gouvernements et les industriels investissent dans la technologie photovoltaïque et ses applications terrestres.

Quelques dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque [22]. :

1839 : Le physicien français Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque.

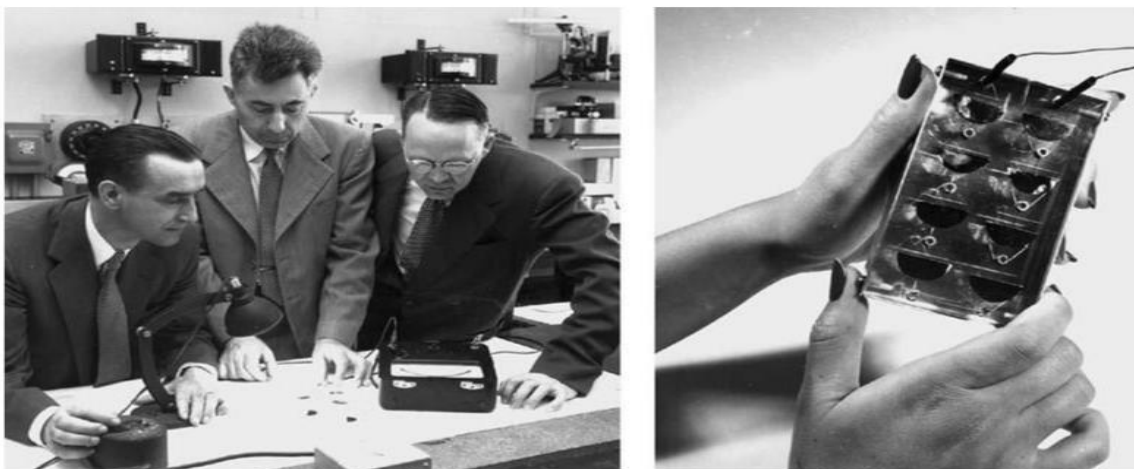
1875 : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire. 1954 : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.

1958 : Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.

1983 : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 km en Australie.

L'image au sous-dessus, représente les trois chercheurs américains qui a réalisé le premier satellite qui alimente par des panneaux solaire




**Fig 2.4** : les trois chercheurs américain

## **2.4- Fabrication des cellules photovoltaïques**

Le silicium est actuellement le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques. On l'obtient par réduction à partir de silice, composé le plus abondant dans la croûte terrestre et notamment dans le sable ou le quartz. La première étape est la production de silicium dit métallurgique, pur à 98 % seulement, obtenu à partir de morceaux de quartz provenant de galets. Le silicium de qualité photovoltaïque doit être purifié jusqu'à plus de 99,999 %, ce qui s'obtient en transformant le silicium en un composé chimique qui sera distillé puis retransformé en silicium. Il est produit sous forme de barres nommées Cours Energie Solaire Photovoltaïque « lingots » de section ronde ou carrée. Ces lingots sont ensuite sciés en fines plaques de 200 micromètres d'épaisseur qui sont appelées wafers. Après un traitement pour enrichir en éléments dopants et ainsi obtenir du silicium semi-conducteur de type P ou N, les wafers sont métallisés : des rubans de métal sont incrustés en surface et reliés à des contacts électriques. Une fois métallisés les wafers sont devenus des cellules photovoltaïques [23].

## **2.5- Technologie des cellules solaires**

Le Silicium est l'un des matériaux le plus courant sur terre, c'est le sable, mais un haut degré de pureté est requis pour en faire une cellule photovoltaïque et le procédé est coûteux. Selon les technologies employées, on retrouve le Silicium monocristallin avec un rendement de 16 à 18%, le Silicium Poly cristallin de rendement de 13 à 15%, le silicium amorphe présente une efficacité entre 5 et 10%. D'autres matériaux tels que l'Arséniure de Galium et le Tellurure de Cadmium qui sont en cours de test dans les laboratoires est présentent un rendement de (38%) [23].

	Silicium monocristallin	Silicium poly cristallin	Silicium amorphe
<b>Types</b>			
<b>Rendement</b>	16 à 18%	13 à 15%	5 et 10%
<b>Durée de vie</b>	<b>35 ans</b>	<b>35 ans</b>	<b>&lt; 10 ans</b>
<b>Avantage</b>	Bon rendement en soleil direct	Bon rendement en soleil direct (moins que le monocristallin mais plus que l'amorphe)	Souplesse Prix moins élevé que les cristallins Bon rendement en diffus
<b>Inconvénient</b>	Mouvais rendement en soleil diffus (temps nuageux...) Prix élevé	Mouvais rendement en soleil diffus (temps nuageux...) Prix élevé.	Mauvais rendement en plein soleil.

**TAB 2.1:** Classification de différents types de cellules photovoltaïques au silicium.

## 2.6- L'effet et le principe de fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque

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.

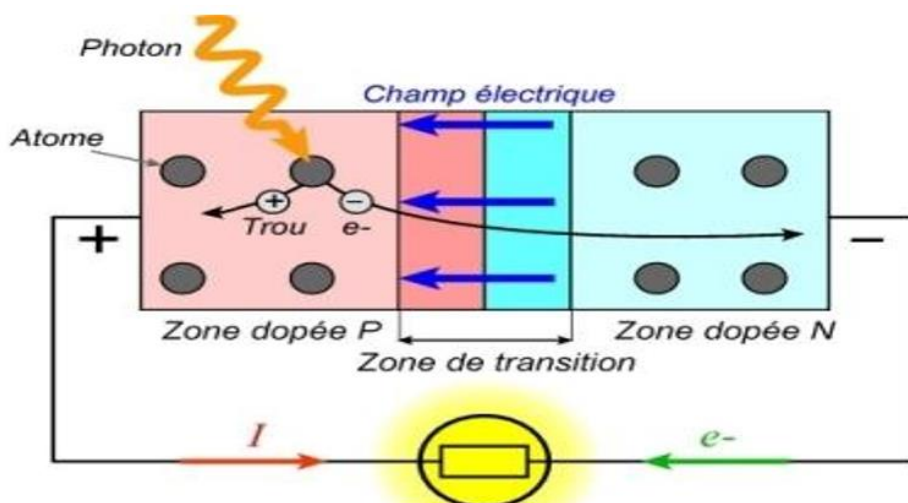


Fig2.5 : Principe de la conversion photovoltaïque

Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone net les trous vers la zone p. Une jonction (dite p-n) a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel : le courant électrique circule (voir figure 2.5) [23] .

## 2.7- Montages des modules photovoltaïques

### 2.7.1- Montage en série

Les tensions s'additionnent et le courant traversant les modules reste identique, lorsque les panneaux sont montés en série l'intensité traversant les panneaux sera celle du panneau le moins performant de la série. Ainsi, si l'ombre apparaît sur un des panneaux, toute la série aura pour rendement celui du panneau le plus faible. L'intensité restant faible, les sections de câbles sont moins importantes.

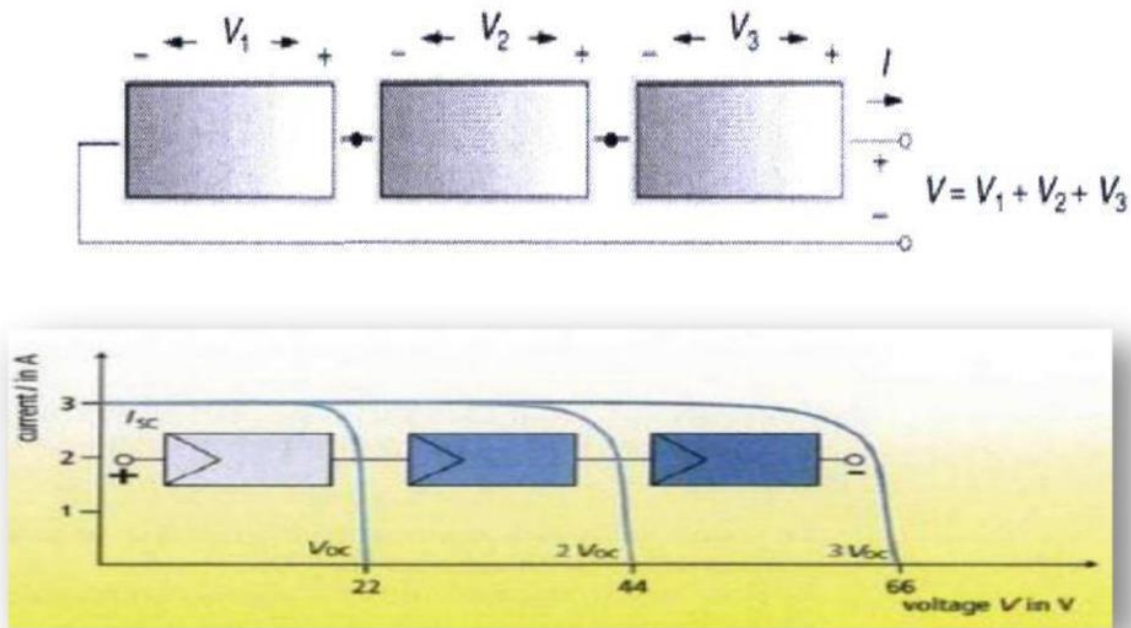


Figure 2.6 : Caractéristiques I(V) de modules en série

### 2.7.2- Montage en parallèle

Les courants des différents modules s'additionnent et la tension reste identique. Un tel montage peut demander une section de câble plus importante due à la forte intensité.

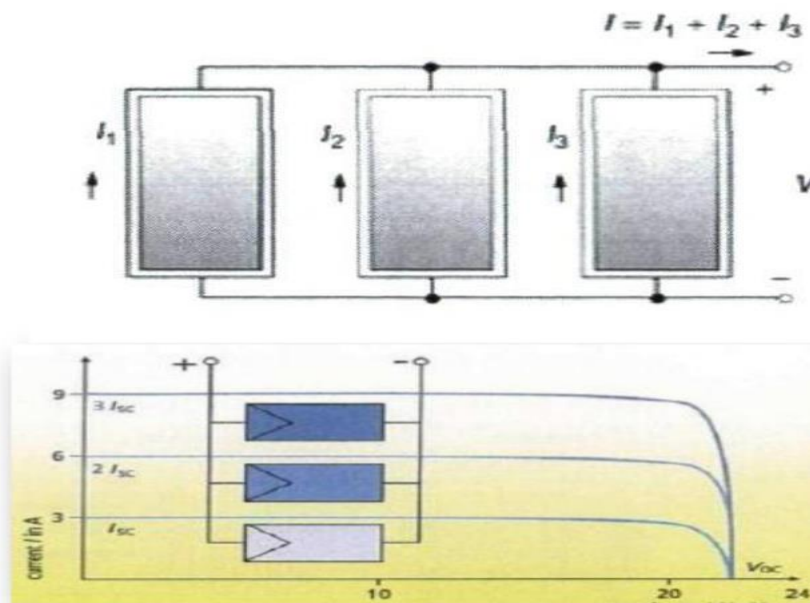


Figure 2.7 : Caractéristiques I(V) de modules en parallèle

2.7 .3- Association de modules solaires mixte série /parallèle

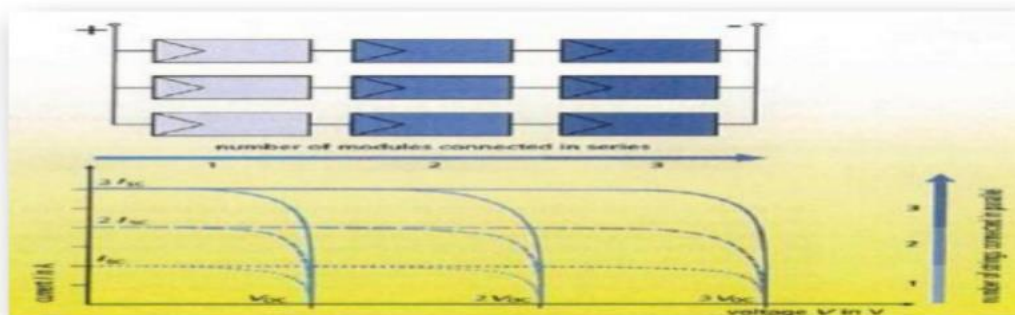


Figure.2.8 : Caractéristiques I(V) Association de modules mixte.

2.8- Constitution d'un générateur photovoltaïque

Afin d’augmenter la tension d’utilisation, les cellules PV sont connectées en série. La fragilité des cellules au bris et à la corrosion exige une protection envers leur environnement et celles-ci sont généralement encapsulées sous verre. Le tout est appelé un module photovoltaïque. Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle pour construire le champ photovoltaïque afin d’augmenter la tension et l’intensité d’utilisation. Toutefois, il est important de prendre quelques précautions car l’existence de Cellules moins efficaces et l’occlusion d’une ou plusieurs cellules (dues à de l’ombrage, de la poussière, etc...), peuvent endommager les cellules de façon permanente.

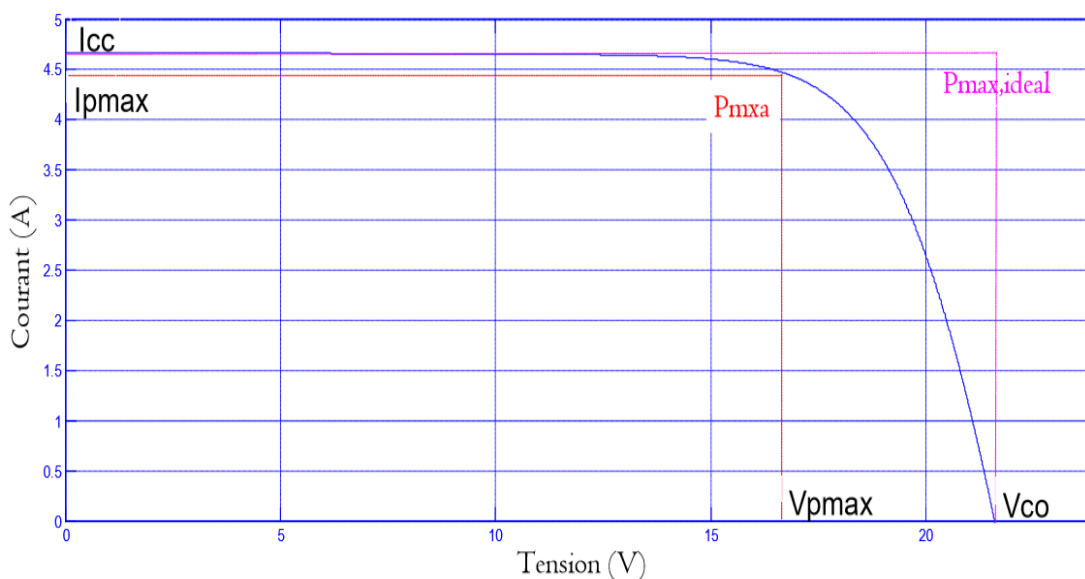


Fig 2.9 : Puissance maximale idéale et pratique

### 2.8.1- Association en série

En additionnant des cellules (modules) identiques en série, le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série [24].

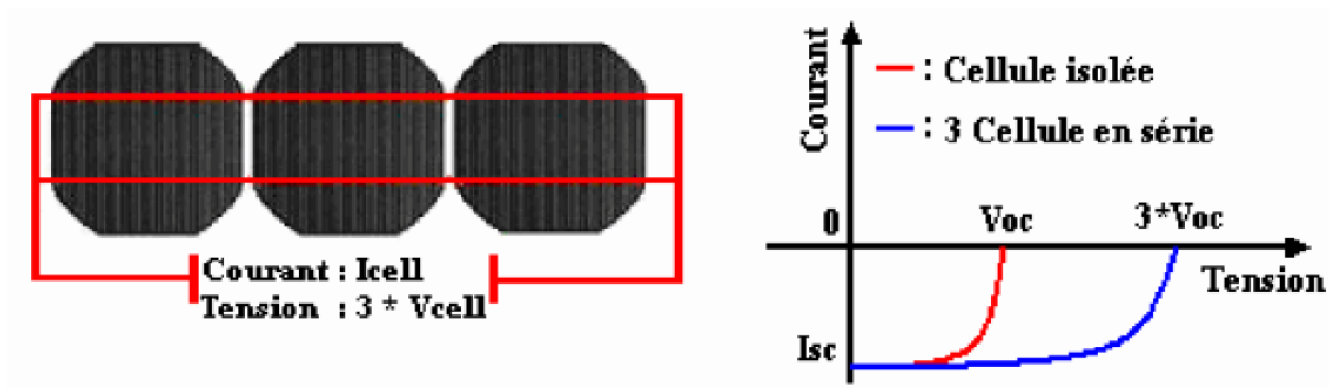


Fig 2.10 : Cellules connectées en série avec leur caractéristique courant-tension

### 2.8.2 - Association en parallèle

En additionnant des cellules (modules) identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque cellule (module) et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en parallèle dans la branche [24].

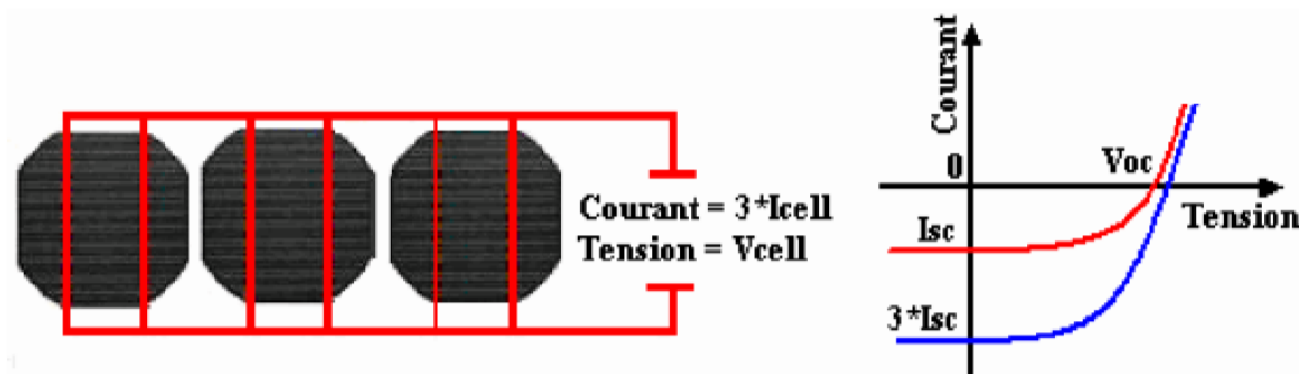


Fig 2. 11 : Cellules connectées en parallèle avec leur caractéristique courant-tension

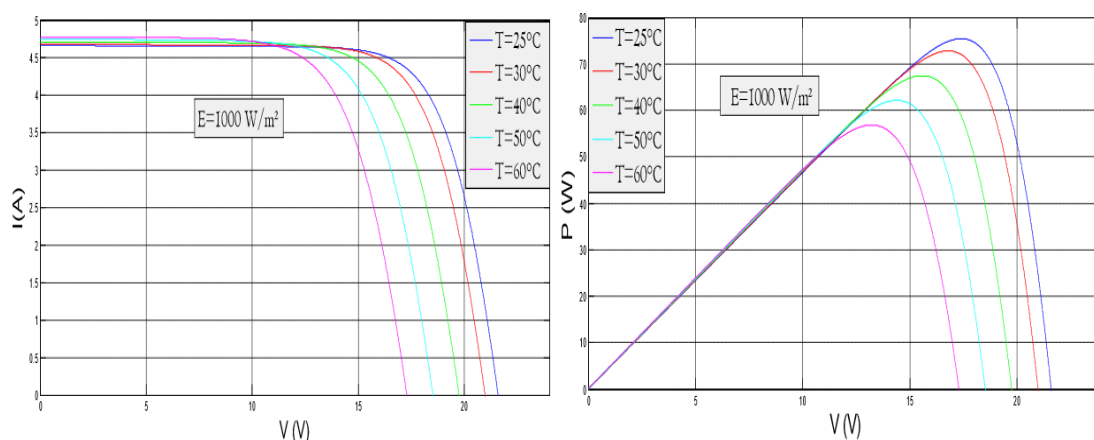
## 2.9- L'effet de la variation des conditions météorologiques

### 2.9.1- Influence de la température sur le rendement :

L'élément de base dans les installations PV est la cellule, cette dernière n'est qu'une jonction PN où son comportement variera avec la température, ce qui nous laisse envisager que tout le rendement du système sera influé par cette variation. L'expérience montre que la tension à vide d'une cellule PV diminue avec

L'augmentation de la température de la cellule. Un ordre de grandeur courant de la perte est de 2.3 mV/°C/cellule ; par contre, le courant de court-circuit, augmente légèrement avec cette augmentation (environ 0.05%/ °C) [25,26].

La Figure 2.12 nous montre la baisse du rendement d'un module PV à cause d'une augmentation de température.



**Fig 2.12 :** Caractéristiques I(V) P(V) pour différentes valeurs de température.

On constate que la température des cellules est toujours supérieure à la température ambiante, car les modules PV ne fournissent qu'une petite partie de la puissance absorbée et la différence entre ces deux puissances (absorbée et fournie) correspond à un dégagement d'énergie sous forme chaleur.

### 2.9.2- Influence du rayonnement sur les cellules :

La Figure 2.13 montre la variation de la caractéristique I(V) d'une cellule du commerce en fonction de l'éclairement. Le courant de court-circuit est pratiquement proportionnel à l'éclairement alors que la tension de circuit ouvert ne diminue que très légèrement. La puissance optimale est donc pratiquement proportionnelle à l'éclairement.

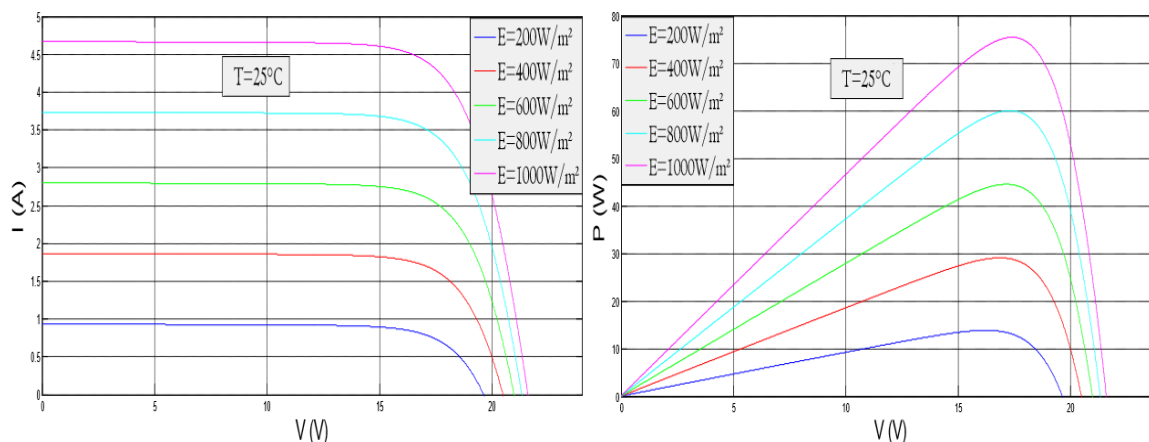


Fig 2.13 : Caractéristiques I(V) P(V) pour différentes valeurs du rayonnement

## 2.10- Différents types de systèmes photovoltaïques

On rencontre généralement trois types de systèmes photovoltaïques, les systèmes autonomes, les systèmes hybrides et les systèmes connectés à un réseau. Les deux premiers sont indépendants du système de distribution d'électricité, en les retrouvant souvent dans les régions éloignées.

### 2.10.1- Les systèmes autonomes

Ces systèmes photovoltaïques sont installés pour assurer un fonctionnement autonome sans recours à d'autres sources d'énergie. Généralement, ces systèmes sont utilisés dans les régions isolées et éloignées du réseau.

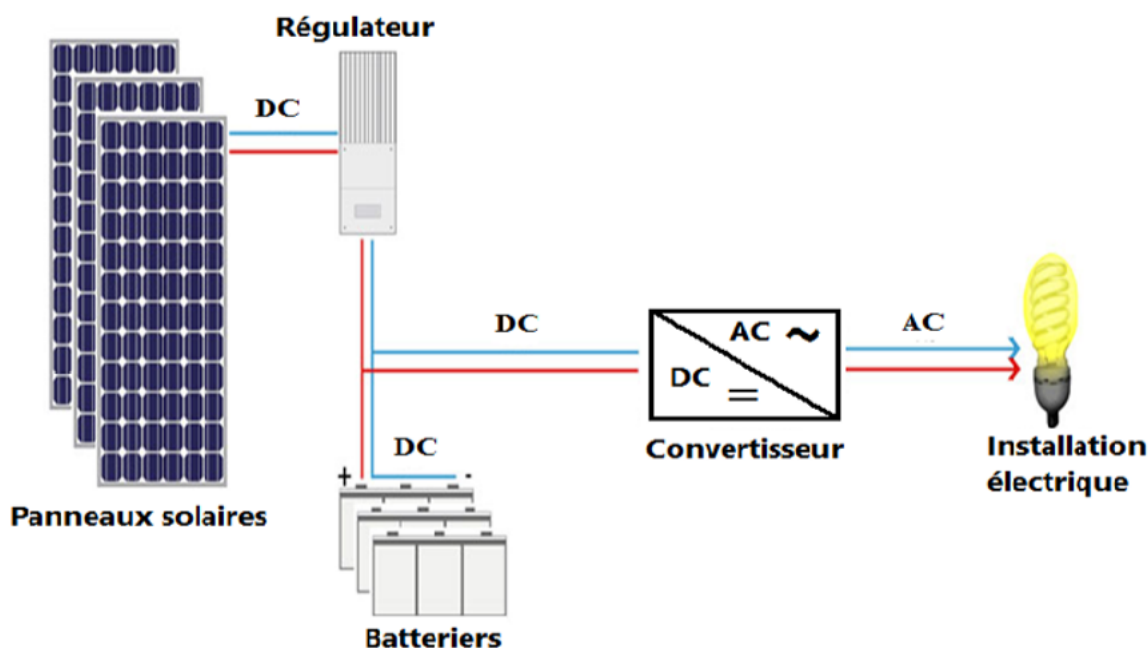


Fig 2.14: Systèmes photovoltaïque autonome [27].

### 2.10.2- Les systèmes hybrides

Les systèmes d'énergie hybride associent au moins deux sources d'énergie renouvelable aussi une ou plusieurs sources d'énergie classiques. Les sources d'énergie renouvelable, comme le photovoltaïque et l'éolienne ne délivrent pas une puissance constante, mais vu leurs complémentarités, leur association permet

D'obtenir une production électrique continue. Les systèmes d'énergie hybrides sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées.

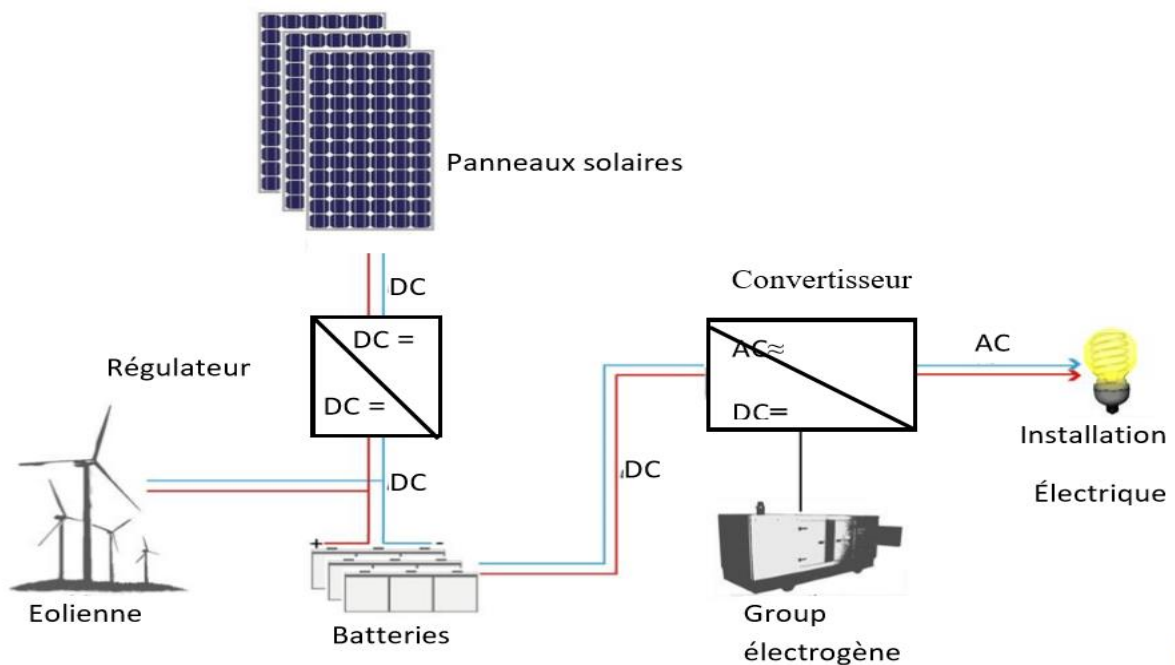
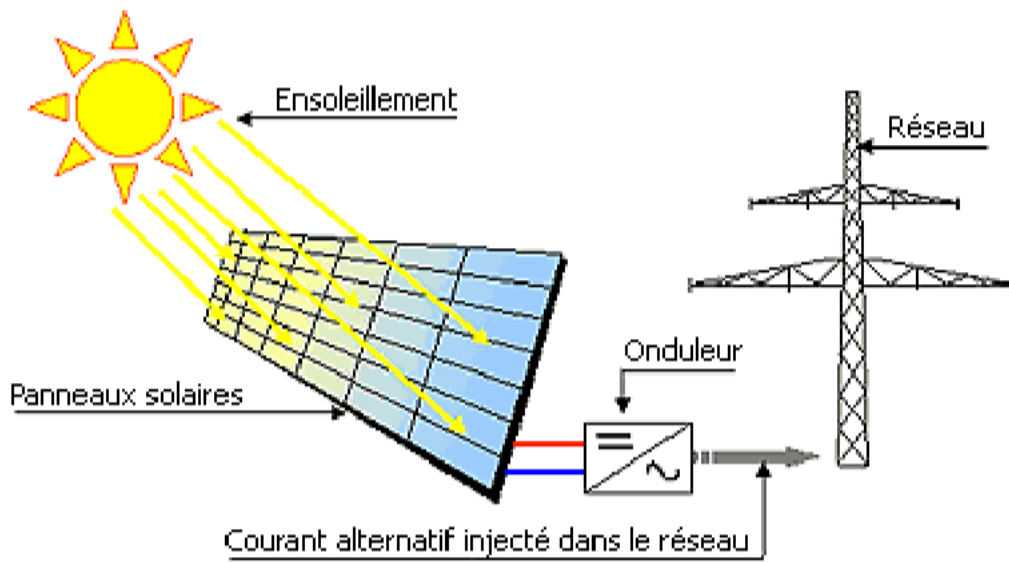


Fig 2.15: système photovoltaïque hybride [27]

### 2.10.3- Les systèmes connectés au réseau

Les systèmes de production d'énergie photovoltaïque connectés à un réseau (figure 2.1) sont une résultante de la tendance à la décentralisation du réseau électrique. L'énergie est produite plus près des lieux de

Consommation. Les systèmes connectés à un réseau réduisent la nécessité d'augmenter la capacité des lignes de transmission et de distribution. Il produit sa propre électricité et achemine son excédent d'énergie vers le réseau, auprès duquel il s'approvisionne au besoin, ces transferts éliminent le besoin d'acheter et d'entretenir une batterie. Il est toujours possible d'utiliser ceux systèmes pour servir d'alimentation d'appoint lorsque survient une panne de réseau.



**Fig 2.16:** Systèmes photovoltaïque connectés au réseau.

# **Chapitre 3**

## **Dimensionnement des systèmes photovoltaïques**

### 3.1-Dimensionnement d'un système photovoltaïque

#### 3.1.1-CONSTITUTIONS D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE

Un système photovoltaïque est constitué d'un générateur photovoltaïque et d'un Ensemble de composants électriques (Panneaux solaires, batterie de stockage avec son Régulateur de charge, Onduleur, câblage et protection) qui permettent d'adapter la puissance électrique Produite aux spécifications des récepteurs.

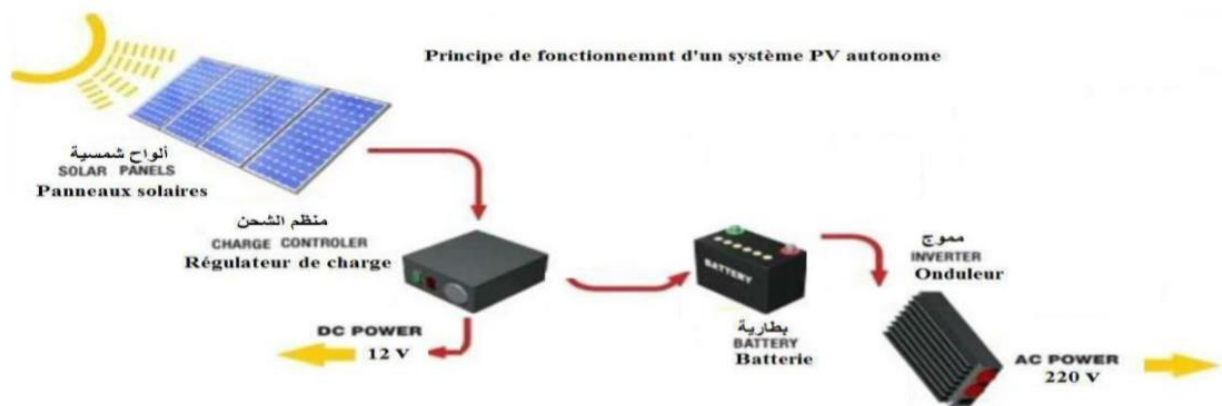


Figure .3.1 : Principe de fonctionnement d'un système PV autonome

#### 3.1.1.1- PANNEAU SOLAIRE

Un capteur solaire ou panneau solaire est un élément d'une installation solaire destiné à recueillir l'énergie solaire pour le convertir en énergie thermique et le transférer à un fluide caloporteur (air, eau) ou en énergie électrique. On distingue donc deux types de capteur solaire : le capteur solaire thermique et le capteur solaire photovoltaïque.

Le panneau solaire ou (champ solaire) se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique.

Les caractéristiques du panneau sont en général indiquées sur une étiquette collée à l'arrière du panneau.

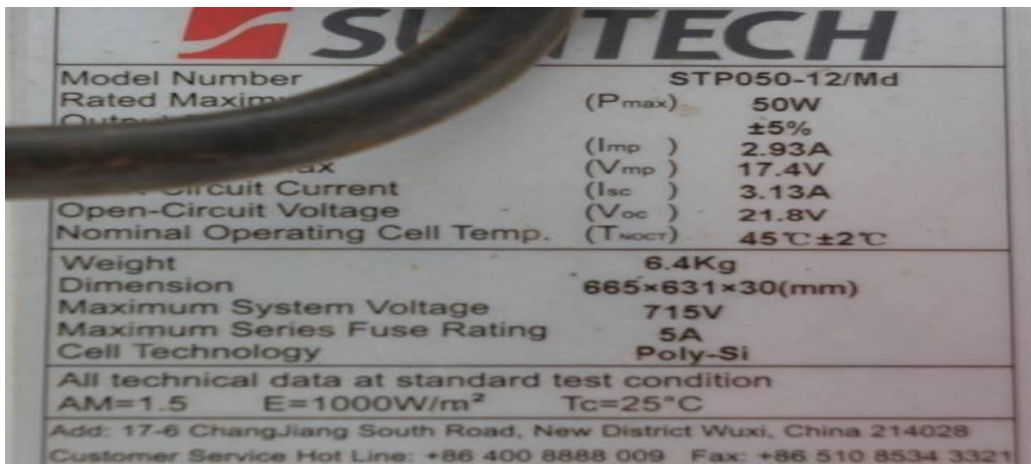


Figure .3.2 : Caractéristiques des panneaux

Nous représentons les grandeurs électriques sur le tableau (3.1)

Caractéristiques des panneaux	Représentation
<b>-Courant de court-circuit (short circuit current) I<sub>sc</sub></b>	L'intensité est mesurée directement aux bornes du Module sans récepteur.
<b>Courant nominal (peak power ou rated current)I<sub>mp</sub></b>	L'intensité qui est débitée en fonctionnement STC Raccordé au récepteur.
<b>Tension de circuit ouvert (open circuit voltage) V<sub>oc</sub></b>	La tension est mesurée directement aux bornes du Module sans charge.
<b>Tension nominale (peak power ou rated voltage)V<sub>mp</sub></b>	La tension délivrée en fonctionnement STC Raccordé au récepteur.
<b>Puissance crête (peak power ou rated power) P<sub>max</sub></b>	La puissance crête est le produit de la tension nominale et le courant nominal en fonctionnement STC
<b>Puissance crête = tension crête x courant crête</b>	<b>P<sub>max</sub> = V<sub>mp</sub> x I<sub>mp</sub></b>

Tableau .3.1 : Caractéristiques des panneaux

Tous les panneaux utilisés sur une même installation doivent avoir les mêmes caractéristiques (tension et ampérage).

### 3.1.1.1. a) La puissance des panneaux solaire

La principale caractéristique technique à connaître pour juger de la performance d'un panneaux solaire

photovoltaïque est sa puissance (en kW). Celle-ci dépend du matériau et de la surface des panneaux. La puissance de production, elle, détermine la capacité qu'ont les panneaux solaires à produire de l'électricité dans des conditions idéales (inclinaison, ensoleillement, orientation...).

### 3.1.1.2- Régulateur

- Les régulateurs de charge Plusieurs types de régulateurs peuvent être utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Le régulateur contrôle les flux d'énergie. Il doit protéger la batterie contre les surcharges (solaires) et décharges profondes (utilisateur). Il doit assurer la surveillance et la sécurité de l'installation.

#### a- Choix du régulateur

Afin d'éviter les surcharges et les décharges trop profondes des batteries, le régulateur solaire (aussi appelé régulateur de charge ou même contrôleur de charge) gère le niveau d'énergie stockée dans les batteries :

- Il limite la charge quand la batterie est complètement chargée
- Il ralentit la décharge afin d'éviter les

décharges profondes Il y a 2 éléments principaux

à prendre en compte :

- La tension entre les panneaux et les batteries : le régulateur doit pouvoir accepter cette tension (engénéral 12V, 24V ou 48V).

-l'intensité maximale du régulateur : l'intensité du régulateur (en ampères, A) doit être supérieure à

L'intensité de court-circuit du ou des panneaux solaires auquel il est connecté [28].

#### b -Fonctionnalités avancées

- \*Possibilité de connexion à un ordinate
- \* Déclenchement d'alarmes (signal sonore, e-mail ou même SMS).
- \*Enregistrement de donné
- \*Choix du mode de charge (recharge rapide, veille...).
- \*Déclenchement automatique de sources d'énergie complémentaires : groupe électrogène ou réseau électrique [28].

### 3.1.1.3- Batterie

#### a-Définir la capacité de stockage [29]

Exprimée en Ampères Heure (Ah), la capacité d'une batterie solaire désigne le débit total d'énergie de la Batterie dans des conditions données (10 heures, 20 heures, ...).

Ainsi, en utilisant au plus 60% de la capacité d'une batterie, une batterie 100 Ah – 12V, pourra se décharger au mieux de 60Ah (60% de 100Ah).

Ce qui donne en consommation d'énergie :  $60 \text{ Ah} \times 12\text{V} = 720 \text{ Wh}$

#### b-Tension requise pour le système

Après avoir défini la capacité de stockage nécessaire à vos besoins, vous devez déterminer la tension de stockage de l'énergie solaire : 12V, 24V ou 48V. Plus vous utilisez d'énergie, plus vous devez utiliser une tension élevée. Cela permet notamment de diminuer les déperditions d'énergie, qui surviennent quand l'énergie est transportée ou stockée.

Puissance de l'installation photovoltaïque Tension recommandée de 0 à 800 WC /12V, de 800 à 1600 WC 24V et au-dessus de 1600 WC 48V

#### C-Raccordement de batteries

Dans les systèmes photovoltaïques on utilise trois types de raccordement des batteries comme indiqué sur les figures (3.3), et (3.4) :

**1-Raccordement en série :** c'est-à-dire en reliant les bornes "+" aux bornes "-" et les bornes "-" aux bornes "+" pour additionner la tension des batteries (en Volts). La capacité en Ah reste celle d'une seule batterie.

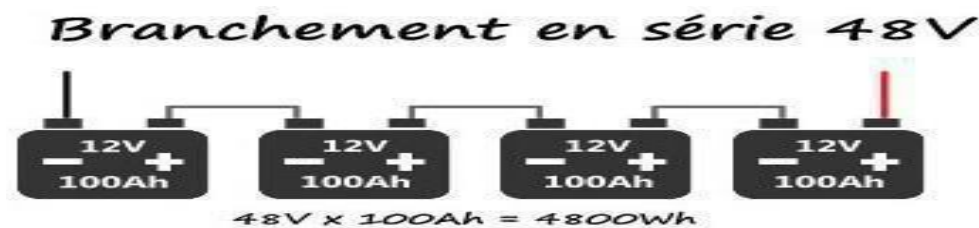


Figure 3.3 - : Raccordements des batteries en série

**2-Raccordement en parallèle** : c'est-à-dire en reliant les bornes "+" aux bornes "+" et les bornes "-" aux bornes "-" pour additionner les capacités de stockage (en Ah) tout en conservant la même tension (en volts)

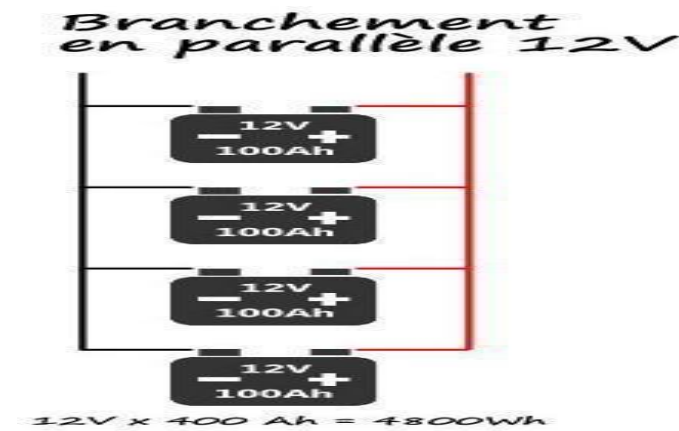


Figure 3.4 : Raccordement des batteries parallèle

### 3-Raccordement mixte

Dans ce cas on joue sur les deux grandeurs tension et capacité selon les besoins alors on va raccorder un

Ensemble en série pour avoir une telle tension (24V ou 48V par exemple) et le même autre ensemble en parallèle pour augmenter la capacité (Ah) [29].

#### 3.1.1.4- L'onduleur « Inverter »

L'onduleur est un ensemble électronique qui permet de produire du courant alternatif (220V) à partir d'un courant continu (12V). Celui-ci est directement connecté sur les batteries (12 volts), puis relié aux

Consommateurs (220 volts).

L'onduleur est dit autonome quand il impose sa propre fréquence à la charge (ce qui est différent de l'onduleur assisté où la fréquence est imposée par la fréquence du réseau).

Les onduleurs autonomes sont utilisés :

- pour alimenter des moteurs synchrones ou asynchrones pour faire varier la vitesse ;
- comme alimentations de secours ;
- comme alimentation de dispositifs de chauffage par induction (les fréquences des courants fournis par ces onduleurs sont comprises entre quelques dizaines de hertz à quelques centaines de hertz).

#### a- Principe de fonctionnement d'un onduleur

La fonction de l'onduleur photovoltaïque est de convertir la puissance électrique générée par le champ

Photovoltaïque en une puissance électrique alternative compatible avec le réseau électrique. Pour cela, le premier étage d'un circuit électronique recherche le point de fonctionnement où la puissance est maximum sur tous les points possibles de fonctionnement (en courant tension continu) en sortie du Champ photovoltaïque pour créer une tension continue intermédiaire. Ce système de recherche du point Optimum de fonctionnement est appelé système MPPT (pour Maximum Power Point Tracking). Puis un deuxième système électronique appelé onduleur convertit la tension continue intermédiaire en tension alternative compatible en tension et en phase avec celle du réseau électrique tout en injection dans le réseau électrique un courant électrique alternatif tel que la puissance injectée égale à celle provenant du champ photovoltaïque, moins les pertes électriques dans l'onduleur.

L'électronique de l'onduleur photovoltaïque doit aussi prendre en compte les normes de sécurité en vigueur, tel que le découplage du réseau électrique en cas d'absence momentanée de celui-ci où

Encore éviter l'émission d'harmoniques sur le réseau pouvant perturber le fonctionnement d'appareils électriques sensibles. Une partie du suivi du bon fonctionnement de l'installation photovoltaïque peut aussi être assuré par l'onduleur en enregistrant ou en transmettant sur un serveur les informations de fonctionnement.

### **B-CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES D'UN ONDULEUR [29]**

Les onduleurs photovoltaïques possèdent des caractéristiques électriques à respecter pour les utiliser correctement. Voici les principales caractéristiques :

#### **1-Coté courant continu en entrée :**

- La puissance maximum en entrée :  $P_{in\ maxi}$  en watt
- La tension maximum en entrée :  $V_{in\ maxi}$  en volt
- La plage de tension de fonctionnement mpp en entrée : de  $V_{mppt\ mini}$  à  $V_{mppt\ max}$
- L'intensité maximum en entrée :  $I_{in\ max}$  en ampère

#### **2-Coté courant alternatif en sortie :**

- La puissance nominal maximum de sortie :  $P_{out\ max}$  en watt
- La tension typique et la plage de fonctionnement en sortie :  $V_{actyp}$ , de  $V_{ac\ mini}$  à  $V_{ac\ max}$
- L'intensité maximum en sortie :  $I_{ac\ max}$
- Rendement de conversion à la puissance nominal

#### **3.1.1.5- Les câbles de raccordement**

Une fois les panneaux installés, les câbles de raccordement de la centrale photovoltaïque sont

mis en place. Ils relient les différents éléments et sont issus d'un ensemble de panneaux et rejoignent une boîte de jonction. C'est cette boîte de jonction qui est ensuite raccordée au local technique.

Là encore, la structure et la mise en place du parc photovoltaïque s'adaptent : les câbles peuvent être enterrés ou simplement disposés dans des fourreaux posés au sol. Cela dépend des caractéristiques de votre sol et est défini en amont de l'installation.

### **3.2- Etude expérimentale**

En raison des conditions que connaissent le pays et le monde entier à cause du virus Covid-19

Nous devons utiliser l'expérience de nos collègues ou cours des dernières années et tirer d'eux tous l'expérience pour mener à bien notre travail

#### **3.2.1- Région de M'sila**

M'sila, dans ses limites actuelles, occupe une position privilégiée dans la Partie centrale de l'Algérie du nord dans son ensemble, elle fait partie de la région des Hauts Plateaux du centre et s'étend sur une superficie de 18.175 km<sup>2</sup>. Sa position géographique fait que sa vocation principale demeure l'agro-pastoralisme tributaire d'une pluviométrie malheureusement faible et irrégulière ne dépassant pas les 250mm par an Elle est limitée :

- Au Nord Est : les wilayas de Bordj Bou-Argeridj et Sétif.
- Au Nord-Ouest : les wilayas de Médéa et Bouira.
- A l'est : la wilaya de Batna.
- A l'ouest : la wilaya de Djelfa.
- Au Sud Est : la wilaya de Biskra.

Ses coordonnées géographiques sont : - Altitude :477 m, Latitude :35°7 Nord et Longitude : 4°54194 Est

#### **3.2.2- Le climat**

Le climat de la Wilaya est de type continental soumis en partie aux influences sahariennes. L'été y est sec et très chaud, alors que l'hiver y est très froid. Sur le plan pluviométrique, la zone la plus arrosée est située au nord, elle reçoit plus de 480 mm par an (Djebel Ech-Chouk, Chott de

Ouenougha), quant au reste du territoire, la zone la plus sèche est située à l'extrême sud de la Wilaya et reçoit moins de 200 mm/an. Les précipitations moyennes annuelles de la wilaya en 2010 sont de 153 mm par ans. Les températures moyennes mensuelles de l'année sont de 20 C°,

Enregistrées au mois plus chaud (Août) sont de 32 C° et le mois plus froid (Janvier) sont de 11 C°. Les températures min et max, enregistrées (-0,2) C° en mois de janvier et (45,7) C° en mois de juillet.

#### 3.2.3- Orientation du champ PV

En Algérie, et plus généralement dans tout l'hémisphère nord, on privilège toujours une orientation du champ PV vers le sud 0 (plein sud) comme représenté sur la figure (3.5).

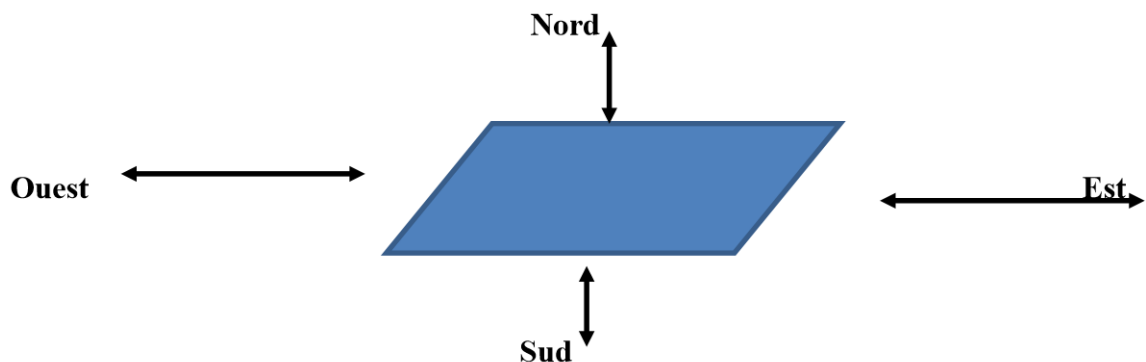


Figure 3.5: Orientation du champ PV

#### 3.2.4- L'angle d'inclinaison

L'angle d'inclinaison correspond à l'angle formé par le plan du module solaire par rapport à l'horizontale voire la figure ((3.6)).

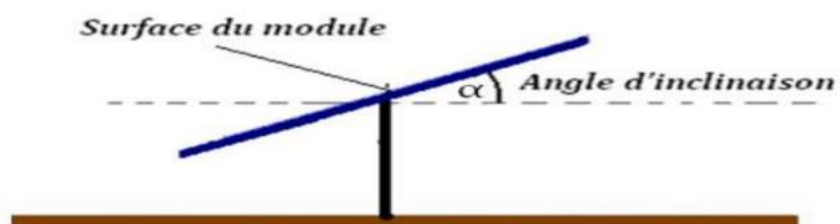


Figure 3.6 : Angle d'inclinaison des modules photovoltaïques

### **3.3- Détermination du gisement solaire**

On peut déterminer le gisement solaire du lieu choisi par :

- 1- Données réelles mesurées par des stations météorologiques.
- 2- Calculer par un modèle mathématique.
- 3- Les données fournies par : NASA, PVGIS, RETScreen ou Meteonorm.

L'irradiation moyenne mensuelle de commune à M'sila donnée par le PVGIS (Photovoltaïque GISement).

- 1- Aller à : <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php?map=africa&lang=fr> La carte géographique de la région de M'sila indique sur la figure (3.7) et les valeurs de rayonnement solaire monssionnés sur le tableau (3.1)

Nous obtenions les résultats suivants.

**L'angle d'inclinaison optimale est: 33 degrés**

**Irradiation annuelle perdue à cause des ombres (horizontale): 0.0 %**

Mois	Hopt	lopt
Jan	4790	61
Fev	5440	53
Mar	6510	39
Avr	6590	25
Mai	6780	11
Juin	7040	3
Jui	7250	6
Aug	7250	18
Sep	6400	34
Oct	6100	48
Nov	5010	58
Dec	4430	63
Année	6140	33

Hopt: Irradiation sur un plan avec l'inclinaison optimale (Wh/m<sup>2</sup>/jour)

lopt: Inclinaison optimale (deg.)

**Tableau .3.2** : Irradiation moyenne mensuelle de M'sila

### **3.4- Réalisation de l'arbre solaire**

Nous avons réalisé notre arbre solaire en utilisant les composants suivants :

#### **3.4.1 -Cellules photovoltaïques**

Pour la conception l'arbre solaire, nous avons besoin de 25 cellules solaires (voir image 3.8) qui sont caractérisés par :

- Pmax : 3.0W
- Voc : 7.2V
- Icc : 0.56 A
- Vmp : 6 V
- Imp : 5 A Maximum system voltage : 1000 V



**Figure.3.7** : Cellules photovoltaïque

#### **3.4.2- Barres de fer**

Nous avons besoin de 7 barres de fer pour fixer les cellules solaires où les supports des feuilles sont symétriques et ses dimensions sont :

- Deux branches avec 1.10m
- Deux branches avec 0.9m
- Trois branches avec 0.8m
- La distance avec les branches est 0.6m

### 3.4.3- Branchement les cellules

cette étape nous avons fixé les cellules solaires sur le support en prend compte l'orientation optimal tout en évitant l'ombre.

### 3.4.4- Câblage électrique

Nous avons besoin des fils électriques de 30m pour connectées les cellules photovoltaïque (15m en couleur rouge et 15m en couleur noir).

### 3.4.5- Régulateur

Pour calculer la puissance des panneaux solaires, nous avons besoin un de régulateur qui caractérise par:

La Tension : 12v-24v

La courante : 30 A



Figure .3.8 : Régulateur choisie

### 3.4.6- Batterie

Le stockage de la charge pour assurer l'alimentation des équipements électriques ; la batterie qui adapte le besoin énergétique est :

- Batterie Gel (12v-150 ah)



Figure .3.9 : Batterie adaptée

### **3.5- Résultat expérimental**

#### **3.5.1- L'inclinaison**

D'après nos expériences réalisées, on a pu constater que de l'intensité électrique FOURNIT PAR les cellules variés pararraport l'inclinaison des cellules. Celle-ci est maximale quand la cellule est perpendiculaire aux rayons lumineux.

Nous avons donc dû chercher l'inclinaison des rayons du soleil par rapport à la Terre pour orienter au mieux les cellules de notre arbre.

L'étude expérimentale de notre arbre se déroule dans la période de moi de mai et de juin par les mesures de l'intensité et la tension Nous avons donc cherché pratiquement la meilleure inclinaison avec une cellule reliée à un ampèremètre. Les résultats de cette étape sont montrés dans tableau (3.3).

Inclinaison par rapport à l'horizontale	Intensité
0°	1.64
5°	1.39
10°	2.24
15°	2.89
20°	3.23
25°	3.26
30°	3.45
35°	3.78
40°	2.84

**Tableau .3.3** : l'intensité en fonction de l'inclinaison

Donc nous avons fixe les panneaux de l'arbre solaire à 33°.

### 3.5.2- Branchement des cellules photovoltaïques

Le dimensionnement qui a fait montre la meilleure configuration de branchement est trois cellules photovoltaïques en série et pour dix cellules branches en parallèle. Le résultat montré Dans tableau (3.4).

	U (v)	I (mA)
Toutes les cellules sont Éclairées	20.1	3.5
1 cellule est à l'ombre	20.1	2.9

**Tableau 3.4** : résultat de l'intensité et la tension

### 3.5.3- Puissance électrique

Pour comparer la puissance électrique fournie par notre arbre, nous avons également construit un panneaux fixe incliné à 33° (Fig .3.13). avec le même nombre de cellules et le même branchement électrique que notre arbre.



**Figure 3.10** : Mesure électrique de l'arbre et des panneaux fixés

Nous avons mesuré la puissance électrique à différents moments d'une journée type ensoleillée (le lundi 18 juin).

Le panneau fixe était orienté au Sud-Nord alors que la face avant de l'arbre était au Sud. La figure (3.14) montre la variation du courant en fonction de la tension pour les panneaux fixes et l'arbre solaire respectivement.

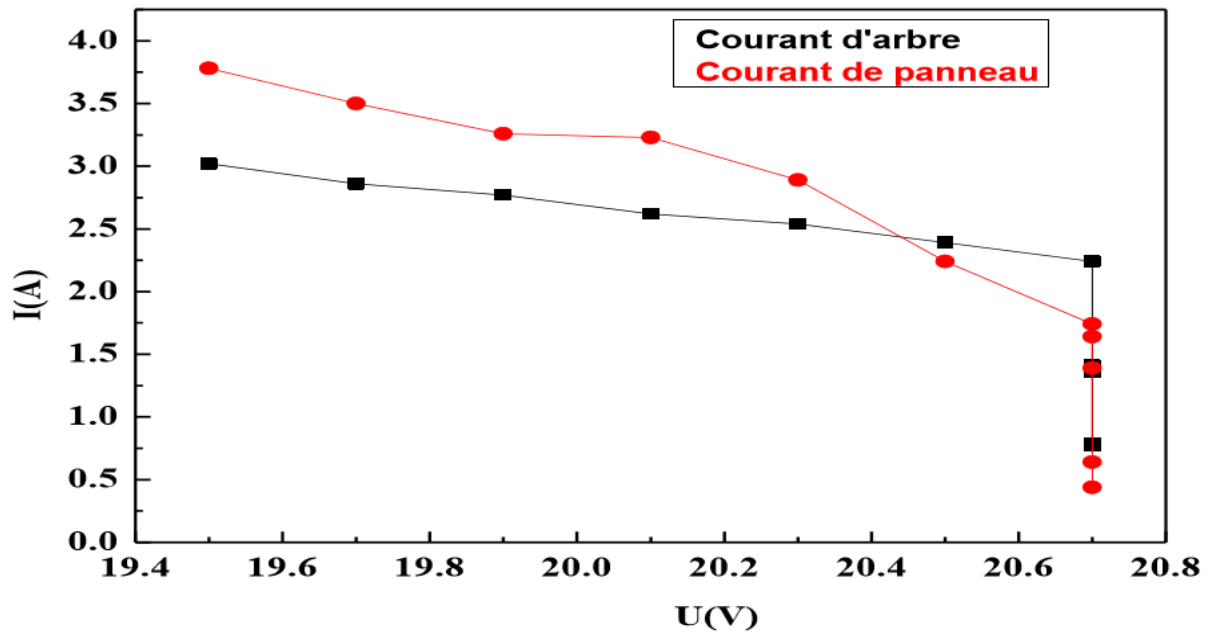


Figure 3.11 : Courant en fonction de la tension

Nos résultats de la caractéristique I(V) est approximativement les résultats théoriques.

Sur la figure (3.15) nous présentons la puissance électrique fournie par les panneaux fixés et l'arbre solaire en fonction du temps.

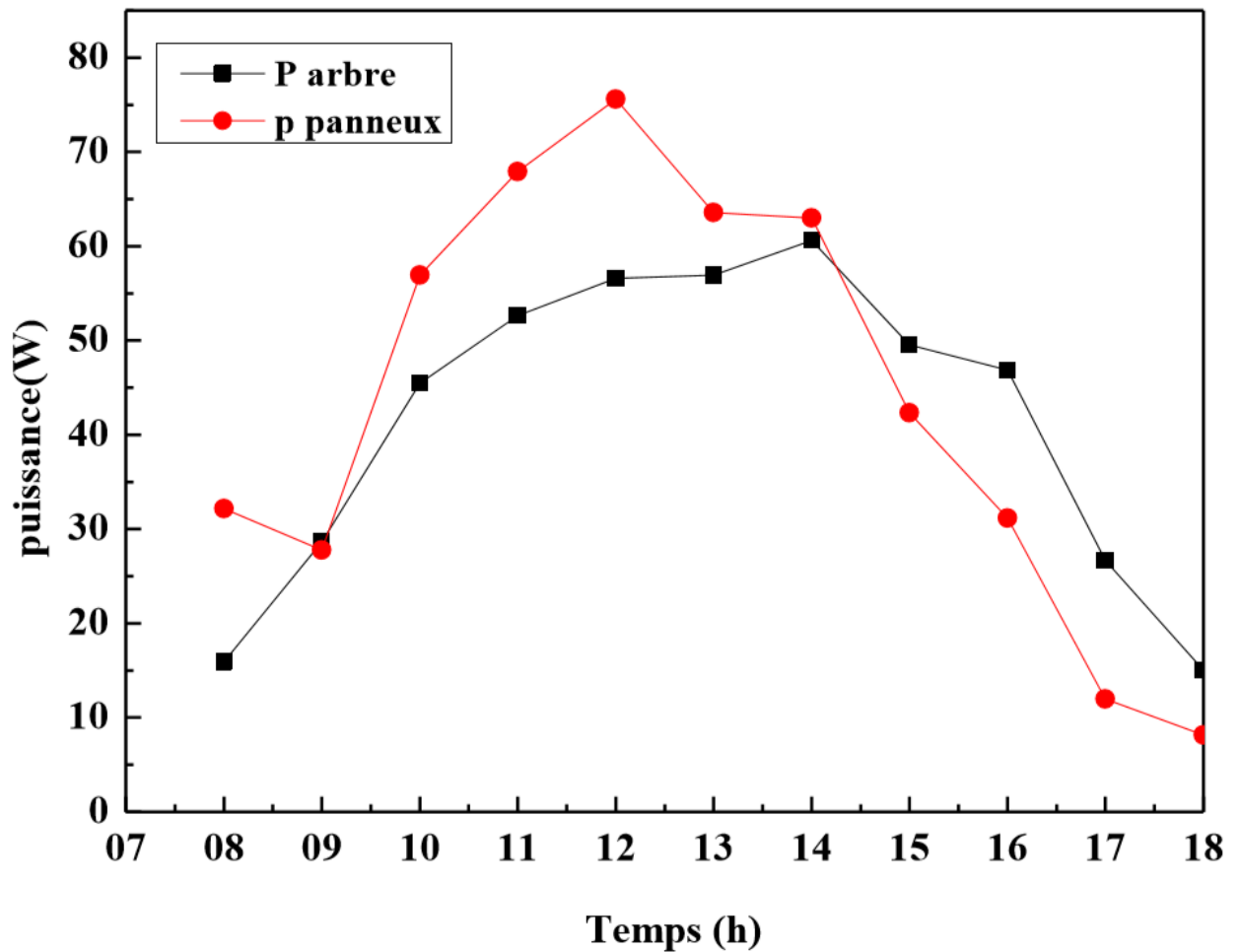


Figure 3.12 : Variation de la puissance production avec le temps

L'analyse des courbes montre :

-On a mentionné que la puissance maximale a été dans la période 12h00 jusqu'à 13h00 pour les deux systèmes.

-La production de panneaux fixé est meilleure que celle d'arbre solaire entre le période 08 :00h à 14 :00h tell que :

- La productivité journalière des panneaux fixés solaire est d'environ 386.978 Wh/jour, alors que pour de l'arbre solaire, elle atteint 316.361 Wh/jour

-La production de l'arbre solaire est meilleure que celle de panneaux fixés entre le période 14 :00h à 18 :00h tell que la puissance fournie par l'arbre est 113.046 W en pabelle, la puissance des panneaux fixés 93.684 W

### **3.5.4- Paramètres influant sur le rendement de l'arbre**

Pour optimiser le rendement des cellules de l'arbre on aurait pu prendre en compte l'énergie globale du flux lumineux c'est à dire l'énergie diffuse et l'énergie directe. Les cellules

Chauffent trop elles produisent moins d'énergie. Pour améliorer leurs rendements on cherche des conditions

Favorables qui permettra le bon fonctionnement de système PV

### **3.6 - Avantages et inconvénients de l'énergie solaire :**

#### **3.6.1- Avantages [30] :**

- D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent Particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les Engins spatiaux.

- Consommation gratuite dès l'installation du système.

- Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et Adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des Applications de puissances allant du Milliwatt au Mégawatt.

- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni Combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.

- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini Est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu.

#### **3.6.2 - Les inconvénients [30] :**

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des Investissements d'un coût élevé.

- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % (soit entre 10 et 15 MW/km<sup>2</sup> par an pour le BENELUX) avec une limite théorique pour une cellule de 28%.

- Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.

- Tributaire des conditions météorologiques.

- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le

Coût du générateur est accru.

- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.

- Le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le fonctionnement même Des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au Moins égale à 1 eV. Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas Transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1 eV Perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur.

# ***CONCLUSION GENERALE***

## Conclusion Générale

---

En raison de l'épuisement des énergies fossiles et de la pollution qui en découle, la filière photovoltaïque a pris, ces dernières années, une ampleur considérable. Son développement est devenu une nécessité pour toute l'humanité.

En cernant les tenants et les aboutissants de maîtrise de cette énergie en raison de sa nécessité c'est offrir au monde de demain une richesse indispensable, saine, inépuisable et garantie.

Cette énergie photovoltaïque qui fait partie des énergies renouvelables et non polluantes provient d'une source pérenne qu'est l'énergie du soleil. Il est indispensable de développer cette filière renouvelable afin de prendre le relais des énergies dont les réserves s'épuisent où la demande en énergie ne cesse d'augmenter.

En raison des conditions du coronavirus, nous n'avons pas pu faire le travail expérimental, nous avons utilisé le mémoire des étudiants BAKOUR Ala-Eddine et GUEDDOUDJ Badreddine comme références pour la partie expérimentale.

En conclusion, on peut constater que la quantité d'énergie générée par les panneaux solaires malgré, son orientation la moins performante, couvre largement la demande annuelle des différentes zones de notre l'appartement simulé.

L'efficacité des panneaux solaires et leurs rendement électrique, dépend généralement de

- ✓ Ses dimensions
- ✓ Sa technologie
- ✓ Du rayonnement reçu
- ✓ De la durée d'exposition.

La puissance électrique d'un panneau photovoltaïque dépend principalement de la radiation solaire incidente, la température de la cellule, et l'angle d'incidence solaire

***REFERENCES***  
***BIBLIOGRAPHIQUES***

## Références bibliographiques

---

- [1] <https://www.climamaison.com/lexique/energie.htm>
- [2] L. Freris et D. Infield, « les énergies renouvelables pour la production d'électricité »,2009.  
(Mr : KABOUCHE AZOUZ " ARCHITECTURE ET EFFICACITE ENERGETIQUE DES PANNEAUXSOLAIRES" Mémoire POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MAGISTERE OPTION : ARCHITECTURE, JUIN 2012)
- [3] Agence Internationale de l'énergie [AIE]. (2016: 6). Key World Energy Statistics 2016 (p. 6, 80 pages). Paris: OCDE/AIE. (Sarah Cacoub en vue de l'obtention du grade de Maîtrise en science en gestion en contexte d'innovations sociales. Université de Montréal août, 2017)
- [4] EIA. (2017). Hydrogène - Energy Explained, Your Guide To Understanding Energy - Energy Information Administration. Eia.gov. Consulté 3 août 2017,  
(Sarah Cacoub en vue de l'obtention du grade de Maîtrise en science en gestion en contexte d'innovations sociales. Université de Montréal août, 2017)
- [5] Agence Internationale de l'Énergie. (2016). Key World Energy Statistics 2016 (p. 28, 80 pages). Paris : OCDE/AIE.  
(Sarah Cacoub en vue de l'obtention du grade de Maîtrise en science en gestion en contexte d'innovations sociales. Université de Montréal août, 2017)
- [6] Mounir AKSAS COURS Conversion d'énergie
- [7] Colomb (1985, p.23). Rencontres pédagogiques n°4 (Cyril Therras, Jérémy Arcelin "DE l'enseignement de l'énergie à l'école alimentaire ". Mémoire de Master Université Montpellier juin, 2012)
- [8] <https://www.futura-sciences.com/>
- [9] <https://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/>
- [10] LABONCHE Bernard : L'avenir est ouvert, mars 2003  
(M CHABANI Zeyneb "la part des énergies renouvelables dans le bilan énergétique National à l'horizon 2030 ". Mémoire de Magister Université M'hamed)Bougara-Boumerdes
- [11] <https://www.cairn.info/revue-ecologie-et-politique1-2006-2-page-117.htm#pa14>
- [12] <https://www.universalis.fr/encyclopedie/energies-renouvelables/>

## Références bibliographiques

---

[13] <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/le-fonctionnement-d-une-eolienne>

[14] [www.renewables-made-in-germany.com](http://www.renewables-made-in-germany.com). Consulté en septembre 2009.

(Mr : KABOUCHE AZOUZ " ARCHITECTURE ET EFFICACITE ENERGETIQUE DES PANNEAUX SOLAIRES" Mémoire POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MAGISTERE OPTION : ARCHITECTURE, JUIN 2012)

[15] F. Lasnier, T.G. Ang, "Photovoltaic Engineering Handbook" IOP Publishing Ltd. 1980. ISBN 085274-311-4

(Alayat Mahmoud et Boucetta Issam " Maximisation de la production d'un système photovoltaïque à base de MPPT soumis à des éclairagements différents ". Mémoire de Master UNIVERSITE BADJI MOKHTAR Annaba, juin 2017)

[16] <https://prezi.com/>

[17] Brahim et Madi. S : "Etude et caractérisation d'un panneau photovoltaïque type condor".

Mr : HADJ BELKACEMI Mohammed "Thème Modélisation et Etude Expérimentation d'un Capteur Solaire non Vitré et Perfor ".Mémoire de Master· juillet 2011

[18] Besse moulin, Pierre et Jean Oliviéri « Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette », Société météorologique de France, Paris (FRA), septembre 2000

(HAMIDATOU Taha et KHENNOUR Sallah eddine " Etude d'un système de pile à combustible alimenté par hydrogène solaire photovoltaïque" Mémoire MASTER ACADEMIQUE, juin 2018)

[19] SLAMA fateh. Modélisation d'un Sys multi générateurs PV interconnectés au réseau électrique. Magister en eth. Ufa setif

(Salim ARAB et Dalila TOUDERT Thème "Etude d'un Système Photovoltaïque " Mémoire de Fin d'Etude de MASTER ACADEMIQUE, 2017)

[20] Akassewa Tchapo SINGO, Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome, Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2010

(Salim ARAB et Dalila TOUDERT Thème "Etude d'un Système Photovoltaïque " Mémoire de Fin d'Etude de MASTER ACADEMIQUE, 2017)

## Références bibliographiques

---

[21] Sofian Abada " Etude et optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recherche d'une Baherie avec un convertisseur Sepic" la faculté des études supérieurs et poste doctorales d'une Université le val

(BAKOUR Ala eddine et GUEDDOUDJ Badr Eddine "Conception d'un prototype d'arbre solaire au sein du pôle universitaire de M'sila" Mémoire présenté pour l'obtention Du diplôme deMaster Académique, 2019)

[22] K. Touafet ; " Etude d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique". Thèse de Magister. Ecole nationale polytechnique. Alger.2005.

(BAKOUR Ala eddine et GUEDDOUDJ Badr Eddine "Conception d'un prototype d'arbre solaire au sein du pôle universitaire de M'sila" Mémoire présenté pour l'obtention Du diplôme deMaster Académique, 2019)

[23] Dr. Sofia, BELAID LALOUNI, « Energie Solaire Photovoltaïque » Cours Université A. MIRA de BEJAIA 2015

(HAMIDATOU Taha et KHENNOUR Sallah eddine " Etude d'un système de pile à combustible alimenté par hydrogène solaire photovoltaïque" Mémoire MASTER ACADEMIQUE, juin 2018)

[24] R. Jimmy et al., Le pompage photovoltaïque, Édition Multi mondes, 1999

(Alayat Mahmoud et Boucetta Issam " Maximisation de la production d'un système photovoltaïque à base de MPPT soumis à des éclairagements différents ". Mémoire de Master UNIVERSITE BADJI MOKHTAR Annaba, juin 2017)

[25] Leyva, R., Queinnec I., Alonso, C., Cid-Pastor, A., Lagrange D. and Martinez-SalameroL., "MPPT of photovoltaic Systems using extremum seeking control" IEEE Trans. On Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic

(Alayat Mahmoud et Boucetta Issam " Maximisation de la production d'un système photovoltaïque à base de MPPT soumis à des éclairagements différents ". Mémoire de Master UNIVERSITE BADJI MOKHTAR Annaba, juin 2017)

## Références bibliographiques

---

[26] Hussein, K.H. ; Muta, I. ; Hoshino, T. ; Osakada, M. ; “Maximum photovoltaïque power Tracking : an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions” Générations, IEE Proceedings Transmission and Distribution. Vol. 142, No. 1, Jan. 1995 pp :59 – 64

(Alayat Mahmoud et Boucetta Issam " Maximisation de la production d'un système photovoltaïque à base de MPPT soumis à des éclairagements différents ". Mémoire de Master UNIVERSITE BADJI MOKHTAR Annaba, juin 2017)

[27] Site web <https://www.systemespv.com> Systèmes PV (Site consulté en février 2018)

(HAMIDATOU Taha et KHENNOUR Sallah eddine " Etude d'un système de pile à combustible alimenté par hydrogène solaire photovoltaïque" Mémoire MASTER ACADEMIQUE, juin 2018)

[28] MERABET Abd El Hak « Dimensionnement d'un système d'alimentation en énergie électrique par voie photovoltaïque pour l'alimentation d'une habitation » mémoire de master. Université de Biskra 2018

(BAKOUR Ala eddine et GUEDDOUDJ Badr Eddine "Conception d'un prototype d'arbre solaire au sein du pôle universitaire de M'sila" Mémoire présenté pour l'obtention Du diplôme de Master Académique, 2019)

[29] Note de cours : Inter Aide Sierra Leone – Support Electrique pour Installation Solaire

(BAKOUR Ala eddine et GUEDDOUDJ Badr Eddine "Conception d'un prototype d'arbre solaire au sein du pôle universitaire de M'sila" Mémoire présenté pour l'obtention Du diplôme de Master Académique, 2019)

[30] D. Turcotte, M. Ross, F. Sheriff « photovoltaic hybrid system Siping and simulation Tools » horizon Canada, 2001. (Salim ARAB et Dalila TOUDERT Thème "Etude d'un Système Photovoltaïque " Mémoire de Fin d'Etude de MASTER ACADEMIQUE, 2017)