

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ DE BOUIRA



Faculté des Sciences et Sciences Appliquées  
Département de Génie Civil

**Mémoire de Fin d'Etude**

Présenté par :

**HAMADOU Hadjer**

**CHABANE Nour El Houda Lydia**

En vue de l'obtention du diplôme de **Master :**

Filière : **Hydraulique**

Spécialité : **Ressources Hydrauliques**

**Thème**

**Etude du pompage photovoltaïque d'un  
quartier de ville de Tamanrasset**

**Devant le jury composé de :**

<b>MERIDJA</b>	<b>Madani</b>	<b>MCB</b>	<b>UAMOB</b>	<b>Président</b>
<b>ABED</b>	<b>Mourad</b>	<b>MAA</b>	<b>UAMOB</b>	<b>Encadreur</b>
<b>TAIB</b>	<b>Lyes</b>	<b>MAA</b>	<b>UAMOB</b>	<b>Examineur</b>

*Année Universitaire 2021-2022*

# *Remerciement*

*Au terme de ce travail, nous tenons à remercier Dieu le tout puissant de nous avoir donnés le courage, la volonté et la patience pour achever ce travail.*

*Nous exprimons nous vifs remerciements en particulier à notre promoteur Mr M. ABED qui ont accepté de nous encadrer et pour leur orientation et soutien.*

*Nous remercions profondément tous les enseignants du département de l'Hydraulique qui nous ont donné de leurs savoir et nous ont soutenu tout au long de notre cursus.*

*Nous tenons aussi à remercier le président et les membres de jury qui ont bien voulu nous faire l'honneur de juger notre travail.*

# *Dédicace*

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

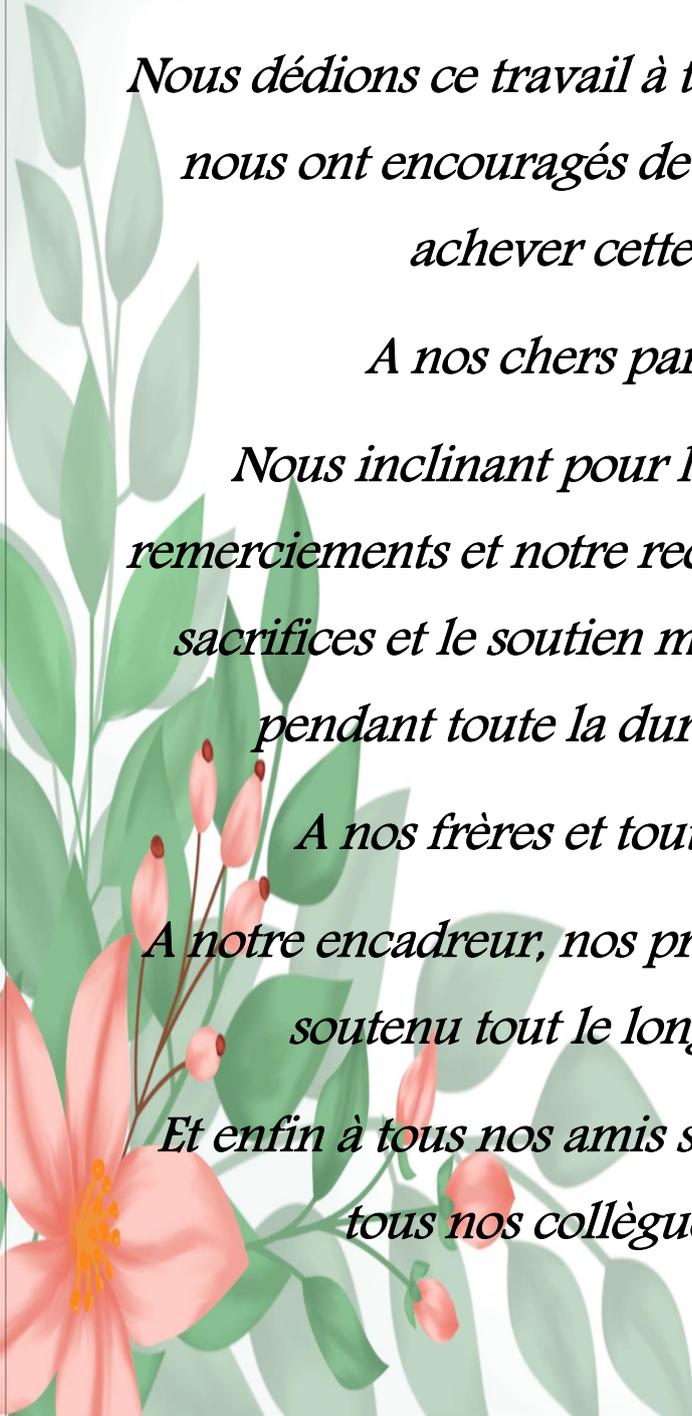
*A nos chers parents tout en*

*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.*



# **Sommaire**

Introduction générale .....	1
Chapitre I : L'énergies renouvelables et non renouvelables .....	3
I.1 Introduction : .....	4
I.2 Définition des Energies renouvelables, exploitation : .....	4
I.2.1 Les différents types d'énergies renouvelables.....	5
I.2.1.1 L'énergie solaire .....	5
I.2.1.2 L'énergie éolienne : .....	7
I.2.1.3 L'énergie hydraulique : .....	8
I.2.1.4 La géothermie : .....	8
I.2.1.5 Le biogaz : .....	9
I.2.1.6 La biomasse : .....	9
I.2.1.7 L'énergie marémotrice : .....	10
I.2.3 Les énergies renouvelables en Algérie .....	10
I.2.3.1 Potentiel d'énergie solaire en Algérie : .....	11
I.2.3.2 Potentiel L'énergie éolienne en Algérie : .....	14
I.2.3.3 Potentiel de l'énergie géothermique : .....	15
I.2.3.4 Potentiel de l'hydroélectricité : .....	16
I.2.3.5 Le Potentiel de la Biomasse : .....	17
I.2.4 Les avantages et les inconvénients des sources d'énergies renouvelable .....	18
A. Avantages : .....	18
B. Inconvénients : .....	19
I.3 Energies non renouvelables : .....	20
I. 3.1 Les différents types d'énergies non renouvelables : .....	20
I.4 Une part infime des énergies renouvelables dans le bilan énergétique actuel .....	23
I.4.1 Les sources de production de l'électricité dans quelques pays de l'Afrique du nord : ....	23
I.4.2 La part les énergies renouvelables dans le bilan énergétique actuelle.....	24
I.4.3 La structure de la production électrique d'origine renouvelable .....	25
I.5 Quelques réalisations dans le domaine des énergies renouvelables.....	26
I.5.1 Dans la steppe .....	26
I.5.2 Au nord .....	26
I.5.3 Au grand sud.....	26
I.6 Conclusion : .....	27
Chapitre II : Etude de la cellule solaire à conversion photovoltaïque .....	28
II.1 Introduction.....	29

II.2 Gisement solaire .....	29
II.2.1 Histoire sur l'énergie solaire : .....	29
II.2.2 Mouvement de la terre solaire : .....	31
II.2.3 Notions d'astronomie : .....	32
II.2.3.1 Repère des coordonnées géographiques terrestres : .....	32
II.2.3.2 Les coordonnées équatoriales : .....	33
II.2.3.3 Equation de temps : .....	34
II.2.4 Repère des coordonnées horizontales (azimutales) .....	35
II.2.4.1 La hauteur du soleil (h) : .....	35
II.2.4.2 L'azimut(a) .....	35
II.3 Angle d'incidence sur un plan quelconque.....	36
II.3.1 Son inclinaison : .....	36
II.3.2 Son azimut : .....	36
II.4 Caractéristique du rayonnement solaire : .....	37
II.4.1 Nature du rayonnement solaire .....	38
II.4.2 Le rayonnement solaire extraterrestre ou hors atmosphère : .....	39
II.4.3 Absorption de rayonnement solaire : .....	39
II.4.4 Distribution du rayonnement solaire par l'atmosphère : .....	39
II.4.4.1 Les rayonnements solaire au sol : .....	39
II.5 L'effet photovoltaïque : .....	41
II.5.1 Principe de fonctionnement d'une installation photovoltaïque : .....	41
II.5.2 Technologie des cellules photovoltaïques : .....	44
II.5.2.1 Cellules solaires monocristallines : .....	45
II.5.2.2 Cellules solaires polycristallines : .....	45
II.5.2.3 Cellules solaires amorphes : .....	46
II.5.3 Le module photovoltaïque : .....	50
II.5.3.1 Caractéristiques d'un module PV .....	51
II.5.3.2 Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque : .....	52
II.5.4 Application des systèmes photovoltaïques : .....	53
II.5.4.1 Electrification hybride (photovoltaïque-éolienne) : .....	53
II.5.4.2 Le pompage photovoltaïque : .....	54
II.5.5 Installation photovoltaïque raccordée au réseau : .....	55
II.5.5.1 Classification des centrales photovoltaïques connectées au réseau : .....	56
II.5.5.2 Composition d'un système photovoltaïque raccordé réseau : .....	57
II.5.5.3 Installations autonomes : .....	58

II.5.6 Options de consommation de l'énergie photovoltaïque :	59
II.5.6.1 Exportation vers le réseau :	59
II.5.6.2 Installation PV raccordée au réseau avec injection totale de l'énergie produite :	60
II.5.6.3 L'autoconsommation :	61
II.6 Conclusion :	61
Chapitre III :Généralités sur les pompes	63
III.1 Introduction	64
III.2 Définition d'une pompe :	64
III.3 Classification des pompes :	65
III.4 Fonctionnement d'une pompe :	65
III.4.1 Pompe volumétrique :	66
III.4.2Turbopompe	67
III.5 Les caractéristiques d'une pompe :	68
III .5.1 Les courbes caractéristiques de la pompe :	68
III.5.2 Sécurité de la pompe	70
III.5.3 les fluides :	71
III.6 Différentes architectures envisageables des systèmes de pompage	72
III.6.1 Pompage avec réseau électrique	72
III.6.2 Pompage photovoltaïque	72
III.7 Conclusion	76
Chapitre IV :Dimmensionnement d'un système de pompage photovoltaïque	76
IV.1 Introduction :	77
IV.2 Présentation de la région d'étude :	77
IV.3 Pompage avec batterie :	78
IV.3.1 Estimation de besoin en eau	78
IV.3.2 Volume de réservoir	80
IV.3.3 Présentation du système de pompage :	81
IV.3.4 Dimensionnement de l'installation photovoltaïque :	82
IV.3.5 Principes de calcul de l'énergie solaire :	83
IV .4 Pompage au fil de soleil	89
IV.4.2 Présentation d'un système de pompage (pompage fils du soleil)	91
IV.4.3 Dimensionnement de l'installation photovoltaïque :	92
IV.5 Calculer les frais de pompage pour les deux méthodes (pompage avec batterie et pompage son batterie)	94
Conclusion générale	95
Références	95

Annexes..... 95

# Liste des figures

Figure I- 1:Structure de la production d'électricité 2009.....	5
Figure I- 2:Module photovoltaïque.....	6
Figure I- 3:chauffe-eau solaire.....	6
Figure I- 4:Tour solaire.....	7
Figure I- 5:éoliennes.....	7
Figure I- 6:Energie hydraulique.....	8
Figure I- 7:Centrale géothermique de Nesjavellir en Islande.....	8
Figure I- 8:le principe de biogaz.....	9
Figure I- 9:le systeme de le biomadde.....	9
Figure I- 10:L'énergie marémotrice.....	10
Figure I- 11:histogramme Potentiel solaire en Algérie.....	12
Figure I- 12:Carte de l'Irradiation Globale Directe Annuelle Moyenne (Période 2002-2011).....	13
Figure I- 13:Carte du Vent Annuel Moyen à 50m (Période 2001-2010).....	15
Figure I- 14:Carte des sources thermales en Algérie.....	16
Figure I- 15:Evolution des énergies renouvelable a l'horizon de 2030 en Algérie.....	18
Figure I- 16:consommation énergétique et la production électrique mondiale en 2020.....	18
Figure I- 17:source d'énergie dans la consommation mondial.....	22
Figure I- 18:évaluation d'énergie fossils en Algerie.....	23
Figure I- 19:La part des énergies renouvelables et fossiles dans la production d'électricité dans quatre pays de l'Afrique du nord(2008).....	24
Figure I- 20:La structure de la production électrique d'origine renouvelable – 2011.....	25
Figure I- 21:Taux de croissance annuel moyen 2001-2011.....	25
Figure II- 1:Mouvement de la terre autur du soleil.....	31
Figure II- 2:Définition de la position du soleil.....	32
Figure II- 3:Les coordonnées géographiques terrestres.....	33
Figure II- 4:Coordonnées horaire.....	34
Figure II- 5:Angle d'inclinaison des modules photovoltaïques.....	36
Figure II- 6:Composantes du rayonnement solaire.....	37
Figure II- 7 :Analyse spectrale du rayonnement solaire.....	38
Figure II- 8:Le rayonnement solaire.....	40
Figure II- 9:Types de rayonnement solaire reçus au sol.....	40
Figure II- 10:Rayonnement solaire capté par un plan horizontal et incliné.....	41
Figure II- 11:Installation photovoltaïque.....	42
Figure II- 12:principe de fonctionnement photovoltaïque.....	43
Figure II- 13:Cellules solaires monocristallines.....	45
Figure II- 14:Cellules solaires polycristallines.....	46
Figure II- 15:Cellules solaires amorphes.....	47
Figure II- 16:Les cellules multi-jonctions.....	48
Figure II- 17:Principe de la cellule à multi-jonction.....	48
Figure II- 18:Photovoltaïque à concentration et Schéma de principe d'un concentrateur photovoltaïque.....	49
Figure II- 19:Cellules flexibles.....	49
Figure II- 20:Module photovoltaïque.....	50
Figure II- 21:Schéma synoptique d'un générateur PV.....	50
Figure II- 22:Caractéristique puissance-tension.....	53
Figure II- 23:Structure de la chaîne hybride (éolienne, photovoltaïque).....	53

Figure II- 24:Caractéristiques du débit pour le pompage au fil du soleil et avec batterie .....	54
Figure II- 25:représente un système PV connecté au réseau électrique.....	56
Figure II- 26:Les constituants d'un système PV.....	57
Figure II- 27:Système photovoltaïque directement relié au réseau.....	58
Figure II- 28:Système photovoltaïque relié au réseau avec batterie. ....	59
Figure II- 29:Schéma de principe de la configuration d'injection du surplus d'énergie. ....	60
Figure II- 30:Schéma de principe de la configuration d'injection totale d'énergie. ....	60
Figure III- 1:schéma d'une pompe hydraulique.....	64
Figure III- 2:Pompe centrifuge .....	65
Figure III- 3:Pompe volumétrique à disque excentré.....	65
Figure III- 4:Fonctionnement de pompe volumétrique.....	66
Figure III- 5:schéma évolution de la vitesse et de la pression dans la pompe .....	67
Figure III- 6:Courbe caractéristique hauteur en fonction du débit.....	69
Figure III- 7:Courbes caractéristiques : rendement et puissance en fonction de débit .....	69
Figure III- 8:Courbes caractéristiques de NPSH en fonction de débit.....	70
Figure III- 9:Station de pompage alimentée par le réseau électrique .....	72
Figure III- 10:Schéma du principe de pompage au fil du soleil.....	74
Figure III- 11:Schéma du principe de pompage avec stockage d'énergie. ....	74
Figure III- 12:Diagramme du pompage PV par électropompe DC.....	75
Figure III- 13:Diagramme du pompage PV par électropompe AC.....	76
Figure IV- 1: le site géographique de Tamanrasset .....	77

## **Liste des tableaux**

tableau I- 1:Potentiel solaire en Algérie.....	11
tableau I- 2:Parc de production hydroélectrique en Algérie .....	17
Tableau II- 1:la consommation de l'énergie dans l'histoire .....	30
Tableau II- 2:Rendement des différentes technologies.....	47
Tableau III- 1:Les avantages et inconvénients des pompages au fil du soleil et avec batteries .....	75
Tableau IV-1:les coordonnées géographiques terrestres de Tamanrasset.....	78
Tableau IV- 2:Les besoins domestiques.....	78
Tableau IV- 3:Les besoins scolaires.....	78
Tableau IV- 4:Les besoins socioculturels .....	78
Tableau IV-5:Récapitulation du besoin en eau.....	79
Tableau IV-6: La Consommation maximale journalier.....	79
Tableau IV-7:Evaluation du volume résiduel du réservoir de chef-lieu.....	80
Tableau IV-8:Evaluation du volume résiduel du réservoir de chef-lieu.....	90
Tableau IV-9: prix totale de système de pompage avec batteries.....	94
Tableau IV-10:prix totale de système de pompage sans batteries.....	94
Tableau IV-11:L'amortissement total d'un système de pompage avec batteries.....	95
Tableau IV-12:L'amortissement total d'un système de pompage au fils du soleil.....	95
Tableau IV-13:Résultats de comparaison entre les deux système.....	95

## **Liste des Symboles – Abréviations**

**HMT** : La hauteur manométrique totale (m)  
**Hg** : hauteur géométrique (m)

**$\Delta h_t$**  : les pertes de charge totale(m)

**P** : Population à l'horizon considéré.

**Q<sub>moy</sub>** : Consommation moyenne domestique journalière [m<sup>3</sup>/j]

**N<sub>hab</sub>** : Nombre d'habitants à l'horizon donné

**Q<sub>max,j</sub>** : Débit maximal journalière (m<sup>3</sup>/j).;

**K<sub>max,j</sub>** : Coefficient de consommation maximale journalière

**K<sub>max,h</sub>** : Coefficient de consommation maximale horaire ;

**$\alpha$** : Ce coefficient dépend du niveau de vie et du confort,

**V<sub>r</sub>** : Capacité résiduelle (m<sup>3</sup>),

**V<sub>T</sub>** : Capacité totale du réservoir (m<sup>3</sup>).

**V<sub>inc</sub>** : Volume d'incendie estimé à 120 (m<sup>3</sup>)

**V<sub>n</sub>** : Capacité normalisée du réservoir (m<sup>3</sup>)

**S**: Section du réservoir (m<sup>2</sup>)

**D** : Diamètre de la cuve (m)

**h** : Hauteur d'eau (m)

**$\Delta h_L$**  : Pertes de charge linéaires (m) ;

**$\Delta h_s$**  : Pertes de charge singulier (m)

**L** : Longueur de la conduite (m) ;

**g**: pesanteur (9.81m/s<sup>2</sup>)

**P** : Puissance absorbée par la pompe (kwh)

**E** : Energie consommé par la pompe (kw)

**T<sub>p</sub>** : temps de pompage par jour (heur)

**$\lambda$**  : Coefficient de perte de charge

**$\delta$**  : Déclinaison du soleil (degré)

**$\lambda$**  : Longitude de lieu (degré)

**$\phi$**  : Latitude de lieu (degré)

**Z** : Altitude de lieu [m]

**n** : est le numéro du jour de l'année à partir de premier janvier (jour)

**$\omega$**  : Angle horaire (degré)

**TSL** : Temps solaire local (heur)

**TU** : temps universel (heur)

**TSV** : Temps solaire vrai (heur)

**H** : Hauteur angulaire de soleil (degré)

**A** : Azimut (degré)

**G<sub>h</sub>** : Le rayonnement global sur un plan horizontal ( $w/m^2$ )

**B** : coefficient de diffusion d'Angström  
**T** : tension de vapeur de l'eau (pa)

**D** : L'irradiation diffuse sur un plan quelconque ( $w/m^2$ )

**D<sub>h</sub>** : L'irradiation diffuse sur un plan horizontal ( $w/m^2$ )

**i** : L'orientation du panneau solaire par rapport à l'horizontal (degré)

**$\alpha$**  : Le coefficient d'albédo du sol

**$\sigma$**  : la fraction d'insolation

**S** : durée d'insolation mesurée (heur)

**S<sub>0</sub>** : durée maximale d'insolation (heur)

**Y** : Orientation des panneaux solaires par rapport au sud (degré)

**$\omega_{\text{lever}}$**  : Angle horaire au lever de soleil (degré)

**$\omega_{\text{coucher}}$**  : Angle horaire au coucher de soleil (degré)

**C<sub>bat</sub>** : la capacité C<sub>bat</sub> des batteries (kw)

**C<sub>m</sub>** : Consommation énergétique journalier (wh/jour)

**N<sub>j</sub>** : Le nombre de jours avec sans ensoleillement (jour)

**D<sub>e</sub>** : Coefficient de décharge de la batterie

**U** : Tension du panneau solaire (volt)

**PV** : photovoltaïque

# Résumé

## ملخص :

الطاقة والمياه من أهم العناصر الأساسية والضرورية للحياة. ونظرا للتزايد المستمر على هاذين العنصرين ، أصبح من الضروري البحث عن مصادر أخرى غير المصادر التقليدية لإنتاج الطاقة واستعمالها في توفير المياه تعتبر الطاقة الشمسية من أهم المصادر استعمالا لما لها من ميزات كثيرة.

في هذه المذكرة قمنا بدراسة تقنية ضخ المياه بواسطة الطاقة الشمسية (الكهروضوئية) بنوعيتها بواسطة بطاريات وبدون بطاريات وهذا استغلالا للمكانيات الهائلة للجزائر في مجال الطاقات المتجددة وبالأخص الطاقة الشمسية .

واستغلالا لهذا النوع من الطاقات يساهم في نمو الكثير من القطاعات خاصة الفلاحية في المناطق المعزولة والصحراوية , فيسهل الحياة على الساكنة ويساهم في الحياة الاقتصادية بارخص الاثمان ويحافظ على البيئة وهذا هو هدفنا .

## Résumé :

L'énergie renouvelable est une source d'énergie primaire et essentielle à la vie. L'énergie solaire est l'une des sources d'utilisation les plus importantes en raison de ses nombreux avantages. Cette étude représente la technologie de pompage par l'énergie solaire qui s'appelle énergie photovoltaïque . Nous avons utilisés les deux types de ce dernier . Ces type sont le pompage avec batterie et sans batterie (au fils du soleil).

L'exploiter dans ce type d'énergies est une croissance dans de nombreux secteurs, en particulier le secteur d'agricoles dans des zones isolées et désertiques, facilitant , de protéger l'environnement et le croissance . l'utilisation de cette énergie dans le domaine de l'alimentation en eau potable c'est l'objectif de notre étude.

## Abstract :

Renewable energy is a primary source of energy and essential to life. Solar energy is one of the most important sources of use due to its many advantages. This study represents the technology of pumping by solar energy which is called photovoltaic energy. We used both types of the latter. These types are pumping with battery and without battery (with the son of the sun). Exploiting it in this type of energy is a growth in many sectors, especially the agricultural sector in isolated and desert areas, facilitating, protecting the environment and growth. the use of this energy in the field of drinking water supply is the objective of our study

---

# **Introduction générale**



## **Introduction générale**

Depuis la découverte de système photovoltaïque, la récupération de l'énergie solaire est devenue l'un des applications les plus prometteuses, dans les pays développés ou l'utilisation de système photovoltaïque est l'instant le plus courant, il sert habituellement de complément d'énergie électrique à usage domestique en milieu urbain, et les panneaux solaires sont placés sur les toits d'habitation, profitant des conventions écologiques qui préconisent la consommation d'énergie propre ou renouvelables, son utilisation se généralise, et il est très fréquent de voir des compagnies d'électricités réaliser des installations d'appoint connectées au réseau. De plus en dépit du coût d'installation qui peut s'avérer conséquent, l'énergie solaire reste très compétitive par rapport aux différentes formes d'énergie, et cela malgré le faible taux d'ensoleillement de ces pays développés qui ont majoritairement un climat tempéré. À cette fin, il y a plusieurs raisons pour lesquelles nous voulons savoir : Qu'est-ce que l'énergie solaire photovoltaïque et comment sera-t-elle utilisée à l'avenir ?

L'énergie solaire photovoltaïque est de plus en plus utilisée pour opérer diverses applications terrestres comme l'éclairage, les télécommunications, la réfrigération et le pompage

La demande croissante d'eau dans les zones rurales et sites isolés a fait qu'un intérêt grandissant est porté sur l'utilisation des générateurs photovoltaïques comme source d'énergie aux groupes moteur-pompes. En effet, la réalisation des systèmes de pompage photovoltaïque constitue une solution pratique et économique aux problèmes de manque d'électricité dans les régions désertiques.

Parmi les avantages importants de la conversion photovoltaïque, nous pouvons citer, la décentralisation de la production d'énergie pour de petites communautés très dispersées comme le prouve déjà, les pompes solaires dont le fonctionnement s'est révélé très acceptable et l'autonomie du système photovoltaïque, autonomie de lieu mais tout aussi importante est l'autonomie de fonctionnement.

L'objectif de ce travail, d'étudier le pompage photovoltaïque par les batteries et par fils du soleil et choisir le type le plus économique (par comparaison entre les deux).

Pour atteindre cet objectif, le mémoire comprend quatre chapitres :

-Le premier chapitre, donne une description générale sur les différentes sources d'énergies renouvelables et non renouvelables existantes, les bases indispensables à la compréhension des énergies renouvelable et non renouvelables et l'énergie solaire en particulier.

-Dans le deuxième chapitre, nous allons présenter quelques notions sur rayonnement solaire, les types des rayonnements solaires ainsi que le module photovoltaïque et les différents composants d'un système de pompage photovoltaïque destiné pour l'alimentation en eau potable.

- Ensuite dans le troisième chapitre, nous allons présenter des généralités sur les pompes et leurs types et leurs fonctionnements.

- Finalement dans le quatrième chapitre, nous avons pris un quartier de la ville de Tamanrasset comme un cas d'applications.

Et bien sûr, ce mémoire est achevé par la conclusion qui résume tout le travail.

**Chapitre I : L'énergies renouvelables et non  
renouvelables**

## **I.1 Introduction :**

Avec l'épuisement progressif des énergies fossiles (pétrole, gaz naturel, houille, etc.), les énergies renouvelables (éolienne, hydraulique, géothermique, solaire, biomasse...) se développent de plus en plus. Elles ont le double avantage d'utiliser des flux inépuisables d'énergie naturelle (soleil, vent, eau, bois, etc.) et de ne pas, ou peu, nuire à l'environnement.[1]

## **I.2 Définition des Energies renouvelables, exploitation :**

Une source d'énergie est renouvelable si le fait d'en consommer ne limite pas son utilisation au future. C'est le cas de l'énergie du soleil, du vent, des cours d'eau, de la terre et généralement de la biomasse humide ou sèche, à l'échelle de la durée de vie de l'humanité. Ce n'est pas le cas pour les combustibles fossiles et nucléaires. L'utilisation des énergies renouvelables n'est pas nouvelle. Celles-ci sont exploitées par l'homme depuis la nuit des temps. Autrefois, moulins à eau, à vent, bois de feu, traction animale, bateaux à voile ont largement contribué au développement de l'humanité. Elles constituaient une activité économique à part entière, notamment en milieu rural ou elles étaient aussi importantes et aussi diversifiées que la production alimentaire. Mais dans les pays industriels, dès le XIXème siècle, elles furent progressivement marginalisées aux profits d'autres sources d'énergie que l'on pensait plus prometteuses. Dès lors, la pollution atmosphérique, le réchauffement climatique, les risques du nucléaire et les limites des ressources ont fait prendre conscience qu'un développement économique respectueux de l'environnement, dans lequel nous vivons, est nécessaire. [2]

Les chocs pétroliers successifs depuis les années 70 ont démontré les risques économiques et géopolitiques de la production d'énergie reposant sur l'exploitation des ressources fossiles, dont les réserves sont mal réparties et épuisables. De plus, une grande partie du monde ne sera sans doute jamais raccordée aux réseaux électriques dont l'extension s'avère trop coûteuse pour les territoires isolés, peu peuplés ou difficiles à y accéder.

Les énergies renouvelables constituent donc une alternative aux énergies fossiles à plusieurs titres :

- Elles sont généralement moins perturbatrices de l'environnement, elles n'émettent pas de gaz à effet de serre et ne produisent pas de déchets ;
- Elles sont inépuisables ;
- Elles autorisent une production décentralisée adaptée à la fois aux ressources et aux besoins locaux ;
- Elles offrent une importante indépendance énergétique.

La production d'électricité renouvelable a atteint 3810.3 TWh en 2009, soit 19.1% de la production d'électricité mondiale. [3]

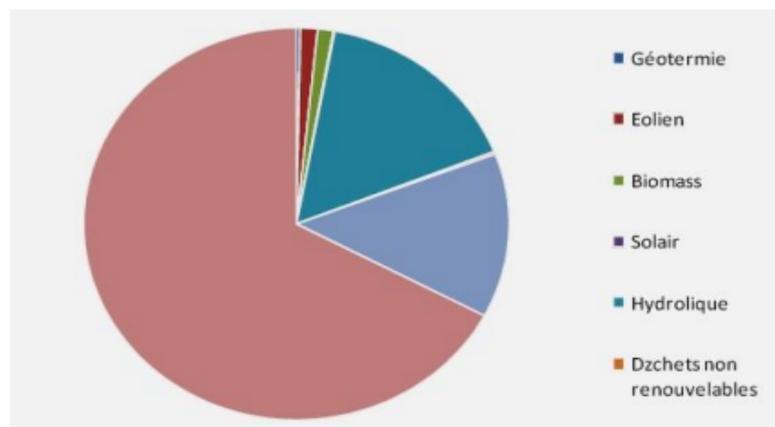


Figure I- 1: Structure de la production d'électricité 2009. [4]

## I.2.1 Les différents types d'énergies renouvelables

### I.2.1.1 L'énergie solaire

Transformation de l'énergie solaire en électricité ou en chaleur à partir de panneaux ou de capteurs solaires. Le soleil, principale source des différentes formes d'énergies renouvelables disponibles sur terre. Il existe deux types : [2]

#### A. L'énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque convertit directement le rayonnement lumineux (solaire ou autre) en électricité. Elle utilise pour ce faire des modules photovoltaïques composés de cellules solaires ou de photopiles qui réalisent cette transformation d'énergie.



Figure I- 2:Module photovoltaïque[2]

### B. L'énergie solaire thermique

Elle est radicalement différente de l'énergie solaire photovoltaïque, elle, produit de la chaleur à partir du rayonnement solaire infrarouge afin de chauffer de l'eau ou de l'air. On utilise dans ce cas des capteurs thermiques qui relèvent d'une toute autre technologie. Dans le langage courant, ce sont des « chauffe eau solaires » ou des « capteurs à air chaud ».

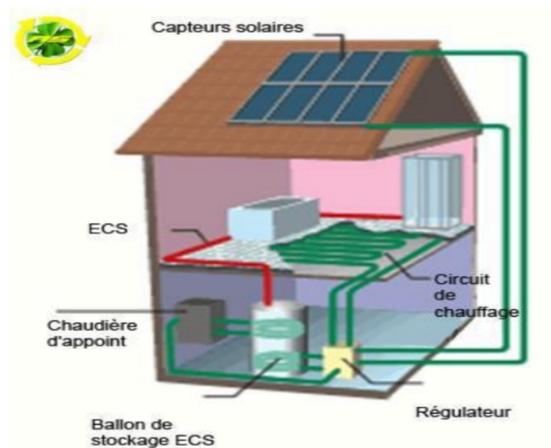


Figure I- 3:chauffe-eau solaire[2]

### C. L'énergie solaire thermodynamique

Il y a aussi ce qu'on appelle l'énergie solaire thermodynamique, qui fonctionne sur le principe de concentration des rayons solaires au moyen des miroirs galbés, en un foyer placé sur une tour qui

emmagasine les calories pour les restituer ensuite sous forme mécanique à l'aide d'une turbine à vapeur par exemple.



*Figure I- 4:Tour solaire*

#### **I.2.1.2 L'énergie éolienne :**

C'est une énergie produite par le vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur ou un moulin à vent.



*Figure I- 5:éoliennes*

**I.2.1.3 L'énergie hydraulique :**

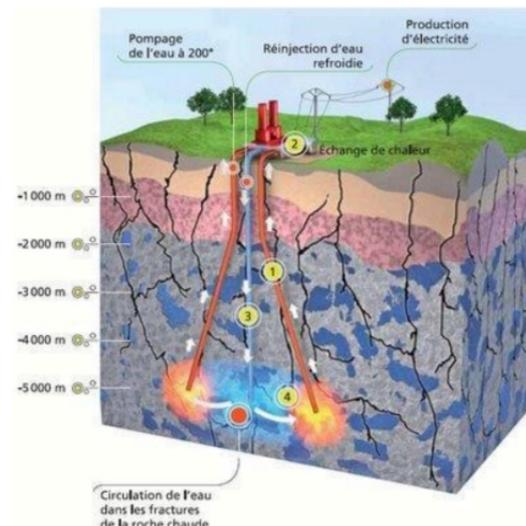
Utilisant des cours d'eau pour produire d'électricité.



*Figure I- 6:Énergie hydraulique*

**I.2.1.4 La géothermie :**

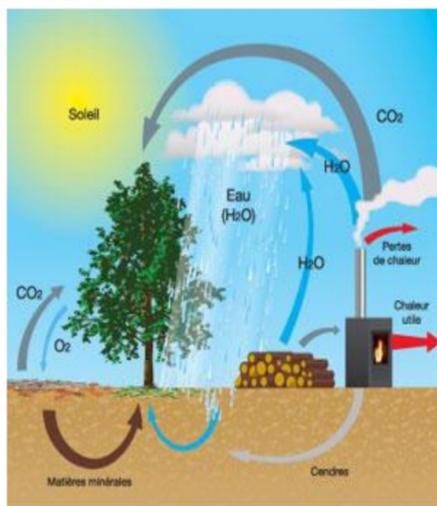
Le principe consiste à extraire l'énergie géothermique contenue dans le sol. La plus grande partie de la chaleur de la terre est produite par la radioactivité naturelle des roches qui constituent la croûte terrestre.



*Figure I- 7:Centrale géothermique de Nesjavellir en Islande.*

**I.2.1.5 Le biogaz :**

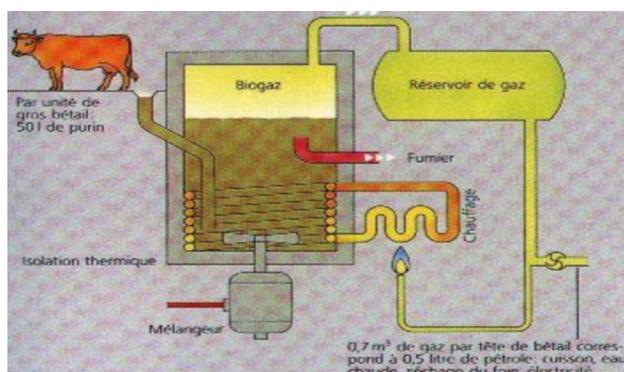
Utilisation de l'énergie générée par la combustion du gaz méthane collecté et produit par les déchets organiques parvenant de l'agriculture et des décharges industrielles.



*Figure I- 8:le principe de biogaz.*

**I.2.1.6 La biomasse :**

Il s'agit d'énergie stockée sous forme organique grâce à la photosynthèse, et exploitée par combustion (bois et autre biocarburants). Elle est considérée comme renouvelable si on admet que les quantités brûlées n'excèdent pas les quantités produites.



*Figure I- 9:le systeme de le biomadde*

### I.2.1.7 L'énergie marémotrice :

L'énergie des vagues (marée haute, marée basse), transformée en énergie électrique.



*Figure I- 10:L'énergie marémotrice*

### I.2.3 Les énergies renouvelables en Algérie :[5]

Ces dernières années, l'Algérie a amorcé une dynamique d'énergie verte en lançant un programme ambitieux de développement des énergies renouvelables. Cette vision s'appuie sur une stratégie axée sur la mise en valeur des ressources inépuisables et leur utilisation pour diversifier les sources d'énergie et préparer l'Algérie de demain. Le programme consiste à installer une puissance d'origine renouvelable de près de 22000 MW entre 2011 et 2030 dont 12000 MW seront dédiés à couvrir la demande nationale en électricité et 10000 MW à l'exportation. L'exportation de l'électricité est toutefois conditionnée par l'existence d'une garantie d'achat à long terme, de partenaires fiables et de financements extérieurs.

Le potentiel national en énergies renouvelables étant fortement dominé par le solaire, l'Algérie considère cette énergie comme une opportunité et un levier de développement économique et social, notamment à travers l'implantation d'industries créatrices de richesse et d'emplois. Comparativement, les potentiels en éolien, en biomasse, en géothermie et en hydroélectricité sont beaucoup moins importants. Cela n'exclut pas pour autant le lancement de nombreux projets de réalisation de fermes éoliennes et la mise en œuvre de projets expérimentaux en biomasse et en géothermie. L'Algérie s'engage avec détermination sur la voie des énergies renouvelables afin d'apporter des solutions globales et durables aux défis environnementaux et aux problématiques de préservation des

ressources énergétiques d'origine fossile. Ce choix stratégique est motivé par l'immense potentiel en énergie solaire. Cette énergie constitue l'axe majeur du programme qui consacre au solaire thermique et au solaire photovoltaïque une part essentielle. Le solaire devrait atteindre d'ici 2030 plus de 37% de la production nationale d'électricité. Malgré un potentiel assez faible, le programme n'exclut pas l'éolien qui constitue le second axe de développement et dont la part devrait avoisiner les 3% de la production d'électricité en 2030. L'Algérie prévoit également l'installation de quelques unités de taille expérimentale afin de tester les différentes technologies en matière de biomasse, de géothermie et de dessalement des eaux saumâtres par les différentes filières d'énergie renouvelable.



### I.2.3.1 Potentiel d'énergie solaire en Algérie : [5]

De par sa situation géographique l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara) L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m<sup>2</sup> est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national soit près de 1700KWh/m/an au Nord et 2263 kWh/m/an au Sud du pays.

*tableau I- 1:Potentiel solaire en Algérie[2]*

Régions	Région côtière	Haut plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (Heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh /m <sup>2</sup> /an)	1700	19000	2650

L'histogramme suivante traduire le tableau ci- dessus

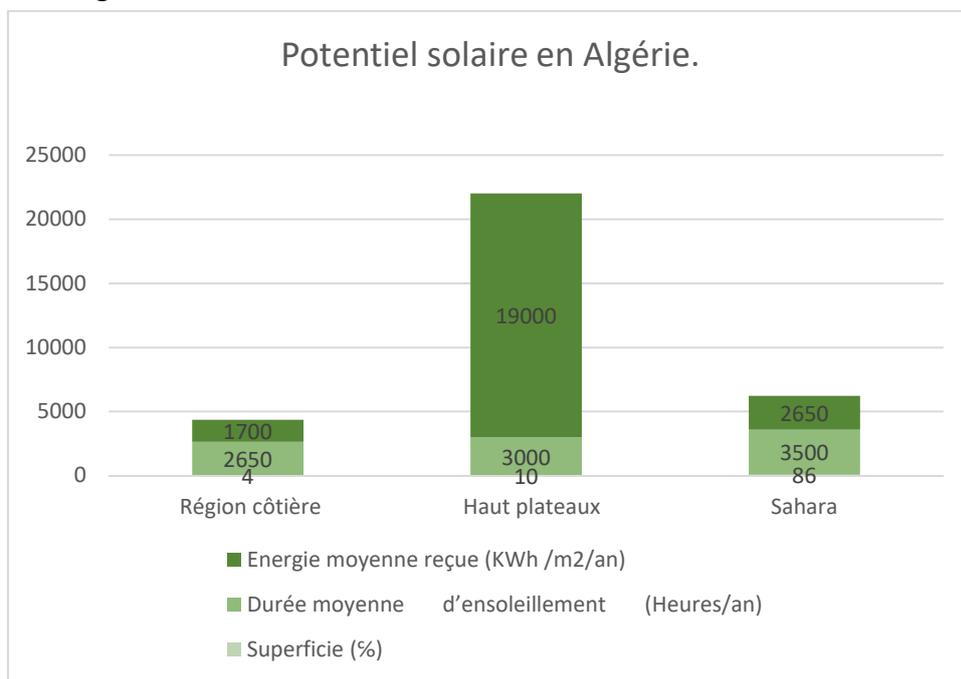
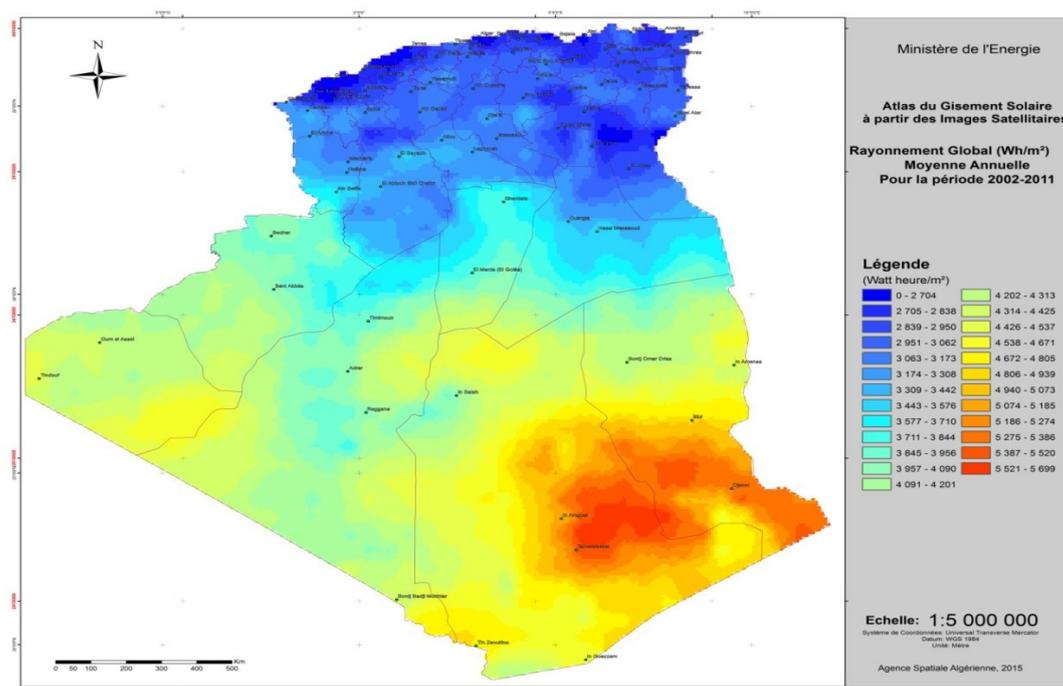


Figure I- 11:histogramme Potentiel solaire en Algérie

La distribution de l'énergie reçue en Algérie, en moyenne annuelle, est donnée par la figure ci-dessous. Elle présente les différents niveaux énergétiques qui donnent ainsi un découpage du pays en régions iso énergétiques.



*Figure I- 12: Carte de l'Irradiation Globale Directe Annuelle Moyenne (Période 2002-2011) [6]*

Le programme national de développement des énergies renouvelables (EnR), adopté en 2011 puis révisé en 2015, ambitionne d'atteindre, à l'horizon 2030, une puissance totale de 22000 Mégawatts (MW) dédiés à la seule consommation locale. Il prévoit, pour cela, de mettre en œuvre un large éventail de filières technologiques où le photovoltaïque (PV) et l'éolien se taillent la part du lion avec respectivement 13575 MW et 5010 MW, le reste étant réparti entre le thermo-solaire (CSP), la biomasse, la cogénération et la géothermie. Le nombre de ces filières répond au souci de ne ménager aucun moyen ni effort pour produire le maximum d'électricité renouvelable en vue de compenser au mieux le déficit en énergie fossile qui s'annonce. L'électricité étant l'unique produit que chacune d'elles génère, elles peuvent par conséquent se trouver en compétition l'une contre l'autre au lieu de se compléter. Surtout lorsque deux ou plusieurs d'entre-elles sont respectivement alimentées par deux ou plusieurs champs énergétiques superposés dans la même zone. Dans ce cas, elles ne pourront pas normalement coexister car un choix économique s'imposera pour sélectionner la plus rentable.

### I.2.3.2 Potentiel L'énergie éolienne en Algérie :

Suite à la révision du programme national en 2015, la part de l'énergie éolienne a été rehaussée de 2000 MW à 5010 MW et occupe désormais la seconde place derrière le photovoltaïque, loin devant les autres filières. L'importance accordée à l'éolien est certainement due à l'amélioration considérable des coûts moyens du kilowatt/heure (kWh) qui sont, après ceux de la géothermie, les plus bas du renouvelable. L'Energy Information Administration (EIA), organisme du Département US de l'Energie, prévoit qu'en 2022 les coûts moyens (en \$ de 2015) seront comme suit :

- kWh conventionnel : \$0,0726
- kWh géothermique \$0,0423
- kWh éolien : \$0,0736
- kWh photovoltaïque : \$0,1253
- kWh thermo-solaire CSP : \$0,239

Ceci dit, il ne faut pas perdre de vue que ces coûts ont été obtenus à l'étranger dans des pays qui maîtrisent parfaitement la technologie et où les vents atteignent de grandes vitesses avec des moyennes annuelles dépassant souvent les 9 mètres/seconde (m/s). Le coût de l'éolien sera donc autrement plus élevé en Algérie où les vents sont plutôt modérés avec un maximum annuel moyen ne dépassant pas environ 6 m/s sur l'essentiel du territoire national. Sans compter le manque d'expérience malgré la réalisation récente d'un pilote éolien de 10 MW dans la région d'Adrar. [5]

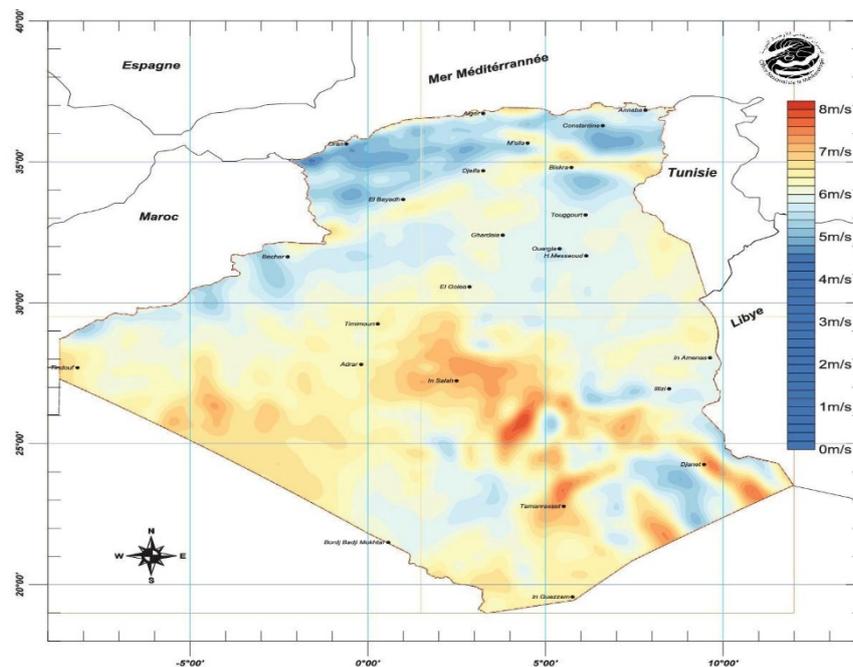


Figure I- 13: Carte du Vent Annuel Moyen à 50m (Période 2001-2010)[6]

### I.2.3.3 Potentiel de l'énergie géothermique :

La compilation des données géologiques, géochimiques et géophysique a permis de tracer une carte géothermique préliminaire (figure (I.14)). Plus de deux cent (200) sources chaudes ont été inventoriées dans la partie Nord du Pays. Un tiers environ (33%) d'entre elles ont des températures supérieures à 45°C. Il existe des sources à hautes températures pouvant atteindre 118 °C à Biskra.

Des études sur le gradient thermique ont permis d'identifier trois zones dont le gradient dépasse les 5 °C/100 m : [7]

- Zone de Relizane et Mascara ;
- Zone d'Aïne Boucif et Sidi Aïssa ;
- Zone de Guelma et Djebel El Onk

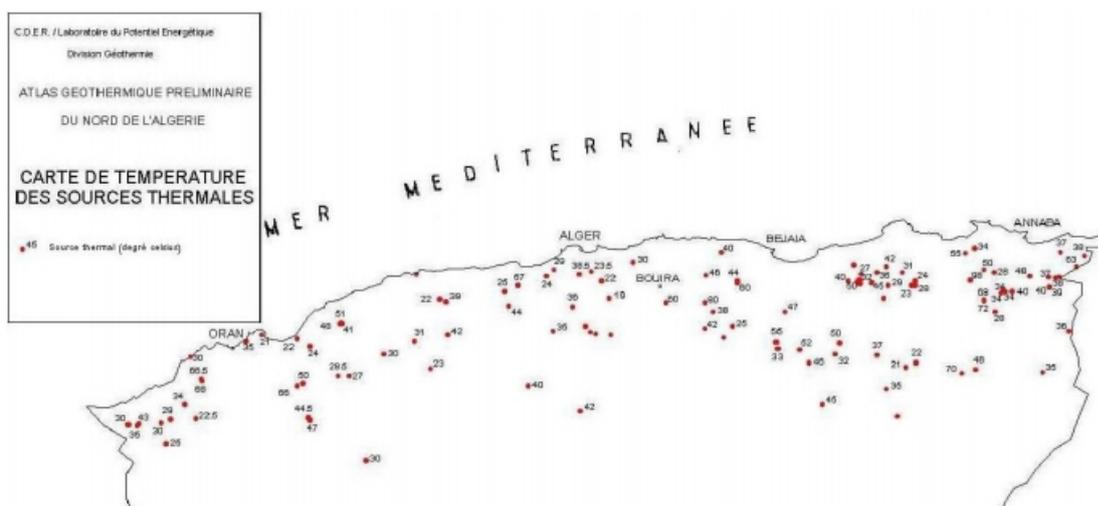


Figure I- 14: Carte des sources thermales en Algérie.

#### I.2.3.4 Potentiel de l'hydroélectricité :

Les quantités globales tombant sur le territoire algérien sont importantes et estimées à 65 milliards de m<sup>3</sup>, mais finalement profitent peu au pays : nombre réduit de jours de précipitation, concentration sur des espaces limités, forte évaporation, évacuation rapide vers la mer. Schématiquement, les ressources de surface décroissent du nord au sud. On évalue actuellement les ressources utiles et renouvelables de l'ordre de 25 milliards de m<sup>3</sup>, dont environ 2/3 pour les ressources en surface. 103 sites de barrages ont été recensés. Plus de 50 barrages sont actuellement en exploitation (voir tableau(I-2)). [8]

*tableau I- 2: Parc de production hydroélectrique en Algérie[8]*

<b>Centrale</b>	<b>Puissance installée en MW</b>
Darguina	<b>71.5</b>
Ighil Emda	<b>24</b>
Mansouria	<b>100</b>
Erraguene	<b>16</b>
Souk Eljema	<b>8.085</b>
Tizi Meden	<b>4.458</b>
Ighzer nchebel	<b>2.712</b>
Ghrib	<b>7.000</b>
Gouriet	<b>6.425</b>
Bouhanifa	<b>5.700</b>
Oued Fodda	<b>15.600</b>
Beni Behde	<b>3.500</b>
Tessala	<b>4.228</b>

### **I.2.3.5 Le Potentiel de la Biomasse :**

#### **A. Potentiel de la forêt**

Le potentiel actuel est évalué à environ 37 millions de TEP (Tonnes Equivalent Pétrole). Le potentiel récupérable est de l'ordre de 3,7 millions de TEP. Le taux de récupération actuel est de l'ordre de 10%. [2]

#### **B. Potentiel énergétique des déchets urbains et agricoles**

Cinq millions de tonnes de déchets urbains et agricoles ne sont pas recyclés. Ce potentiel représente un gisement de l'ordre de 1,33 millions de TEP/an. [2]

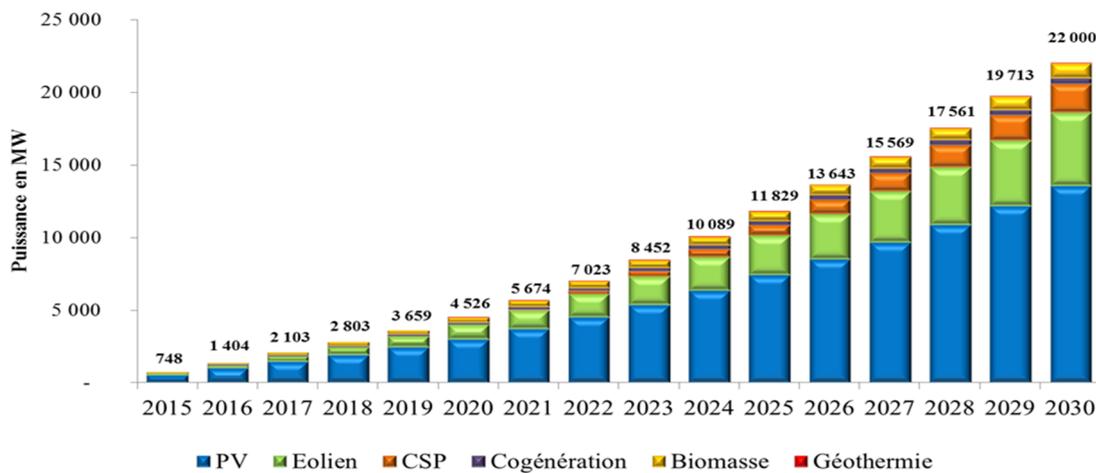


Figure I-15: Evolution des énergies renouvelable a l'horizon de 2030 en Algérie

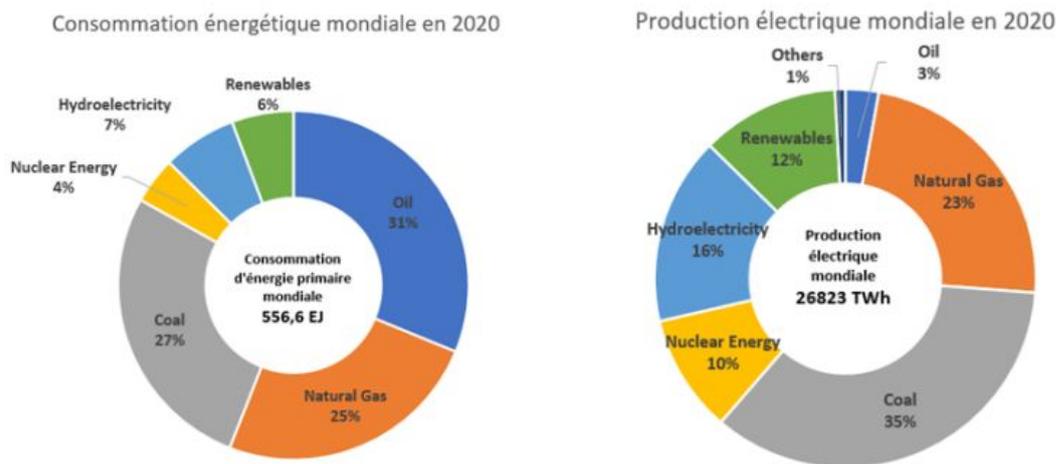


Figure I-16: consommation énergétique et la production électrique mondiale en 2020 [9]

**I.2.4 Les avantages et les inconvénients des sources d'énergies renouvelable :**

**A. Avantages :**

De manière générale, les énergies renouvelables sont plus propres que les énergies fossiles et fissiles actuellement exploitées dans le monde entier. Elles sont plus écologiques, disponibles en masse autour du globe est sont « gratuites » une fois les installations de production rentabilisées.

- L'énergie éolienne est l'énergie propre par excellence. Sans rejet ni déchet d'aucune sorte, elle permet avec un bon coefficient de performance d'assurer une bonne indépendance énergétique. Sur terre ou off-shore, les éoliennes démontrent d'excellentes capacités de production et sont une alternative viable pour les territoires les plus reculés dont l'accès à l'électricité est difficile.
- L'énergie biomasse est liée à la combustion du bois. Le bois est un combustible très présent il est largement implanté. Si cette énergie rejette tout de même des gaz à effet de serre, les rejets sont moindres par rapport à la quantité de CO<sub>2</sub> qu'un arbre aura absorbé au cours de sa vie. Une forêt bien gérée et renouvelée permet de ne pas épuiser les réserves en bois. La biomasse est donc une énergie qui participe au développement local tout en étant très bon marché (les bûches et les granulés de bois sont les combustibles les moins chers du marché).
- L'énergie solaire est largement plébiscitée dans le secteur énergétique et se développe à vitesse grand V. Production d'électricité grâce au photovoltaïque, mais aussi de chauffage grâce aux panneaux solaires thermiques, le solaire peut être exploité à grande échelle dans des parcs prévus à cet effet ou à petite échelle chez les particuliers. Même si les panneaux solaires possèdent un meilleur rendement en zone très ensoleillée.[10]

### **B. Inconvénients :**

Comme pour chaque chose, les énergies renouvelables ont également leurs petits défauts. On notera en priorité un coût relativement important à l'achat des installations dont la rentabilité peut se faire attendre des années. Revenons en détailles les trois sources précédemment citées :

- La production de l'énergie éolienne est très dépendante de la force du vent. Pour pallier cela, les éoliennes sont placées dans des zones très ventouses. Cependant, certaines populations refusent leur implantation à cause de la nuisance sonore et visuelle qu'elles entraîneraient.

- L'énergie biomasse, à l'instar de l'énergie géothermique, a pour défaut de ne pas pouvoir être exploitée de manière intensive au risque d'épuiser trop rapidement les ressources naturelles.
- L'énergie solaire ne possède pas encore un rendement suffisant pour subvenir à la totalité des besoins énergétiques d'un foyer. Se pose également le problème du recyclage des cellules photovoltaïques et thermiques.

### **I.3 Energies non renouvelables :**

Les énergies non renouvelables sont issues de matières premières finies. Ces matières premières seront tôt ou tard épuisées, car elles ne peuvent pas se renouveler dans des délais appréhendables à l'échelle humaine. Parmi les sources d'énergie non renouvelables, on dénombre le pétrole, le gaz naturel, le charbon et l'uranium, les trois premières étant aussi connues sous le nom d'énergies fossiles (car issues d'une biomasse fossile). [10]

#### **I. 3.1 Les différents types d'énergies non renouvelables :**

##### **I.3.1.1 Le pétrole :**

Le pétrole principalement composé d'hydrocarbures, est l'un des anciennes énergies fossiles utilisé par l'homme. Il fournit l'ensemble des carburants liquides tels que l'essence, le fioul, le gasoil ou le kérosène, et entre dans la composition d'une multitude de matériaux communs tels que les plastiques, les cosmétiques, les détergents ou encore les lubrifiants.

Cependant, de l'extraction à la consommation, en passant par la transformation et le transport, l'or noir présente certains dangers environnementaux. Par exemple, les risques de marées noires sont très présents, et leur écologique catastrophiques, elles détruisent la faune et la flore, polluent les sols, l'eau et l'air et sont nocives également pour l'homme, qui se baigne et se nourrit d'animaux marins.

En 2015, il représentait 31.7% de l'énergie primaire consommée dans le monde.

### **I.3.1.2 Le charbon :**

Le charbon est une roche fossile issue de la biomasse, majoritairement composée de carbone, mais aussi de l'hydrogène, de soufre et d'oxygène. Il est principalement utilisé pour la production d'électricité, mais aussi pour l'alimentation des chaudières industrielles et du chauffage domestique, ainsi qu'en sidérurgie ou encore dans la fabrication de caoutchouc synthétique. Il peut être brûlé ou gazéifié. Il se stocke et se transporte facilement, ce qui en fait le combustible fossile le moins cher à exploiter.

En revanche, son exploitation et son extraction sont très nocives pour l'homme. En effet, les mineurs sont exposés à des agents nocifs en respirant sa poussière et des gaz toxiques, dont ils contractent des maladies graves, mais également aux risques d'éboulements des mines. Et c'est sans compter les risques d'inondation, d'incendie ou d'explosion.....

De plus, cette exploitation minière perturbe l'environnement et détruit l'habitat de nombreux animaux sauvages.

Enfin, la combustion du charbon libère des toxines telles que l'arsenic, le mercure ou le plomb, causant diverses maladies respiratoires chez les animaux.

En 2015, il représentait 28.1% de la consommation mondiale d'énergie primaire.

### **I.3.1.3 Le gaz naturel :**

Naturellement présent sous forme gazeuse dans les roches poreuses, le gaz naturel est un combustible fossile principalement composé d'hydrocarbures extrait par forage.

Il est utilisé en tant que combustible industriel et domestique grâce à son haut pouvoir calorifique, mais aussi comme matière première dans l'industrie pour la production d'ammoniac, de méthanol et encore d'hydrogène.

Fort combustible, le gaz présente de multiples risques d'incendie, d'explosion ou encore d'intoxication et brûlures, autant lors de son extraction, du transport et du stockage que de sa distribution. Mais ce n'est pas tout : lors de l'extraction de certains gaz par fracturation hydraulique, on ajoute des produits chimiques dans des millions de litres d'eau par puits.

L'eau contaminée se déverse en grande partie dans les nappes phréatiques, polluant ainsi les sources d'eau dite potable.

il était en 2015 la troisième source d'énergie thermique la plus consommée, représentant 21.6% de l'énergie primaire utilisée dans le monde.

#### I.3.1.4 L'énergie nucléaire :

L'énergie nucléaire est l'énergie libérée lors des réactions de fissions ou de fusion des atomes d'uranium.

C'est une énergie considérée à tort comme « propre », car même si elle émet peu de CO<sub>2</sub> par rapport aux autres énergies fossiles, sa production et l'extraction d'uranium polluent considérablement, contaminant notamment les terres et les rivières. De plus, si le risque d'accidents de centrales nucléaires est rare, il est bien présent, et les conséquences en sont désastreuses. La radioactivité contamine tous les écosystèmes ; nappe phréatique, rivières, les océans, terre et l'atmosphère. Les conséquences de l'irradiation sur la santé sont épouvantables : trouble mentaux, troubles de la croissance, brûlures, cancers... Et bien sûr, la mort.

Enfin, le minerai d'uranium est présent en de trop petites quantités dans le sol pour lui permettre de se renouveler suffisamment rapidement à échelle humaine.

Sources d'énergie dans la consommation mondiale

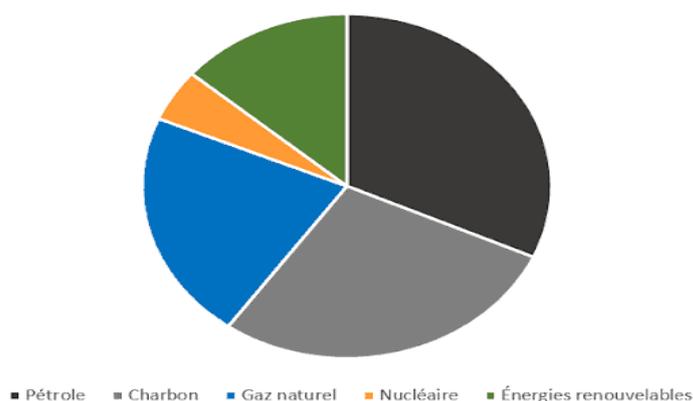


Figure I- 17:source d'énergie dans la consommation mondiale(source :AIE)

**Remarque :** En 2019, l'Algérie a consommé 45.2 milliards de m<sup>3</sup> de gaz naturel, elle se classe au 19<sup>ème</sup> rang mondial avec 1.2% de la consommation mondiale. Sa consommation absorbe 52% de sa production. Elle consomme aussi 0.88 EJ (exajoules) de pétrole, soit 454 kb/j (milliers de barils par jour). Elle représente 0.5% de la consommation mondiale et sa consommation n'absorbe que 31% de sa production.

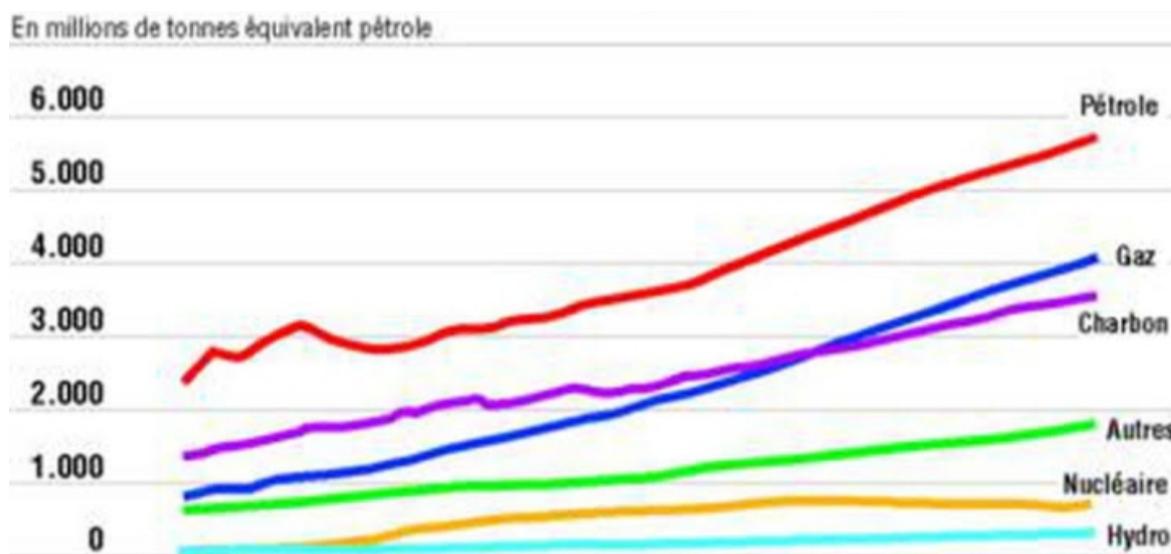


Figure I- 18:évaluation d'énergie fossils en Algerie

#### I.4 Une part infime des énergies renouvelables dans le bilan énergétique actuel :

##### I.4.1 Les sources de production de l'électricité dans quelques pays de l'Afrique du nord :

Dans les pays d'Afrique du Nord, la production énergétique est principalement basée sur les combustibles fossiles (voir Figure I-19). L'Algérie présente la plus faible part d'énergies renouvelables (hydraulique) dans la structure de sa production électrique par rapport à l'Egypte, le Maroc et la Tunisie.[10]

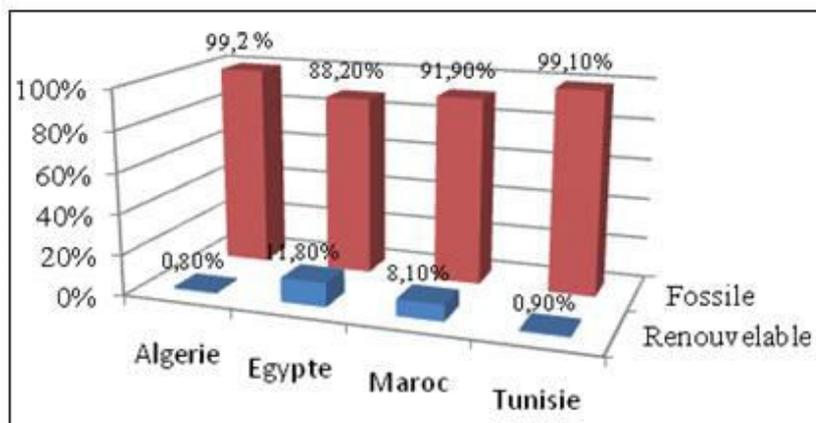


Figure I- 19: La part des énergies renouvelables et fossiles dans la production d'électricité dans quatre pays de l'Afrique du nord (2008) (source : AIE)

Les combustibles fossiles et parmi eux majoritairement le gaz naturel dont le pays dispose en quantités importantes, constituent la première source de production d'électricité en l'Algérie. Ils assurent à eux seuls 99,2 % de la production totale du pays.

#### I.4.2 La part des énergies renouvelables dans le bilan énergétique actuelle

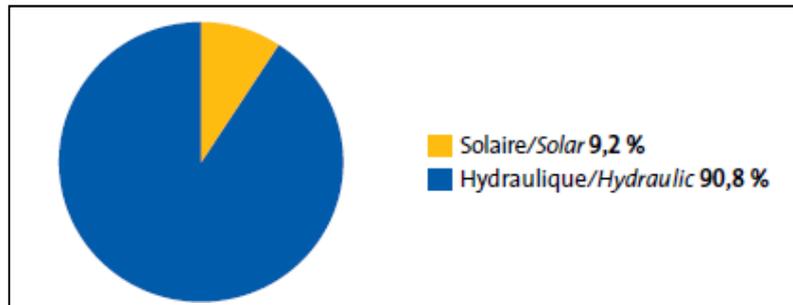
Les énergies renouvelables en Algérie sont utilisées seulement dans la production de l'électricité avec un faible taux dans le bilan énergétique national avec une légère progression comme décrit le tableau suivant, elles constituent qu'environ 0,02 %.

Les sources renouvelables ne représentent que 0,8 % en 2011, et 98 % de la production renouvelable est d'origine hydraulique. D'après les données précédentes, la part des énergies renouvelables dans le bilan énergétique national demeure insignifiante. Elles ne représentent qu'un taux de 0,8%, soit quelques mégawatts qui sont notamment des barrages hydrauliques construits pendant la colonisation qui représente 90,8 % de la production renouvelable.

Si l'on parle du solaire, de l'éolien, de la géothermie ou de la biomasse, elles ne constituent qu'environ 0,02 % dans le bilan énergétique national, elles n'apparaissent pas dans la figure ci-dessus vu leur faible taux. Le solaire représente 9,2 de la production renouvelables totale avec l'entrée en production de la centrale hybride de Hassi R'mel (capacité de 150 MW dont 25 MW en solaire). Cette production d'électricité solaire a été de 124 GWh (y compris la production des villages solaires).

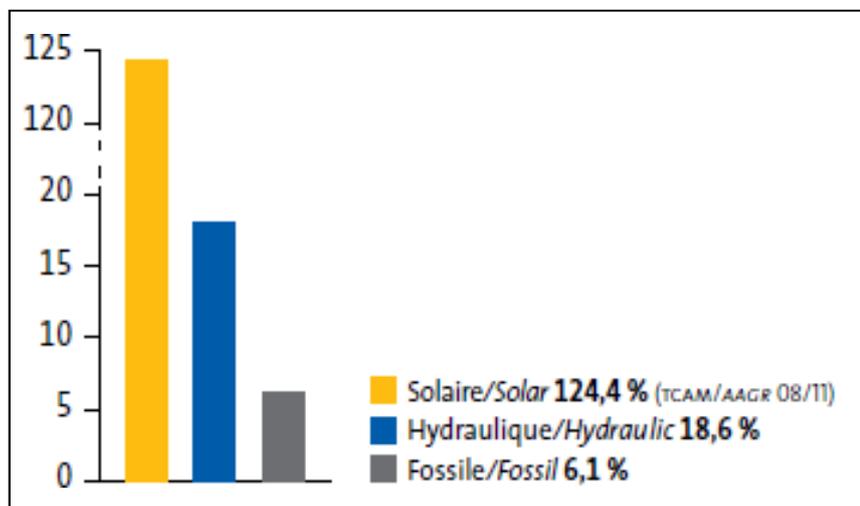
**I.4.3 La structure de la production électrique d'origine renouvelable**

La structure de la production électrique d'origine renouvelable de l'année 2011 est présentée dans la figure suivante :



*Figure I- 20: La structure de la production électrique d'origine renouvelable – 2011 (source : AIE)*

La filière hydroélectrique algérienne affiche une capacité de 245 MW, pour une production de 380 GWh en 2011, soit plus du double du niveau de 2010 (174 GWh), grâce à une pluviométrie plus favorable



*Figure I- 21: Taux de croissance annuel moyen 2001-2011 (source : AIE)*

## **I.5 Quelques réalisations dans le domaine des énergies renouvelables**

### **I.5.1 Dans la steppe**

- Electrification de plus de 4000 foyers d'une puissance de 600 kwc.
- 160 pompes solaires d'une puissance de 240 kwc.
- 80 pompes éoliennes d'une puissance de 120 kw.

### **I.5.2 Au nord**

- Centrale photovoltaïque de 10 kwc connectée au réseau national électrique (ce projet entre dans le cadre de la coopération, algéro-espagnole) CDER.
- Station de services de Naftal alimentée en énergie solaire (Staoueli d'une puissance de 7 kwc).
- Installations pilotes au profit de la gendarmerie national : alimentation en énergie photovoltaïque des postes de surveillances routières.

### **I.5.3 Au grand sud**

- Electrification au solaire de 18 villages
- Electrification de plus de 1000 foyers
- Electrification de 15 mosquées
- Electrification de 15 écoles
- Electrification de 20 postes de sécurité (gendarmerie, gardes communales...)
- Une centrale hybrides solaire/gaz : de 150 MW est le premier du genre au monde avec 130 MW cycle combiné gaz et 25 MW champ solaire avec un cout total de 315,8 Millions d'Euros. Le procédé technologique utilisé est celui des miroirs géants paraboliques sur une superficie de 180000 m<sup>2</sup> avec des panneaux solaires de 100 mètres. 224 collecteurs solaires dans une superficie de 130 ha dont le champ solaire occupera 90 ha.
- Alimentation de plus de 100 sites e télécommunication (puissance de 650 KWc).
- Projet d'électrification à l'énergie solaire d'un village de Torset.
- Projet de Motorisation de 14 Puits d'Eau de Parcours.

Quelque projet avec petites capacités, “Nous avons accusé un retard considérable pour l'exploitation des énergies renouvelables”<sup>1</sup>, Pourtant, l'Algérie recèle des potentialités énormes telles que 3 000 heures d'ensoleillement par année, une irradiation solaire de 6 kilowatts/heure/m<sup>2</sup> au sud et 4 à 5 Kilo-Watts/heure/m<sup>2</sup> au nord. La consommation énergétique européenne peut être satisfaite 15 fois plus, rien qu'avec les capacités existantes au sud du pays.

L'avenir de l'Algérie ne doit pas dépendre uniquement de l'énergie solaire mais il faut développer davantage le potentiel géothermique estimé à plus de 200 sources géothermales, il faut, prendre en considération les potentialités de chaque région suivant les diverses énergies renouvelables recensées.

### **I.6 Conclusion :**

Dans ce chapitre, on a présenté les bases indispensables à la compréhension des énergies renouvelables et non renouvelables ainsi que leurs avantages et inconvénients, sans oublier de citer les énergies utilisées en Algérie.

**Chapitre II : Etude de la cellule solaire à  
conversion photovoltaïque**

## II.1 Introduction

Le soleil est la source essentielle de tout rayonnement reçu par la terre, ce dernier lui procure l'énergie, la chaleur et la lumière qui sont nécessaires à toute forme de vie. Pour cette raison on va définir dans ce premier chapitre quelques notions sur l'énergie solaire, qui nous 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.[11]

## II.2 Gisement solaire

### II.2.1 Histoire sur l'énergie solaire :

La source utilisée très récemment est l'énergie solaire. En réalité cette énergie telle que l'utilisation de la lumière ou du soleil est beaucoup plus ancienne. Il y a des milliers d'années des civilisations différentes ont honoré le soleil comme un vrai dieu. En 212 avant JC, Archimède a utilisé le soleil pour arrêter la flotte romaine en se servant des miroirs en bronze poli. Avec ces miroirs il a réussi à mettre le feu à la flotte à distance. L'humanité connaît la force du soleil depuis toujours et il est intéressant d'observer comment l'utilisation d'énergie provenant du soleil a évolué.

La transformation de la lumière du soleil en courant électrique date de 1839. Elle a été découverte par Antoine-César Becquerel<sup>2</sup>. Au XIXe siècle, quelques moteurs à miroirs ont été construits. Mais même malgré la découverte de l'effet du sélénium photovoltaïque en 1877 il faudra attendre jusqu'en 1955 que les chercheurs de Bell Telephone Laboratories (aux Etats-Unis) soient capables de produire la cellule qui avait le rendement de conversion énergétique au moins 6% (ratio entre l'énergie utilisée pendant la fabrication et l'énergie que le système est capable de produire). Enfin pour pouvoir annoncer la naissance de la photopile solaire. Cet effet a surtout été utilisé pendant les exploitations dans l'univers qui elles aussi commençaient à se développer. Mais en exploitant toujours de plus en plus le charbon, le pétrole et développant l'énergie nucléaire les industriels ne se sont pas sérieusement intéressés aux possibilités de l'énergie solaire avant la crise pétrolière de 1973. Les années 70 peuvent être considérées comme le berceau de l'énergie solaire (photovoltaïque).

La notion « photovoltaïque » provient du mot grec [phos] = lumière et du nom d'un physicien italien Alessandro Volta.

Ensuite, c'est l'augmentation de la consommation mondiale de l'énergie et la diminution des réserves mondiales de pétrole et de charbon qui a amené de nouveau à développer et utiliser des sources renouvelables pour fournir de l'énergie. Cette augmentation de besoins et d'exigences énergétiques est dû aux changements démographiques, à la croissance

industrielle et au développement du commerce. Nous pouvons constater que l'évolution de la consommation d'énergie est directement proportionnelle à l'évolution économique.

La répartition de la consommation de l'énergie est non proportionnelle dans le monde. Plus de la moitié est consommée par seulement six états: les Etats-Unis, la Chine, la Russie, l'Inde, le Japon et l'Allemagne. Par exemple les Etats-Unis absorbent 1/5 de l'énergie mondiale pour seulement 1/20 de la population mondiale.

*Tableau II- 1: la consommation de l'énergie dans l'histoire*

Période	Personne par jour (en KJ)
Il y a des milliers d'années	8 000
Il y a des 100 000 d'années	20 000
En 1400	110 000
19 <sup>ème</sup> /20 <sup>ème</sup> siècle	300 000
Fin de millénaire	1 000 0000

*Source: MUSIL, Petr3*

Selon le tableau ci-dessus, la consommation d'énergie a été multipliée dix fois depuis 1400 et sachant qu'elle a fortement augmenté surtout pendant le dernier siècle.

En 2000, les statistiques ont annoncé que 83% de la consommation mondiale de l'énergie est représentée par les combustibles fossiles, seulement 6% provient des centrales hydrauliques et nucléaires et 10% de la biomasse (l'ensemble des matières organiques qui peuvent servir de source d'énergie). Les autres sources renouvelables étaient au dessous de 1%. Mais au cours du 21<sup>ème</sup> siècle les sources renouvelables montrent un accroissement qui, pour l'instant, ne cesse d'augmenter. En effet nous utilisons les sources renouvelables plus que nous pensons, il s'agit de la lumière, du soleil, du vent ... Par exemple, une pièce de la maison est chauffée par les rayons de soleil qui traversent la fenêtre, les voiliers sur l'océan sont poussés par le vent etc.

Volker Quasching<sup>4</sup> estime que les statisticiens devraient prendre en compte toute forme d'énergie pour leurs constats statistiques. Sinon, d'après lui, les données sont déformées et mettent les sources renouvelables à l'ombre. Alors selon Quasching les sources renouvelables occupent déjà une place plus importante et elles sont plus étendues que ce que l'on peut penser. Chaque année le soleil "envoie" des rayons à la Terre d'une puissance 40 000 fois plus que les besoins énergétiques que l'humanité consomme sous forme d'énergies fossiles.

**II.2.2 Mouvement de la terre solaire :**

Toute application solaire nécessite la connaissance du mouvement apparent du soleil pour un point donné de la surface terrestre, caractérisé par sa latitude (positive pour l’hémisphère

Nord) et sa longitude (définie par rapport au méridien de Greenwich, positivement vers l’Est).[13]

Si l’on distingue sur un papier les différentes positions de coordonnées équatoriales qu’occupe la terre durant toute l’année dans la sphère céleste, et qui joint ces points d’un trait continu, on obtient un cercle appelé l’écliptique. Figure (II-1). [14]

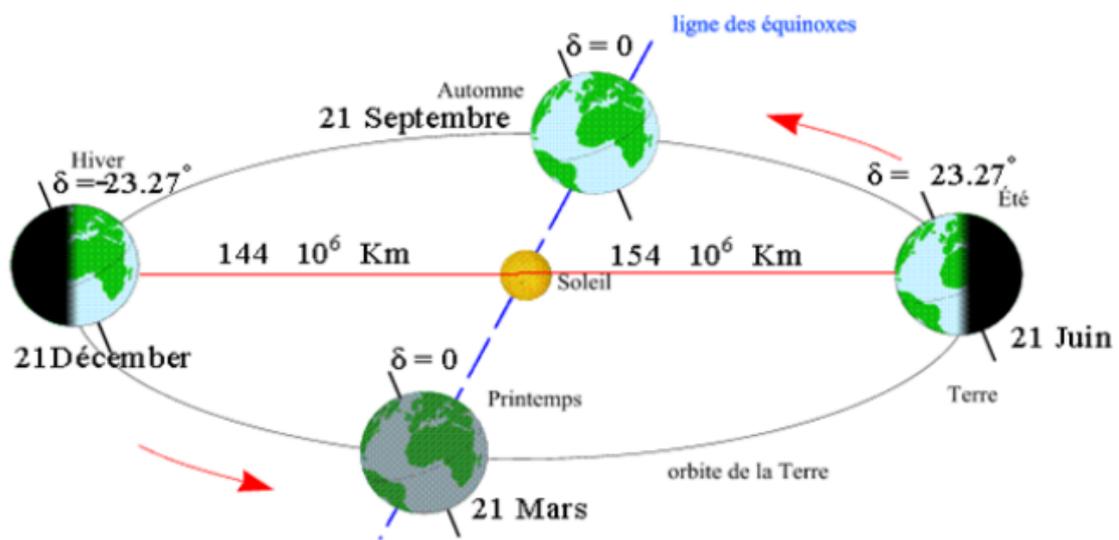


Figure II- 1: Mouvement de la terre autour du soleil [15]

Le soleil décrit un cercle centré sur l’axe de rotation de la terre, déplacé à un angle  $\delta$  par rapport au plan parallèle à l’équateur. Pour l’observateur terrestre, en considérant la déclinaison comme constante sur une journée, le soleil décrit un cercle autour de l’axe de rotation de la terre. Ce cercle est parallèle au plan de l’équateur, et sa hauteur apparente sur ce plan donnée par la déclinaison.

Au cours de la journée, l’instant où le soleil passe par le méridien du lieu de l’observateur c’est-à-dire où il est au sud dans notre hémisphère est le midi « vrai ». Pour un instant quelconque, l’angle horaire AH est l’angle projeté sur le plan de l’équateur, entre le soleil et le midi vrai, il vaut  $15^\circ$  par heure ( $360^\circ/24h$ ) [13].

A position du soleil est définie par deux angles : sa hauteur HS l’angle entre le soleil et le plan horizontal du lieu, et son azimut AZ, l’angle avec la direction du sud, compté négativement vers l’est (sens anti trigonométrique dans l’hémisphère Nord). Figure (II-2).

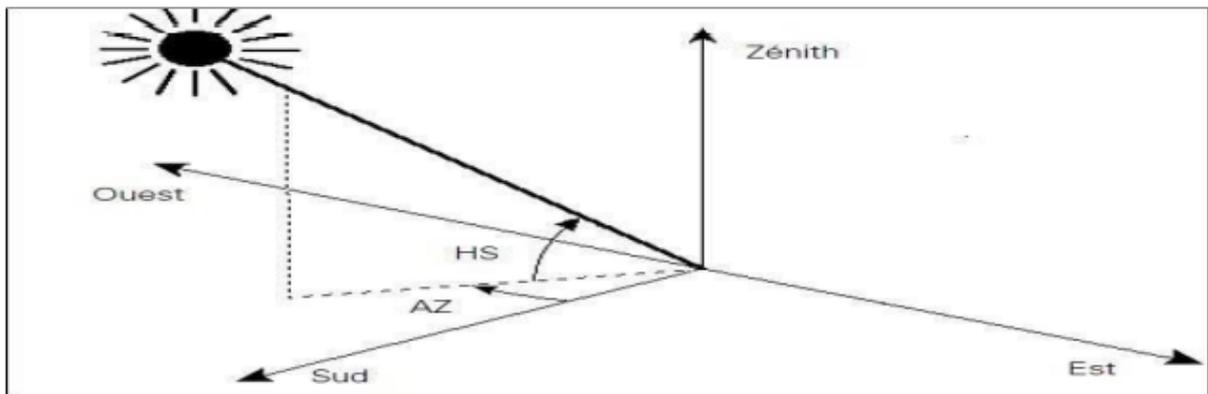


Figure II- 2: Définition de la position du soleil. [14]

## II.2.3 Notions d'astronomie :

### II.2.3.1 Repère des coordonnées géographiques terrestres :

Ce sont les coordonnées angulaires pour le repérage d'un site à la surface terrestre:

#### A. Latitude ( $\phi$ ) :

Une des coordonnées terrestres d'un point de notre planète. C'est l'angle que fait le plan de l'équateur avec la direction reliant le centre de la terre au point considéré. Sa valeur est positive dans l'hémisphère nord et négative dans l'hémisphère sud. [15]

#### B. Longitude (L) :

Une des coordonnées terrestres d'un point de notre planète. C'est l'angle que fait le méridien local passant par le point considéré avec le méridien d'origine passant par la ville de Greenwich. Sa valeur est positive à l'ouest et négative à l'est de la méridienne origine. [15]

#### C. Le méridien :

Grand cercle de la terre passant par les pôles. Tous les points d'un même méridien ont évidemment la même longitude, le méridien pris pour origine ( $0^\circ$ ) des longitudes est celui de Greenwich. Le plan méridien en un lieu est déterminé par ce lieu et par l'axe des pôles. Le temps solaire vrai est identique, à un instant donné, pour tous les points d'un même méridien. [15]

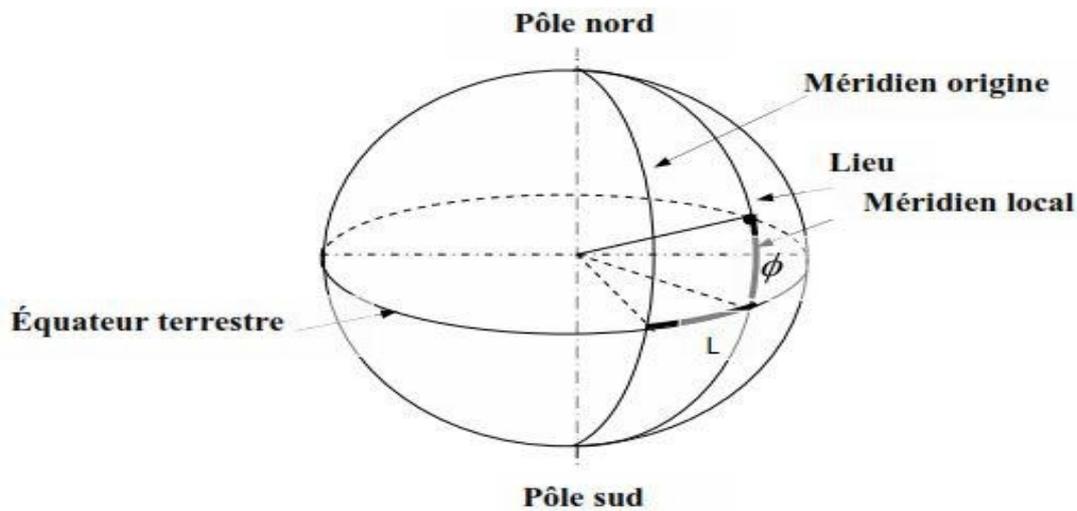


Figure II- 3:Les coordonnées géographiques terrestres[15]

### II.2.3.2 Les coordonnées équatoriales :

Les coordonnées équatoriales sont indépendantes de la position de l'observateur sur la terre, mais elles sont liées à l'heure de l'observation. La position du soleil est exprimée par deux angles qui sont la déclinaison  $\delta$  et l'angle horaire  $\omega$ . [15]

#### A. La déclinaison ( $\delta$ ) :

C'est l'angle que forme la direction du soleil et le plan équatorial. La déclinaison varie de façon sinusoïdale au cours de l'année comme.

L'expression est donnée par :

$$\delta = 23.45 \sin \left[ 2\pi \left( \frac{284 + n}{365} \right) \right] \quad (\text{II-1})$$

Où  $n$  : est le numéro d'ordre du jour de l'année ( $n=1$  pour le 1er Janvier,  $n=32$  pour le 1er Février,...etc.). La déclinaison varie entre  $-23,45^\circ$  le 21 décembre et  $+23,45^\circ$  le 21 juin.

#### B. L'angle horaire ( $\omega$ ) :

L'angle horaire ( $m$ ) du soleil est déterminé par la rotation diurne de la terre autour de son axe. Cet angle est exprimé en ( $^\circ$ ) et est donné par l'expression Suivante : [9]

$$m = 15^\circ (\text{TSV} - 12) \quad (\text{II-2})$$

Où TSV est le temps solaire varié.

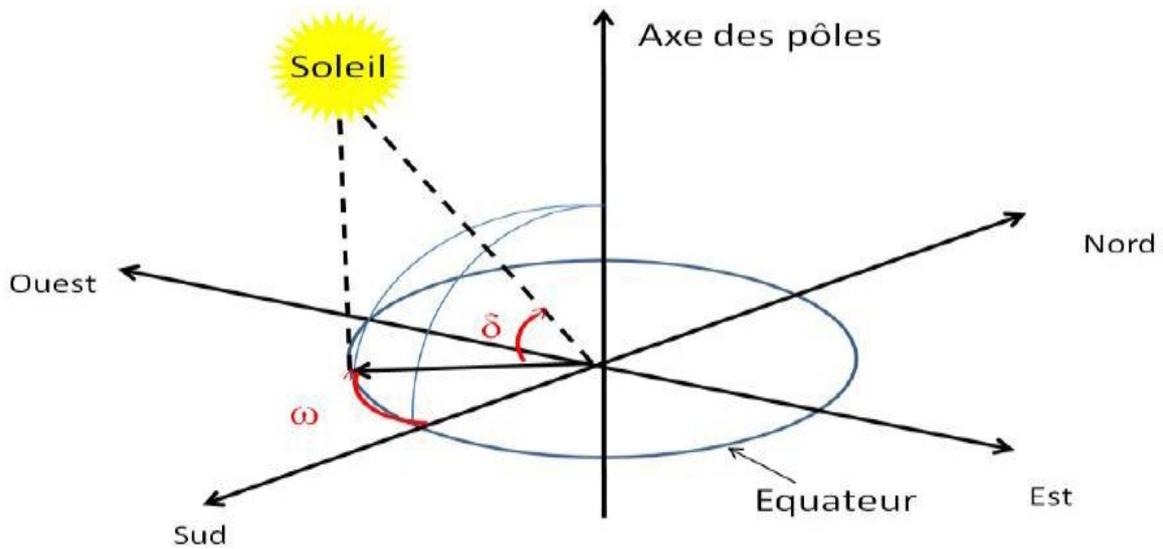


Figure II- 4:Coordonnées horaire. [9]

**II.2.3.3 Equation de temps :**

**A. Temps solaire vrais TSV :**

Le temps solaire vrai est définie partir de la relation de la rotation de la terre. [15]

$$TSV = 12 + \frac{W}{15} \quad (II-3)$$

**B. Temps universel (TU) :**

Le temps universel est le temps solaire moyen du méridien de Greenwich. Le temps solaire moyen d'un lieu de longitude L (comptée positivement vers l'ouest) est lié au temps universel par :

$$TSV = TU - 4L \quad (II-4)$$

Deux points de la surface terrestre séparés par 1° de longitude voient passer le soleil à leurs méridiens avec 4mn de différence.

**C. Le temps légal :**

Le temps légal TL à l'intérieur d'un état est en général le temps du fuseau horaire mais il peut en différer pour des raisons de commodité (heure d'été par exemple) :

$$TL = TU + \Delta E \quad (II-5)$$

$\Delta E$  : décalage de faiseur horaire

$\Delta E$  : décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich. (Egale 1 pour l'Algérie).

#### D. Temps solaire moyen :

Il est appelé parfois le temps local (TSM).

$$TSM = TSV + ET \quad (II-6)$$

Avec :

ET: Équation du Temps.

Elle est donnée par :

$$ET = 9.87 \sin(2j) - 7.53 \cos(j) - 1.5 \sin(j) \quad (II-7)$$

$$J = 360 \left( \frac{n - 81}{365} \right)^1 \quad (II-8)$$

### II.2.4 Repère des coordonnées horizontales (azimutales) :

Dans ce système de coordonnées, l'observateur est définie comme état le point d'origine detout le système projeté autour de lui une sphère imaginaire sur laquelle tous les étoiles viennent se colles (sphère céleste).le soleil est repère que l'azimute (0) et la hauteur (h).

#### II.2.4.1 La hauteur du soleil (h) :

C'est l'angle formé par la direction du soleil et sa projection sur le plan horizontal. Il est donné par la relation suivante :

$$\sin(h) = \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(m) \quad (II-9)$$

$\Phi$ ,  $\delta$  et  $\omega$  sont respectivement la latitude du lieu, la déclinaison du soleil et l'angle horaire.

De la hauteur h, on peut déduire les heures de lever et de coucher de soleil.

#### II.2.4.2 L'azimute(a) :

C'est l'angle compris entre la projection de la direction du soleil sur le plan horizontal et le sud. L'azimut est compté positivement vers l'ouest et négativement vers l'est. Il est donné parla relation suivante : [9]

$$\sin(a) = \frac{\cos(\delta) \sin(\omega)}{\cos(\theta)} \quad (\text{II-10})$$

### II.3 Angle d'incidence sur un plan quelconque

On se propose de calculer l'angle  $\theta$  entre un rayon arrivant directement du soleil et la normale à un plan quelconque, l'orientation de la surface est précisée par :

#### II.3.1 Son inclinaison :

L'angle d'inclinaison correspond à l'angle formé par le plan du module solaire par rapport à l'horizontale.

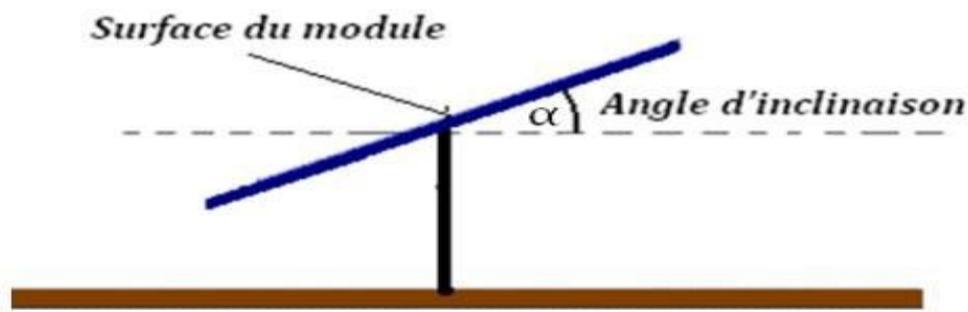


Figure II- 5: Angle d'inclinaison des modules photovoltaïques. [16]

L'évolution de la trajectoire du soleil variant selon les saisons, l'angle d'inclinaison (pour un module photovoltaïque n'étant pas muni d'un système rotatif) est plus réduite en été et plus importante en hiver. L'inclinaison d'un module photovoltaïque par rapport à l'horizontale est donnée par la relation suivante [17] :

$$\alpha = L - \sin^{-1} \left( 0.4 \times \frac{n \times 360}{365} \right) \quad (\text{II-11})$$

Avec :

L : Latitude du lieu.

n : Nombre de jour entre l'équinoxe de printemps (21 mars de chaque année) et le jour considéré.

#### II.3.2 Son azimut :

C'est-à-dire l'angle entre la normale au plan et le plan méridien (compté comme précédemment, positivement vers l'ouest et négativement vers l'est).

## II.4 Caractéristique du rayonnement solaire :

Après son voyage dans l'espace le rayonnement solaire atteint l'atmosphère, une certaine quantité de ce rayonnement est absorbée par l'atmosphère, les nuages et les particules en suspension dans l'atmosphère, une autre partie est réfléchi dans l'espace et une certaine quantité est absorbée par la surface de la terre.

La surface de la terre renvoie aussi une certaine partie sous forme d'un rayonnement de différentes longueurs d'ondes en raison de la température superficielle de la terre. Environ 70% du rayonnement solaire total reste dans la surface de la terre et dans l'atmosphère. La rotation de la terre autour de son axe produit des variations horaires dans l'intensité du rayonnement reçue par un emplacement donné pendant le jour et aboutit même à l'extinction complète pendant la nuit.

En passant par l'atmosphère, le rayonnement solaire est partiellement dispersé dans toutes les directions, partiellement absorbé et partiellement réfléchi, par les gaz atmosphériques, les aérosols et les gouttelettes de nuage.

Le rayonnement dispersé atteignant la surface de la terre constitue ce qu'on appelle le rayonnement diffus. À nouveau, une partie de ce rayonnement diffus revient en arrière dans l'espace, alors qu'une partie atteinte la surface de la terre sous forme d'un rayonnement, direct, diffus et réfléchi, (Figure II-6).

Le rayonnement direct comme son nom l'indique est le rayonnement solaire reçu à n'importe quel point sur terre directement du soleil sans aucune perturbation. Le rayonnement réfléchi est principalement renvoyé par la surface réceptrice, cette composante est plus importante dans des régions saharien. La quantité de rayonnement solaire atteignant n'importe quel point de la surface de la terre dépend de la position de ce point, du moment de l'année, de la diffusion atmosphérique, de la couche des nuages et de la forme et la réflectivité de la surface réceptrice. [16]

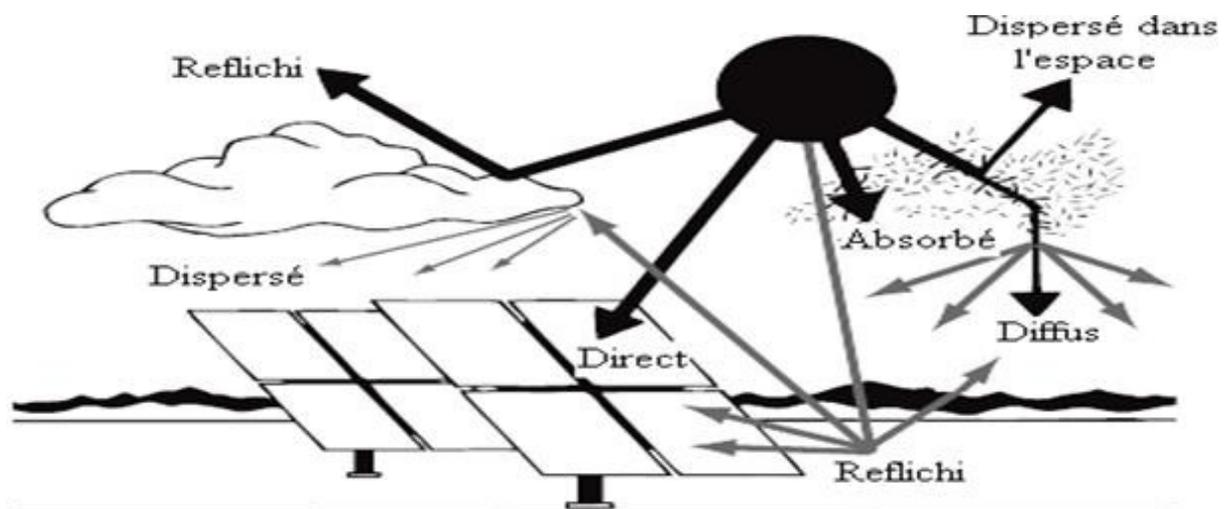


Figure II- 6: Composantes du rayonnement solaire. [17]

### II.4.1 Nature du rayonnement solaire : [18]

L'énergie émise par le soleil nous parvient sous forme de rayonnements électromagnétique propageant à la vitesse de la lumière et dont l'ensemble forme le rayonnement solaire, qui constitue la seule source externe notable d'énergie pour l'atmosphère. La théorie corpusculaire de Max Planck prévoit que tout rayonnement de fréquence ( $\nu$ ) peut être considéré comme un flux de photons dont l'énergie élémentaire ( $E$ ) est directement proportionnelle à cette fréquence

$$E = h \frac{c}{\lambda} \quad (\text{II-12})$$

Où

$h$  : est la constante de Planck.

$c$  : La vitesse de la lumière.

$\lambda$ : La longueur d'onde.

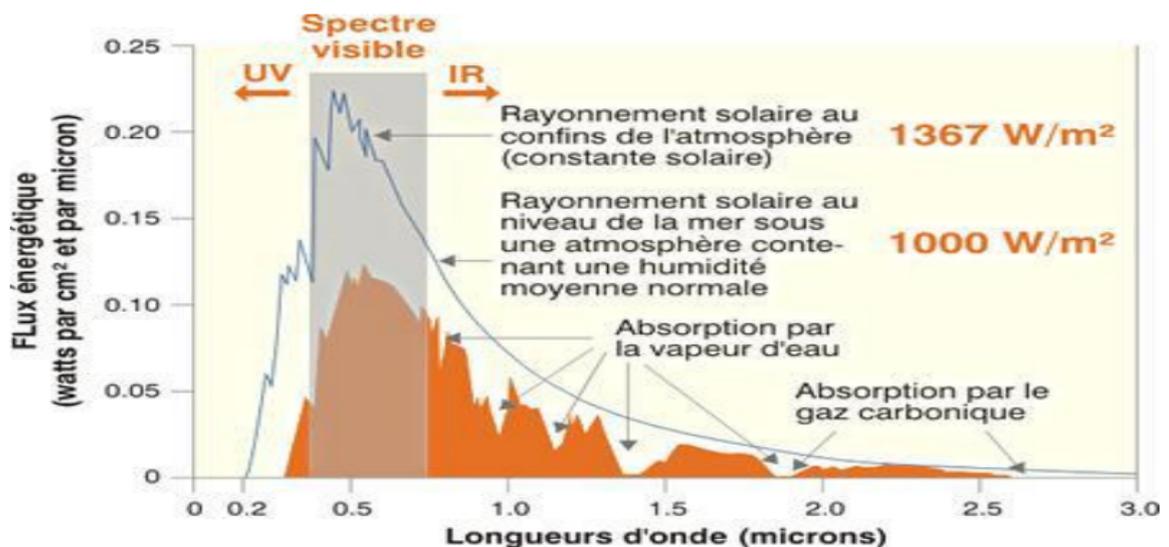


Figure II- 7 :Analyse spectrale du rayonnement solaire. [18]

### I.4.2 Le rayonnement solaire extraterrestre ou hors atmosphère :

Le soleil émet une énergie sous forme d'un rayonnement électromagnétique. Le rayonnement émis par le soleil constitue un spectre allant des ultraviolets à l'infrarouge en passant par le spectre visible où il émet un maximum d'énergie. Le rayonnement solaire parvient à la limite de l'atmosphère terrestre après un trajet dans l'espace d'environ  $D_0 = 150.000.000$  km, effectué en 8 minutes. La quantité de radiation solaire reçue sur une surface normale hors de l'atmosphère terrestre à la distance moyenne  $D_0$  entre la terre et le soleil est appelée constante solaire  $I_0 = 1367 \text{ W/m}^2$ . Ceci est connu sous le nom de « Constante solaire » [15]. Cependant, la distance de la terre au soleil n'est pas constante tout au long de l'année, il en résulte que le rayonnement extraterrestre oscille par un pourcentage de 30%. [17]

### II.4.3 Absorption de rayonnement solaire :

L'absorption du rayonnement solaire est sélective et dépend principalement de quatre éléments qui sont : [20]

**1- Ozone (O<sub>3</sub>) :** Il absorbe des bandes fortes entre 0.2 et 0.3  $\mu\text{m}$ , des bandes faibles de 0.45 à 0.7  $\mu\text{m}$  et deux bandes IR à 10 et 14  $\mu\text{m}$ .

**2- Oxygène (O<sub>2</sub>) :** Il absorbe des bandes étroites du spectre visible (vers 0.69 et 0.76  $\mu\text{m}$ ).

**3- Gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) :** Il absorbe des une partie de l'infrarouge lointain ( $\lambda > 2 \mu\text{m}$ ).

**4- Vapeur d'eau :** qui entraîne des bandes d'absorption multiples surtout dans l'IR.

### II.4.4 Distribution du rayonnement solaire par l'atmosphère :

#### II.4.4.1 Les rayonnements solaire au sol :

Afin de quantifier l'énergie développée par le générateur photovoltaïque dans une application donnée, il est nécessaire de connaître le spectre du rayonnement solaire reçu sur sol. En effet, quatre types de rayonnement ont été répertoriés dans la littérature.[21]

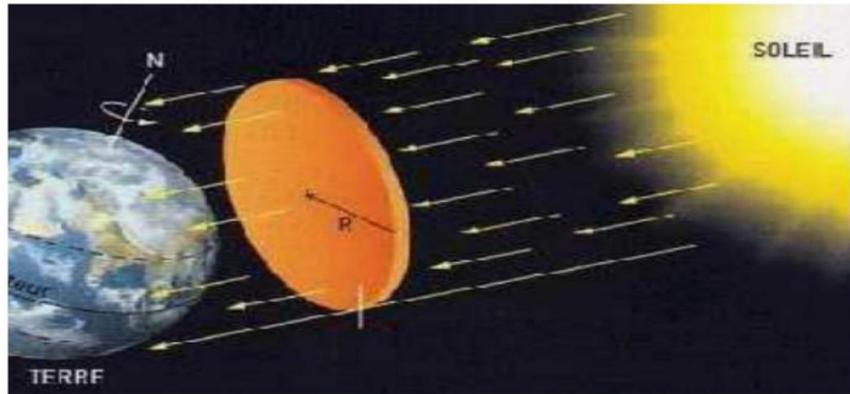


Figure II- 8:Le rayonnement solaire[20]

**A. Le rayonnement direct :**

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

**B. Le rayonnement diffus :**

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

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

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

**D. Le rayonnement global :**

Le rayonnement global est subdivisé en rayonnements directs, diffus et reflété par le sol. Dans la figure ci-dessous figure (II-9) est schématisé l'ensemble des rayonnements solaires sur une surface terrestre.

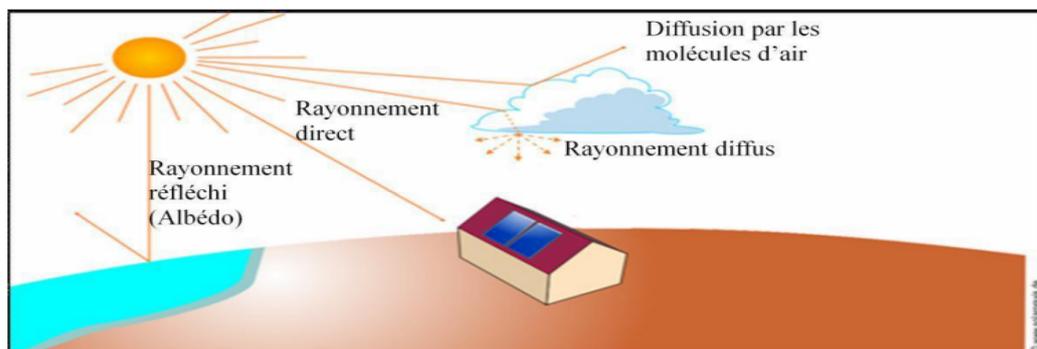


Figure II- 9:Types de rayonnement solaire reçus au sol [15]

L'intensité du rayonnement solaire reçu sur un plan quelconque à un moment donné est appelée irradiation ou éclairement (noté généralement par la lettre  $G$ ), il s'exprime en watts par mètre carré ( $W/m^2$ ). La valeur du rayonnement reçu par la surface du module photovoltaïque varie selon la position de ce dernier. Le rayonnement solaire atteint son intensité maximale. Lorsque le plan du module photovoltaïque est perpendiculaire aux rayons.[20]

Dans la figure (II-10) ci-après est illustré l'effet de l'inclinaison des modules photovoltaïques sur l'intensité de l'éclairement reçu sur leurs surfaces du lever au coucher du soleil. [21]

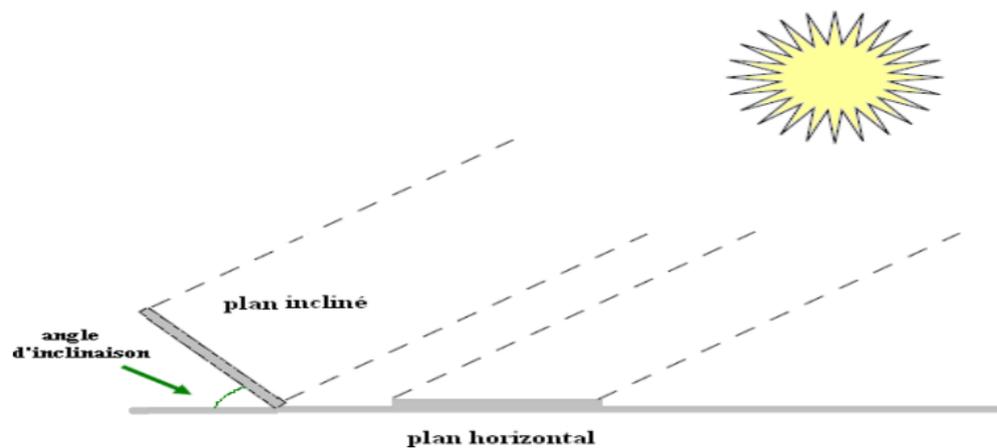


Figure II- 10:Rayonnement solaire capté par un plan horizontal et incliné [21]

## II.5 L'effet photovoltaïque :

L'énergie photovoltaïque résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique aux moyens des cellules généralement à base de silicium cristallin qui reste la filière la plus avancée sur le plan technologiques et industriel, en effet le silicium et l'un des éléments les plus abondants sur terre sous forme de silice non toxique.[22]

### II.5.1 Principe de fonctionnement d'une installation photovoltaïque :

Le principe de fonctionnement d'une installation solaire photovoltaïque est relativement simple : il s'agit de convertir le rayonnement du soleil en électricité. [23]

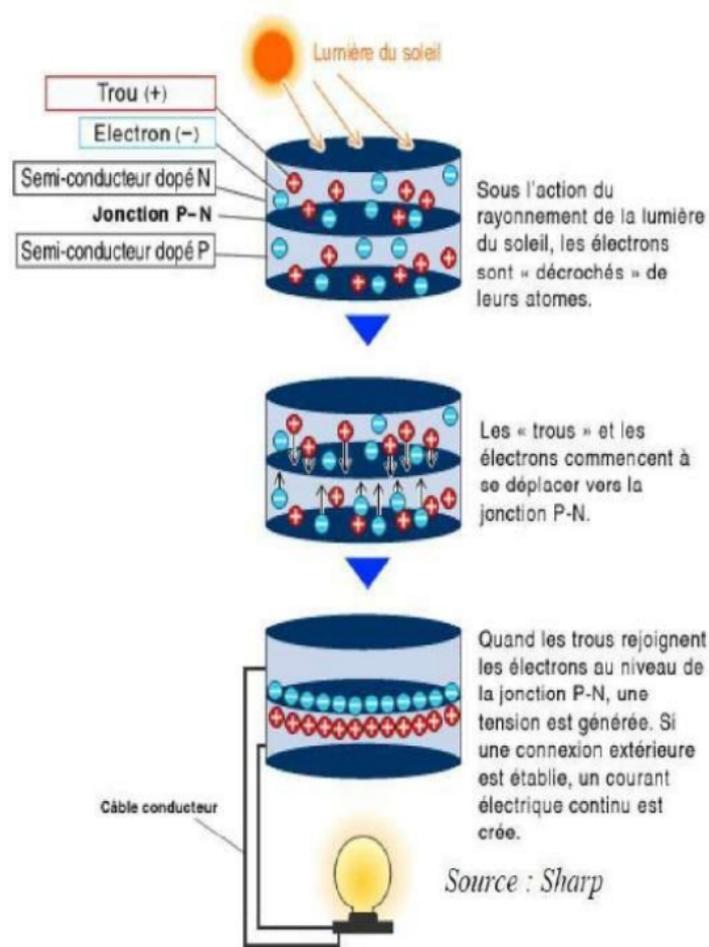


*Figure II- 11: Installation photovoltaïque*

Cette opération repose sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque. Ce mécanisme a été découvert en 1839 par Antoine Becquerel mais il n'a été expliqué que près d'un siècle plus tard par Albert Einstein, ce qui lui a valu le Prix Nobel de physique en 1921. De façon très schématique,

L'effet photovoltaïque se manifeste quand un photon est absorbé dans un matériau composé de semi-conducteurs dopés p (positif) et n (négatif), dénommé comme jonction p-n (ou n-p). Sous l'effet de ce dopage, un champ électrique est présent dans le matériau de manière permanente (comme un aimant possède un champ magnétique permanent).

Quand un photon incident (grain de lumière) interagit avec les électrons du matériau, il cède son énergie à l'électron qui se retrouve libéré de sa bande de valence et subit donc le champ électrique intrinsèque. Sous l'effet de ce champ, l'électron migre vers la face supérieure laissant place à un trou qui migre en direction inverse. Des électrodes placées sur les faces supérieure et inférieure permettent de récolter les électrons et de leur faire réaliser un travail électrique pour rejoindre le trou de la face antérieure. [23]



*Figure II- 12:principe de fonctionnement photovoltaïque.*

Une cellule photovoltaïque est constituée d'un de ces matériaux, généralement du silicium, et conçue de telle façon que les électrons émis soient récupérés pour former un courant électrique. Les cellules sont assemblées pour créer un courant suffisamment élevé pour être exploité, cet assemblage de cellules est appelé module photovoltaïque ou, plus souvent, panneau solaire.

- **Les avantages :**

- Energie électrique non polluante à l'utilisation et s'inscrit dans le principe de développement durable.
- Source d'énergie renouvelable car inépuisable à l'échelle humaine.
- Utilisables dans les pays en voie de développement sans réseau électrique

- Important dans des sites isolés tels qu'en montagne où il n'est pas possible de se raccorder au réseau électrique national.

- **Les inconvénients :**

- Coût du photovoltaïque élevé car il est issu de la haute technologie.
- Coût dépendant de la puissance de crête.
- Le rendement actuel des cellules photovoltaïques reste assez faible (environ 10% pour le grand public) et donc ne délivre qu'une faible puissance.
- Marché très limité mais en développement.
- Production d'électricité ne se fait que le jour alors que la plus forte demande chez les particuliers se fait la nuit.
- Le stockage de l'électricité est quelque chose de très difficile avec les technologies actuelles (coût écologique des batteries très élevé).
- Durée de vie : 20 à 25 ans, après le silicium "cristallisé" rend inutilisable la cellule.
- Pollution à la fabrication : certaines études prétendent que l'énergie utilisée pour la fabrication des cellules n'est jamais rentabilisée durant les 20 années de production. Même en fin de vie, le recyclage des cellules pose des problèmes environnementaux.

### II.5.2 Technologie des cellules photovoltaïques :

Il existe différents types de cellules solaires photovoltaïques, et chaque type de cellules à un rendement et un coût qui lui est propre. Cependant, quel que soit leur type, leur rendement reste assez faible : de 5 à 22% de l'énergie qu'elles reçoivent.

Les cellules solaires peuvent être réparties en trois groupes, selon le matériau de base utilisé :

- cellules monocristallines
- cellules polycristallines
- cellules à couches minces

Le groupe des cellules à couche mince compte les cellules amorphes au silicium et les cellules formées à partir d'autres matériaux, comme le tellure de cadmium (Cd Te), le disélénure de cuivre et d'indium (CIS) ou l'arséniure de gallium (Ga As). Dans la pratique, les cellules en silicium ont fini par s'imposer.

### II.5.2.1 Cellules solaires monocristallines :

Des blocs de silicium sont formés à partir de fonte de silicium ultra-pure. Dans un monocristal, le réseau cristallin complet est agencé de manière uniforme. Le bloc de silicium est découpé en rondelles de 200 à 300 mm d'épaisseur, appelées galettes (en anglais wafers). Pour permettre un usage optimal de la surface du module solaire, les cellules rondes sont découpées en éléments carrés. D'habitude, les cellules présentent une longueur d'arrêtée 152 mm La fabrication est conclue par le dopage, l'application des surfaces de contact et de la couche anti réflexion.

Possédant un rendement variant entre 15 et 18 %, les cellules monocristallines fabriquées industriellement sont les cellules ayant actuellement le rendement le plus élevé. Cependant, leur fabrication requiert plus d'énergie et de temps que celle des cellules polycristallines.

Ces cellules souffrent néanmoins des inconvénients :

- Méthode de production laborieuse et difficile, et donc très chère.
- Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir un cristal pur. - Une durée d'amortissement de l'investissement en énergie élevée (jusqu'à 7 ans).



*Figure II- 13:Cellules solaires monocristallines [24]*

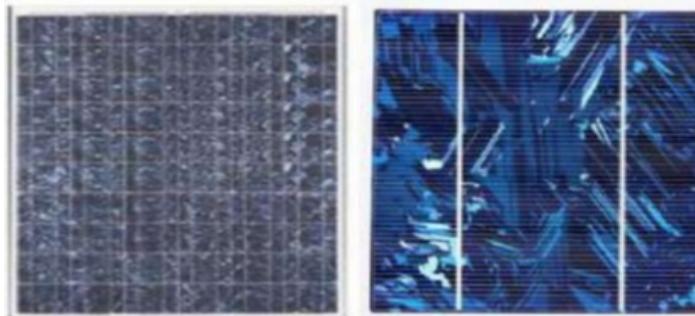
### II.5.2.2 Cellules solaires polycristallines :

Le matériau de base est du silicium ultra-pur qui est porté à fusion. Mais pour la fabrication de cellules solaires polycristallines, on ne cultive pas de monocristaux, mais la fonte de silicium est refroidie de façon contrôlée dans un moule carré.

Pendant le refroidissement, les cristaux s'orientent de manière irrégulière et forment la surface miroitante typique pour les cellules solaires polycristallines. Les blocs de silicium carrés sont découpés en galettes de 200 à 300 mm d'épaisseur. La fabrication est conclue par le dopage, l'application des surfaces de contact et de la couche anti réflexion. La couche anti-réflexion offre à la cellule solaire sa surface bleue typique, car le bleu réfléchit le moins de lumière et en absorbe la plus grosse quantité. Les cellules solaires polycristallines présentent un rendement entre 13 et 16 %.

Les cellules polycristallines sont caractérisées par :

- Coût de production moins élevée.
- Nécessite moins d'énergie.
- Rendement de 13 % et jusqu'à 20 % en labo.



*Figure II- 14: Cellules solaires polycristallines [24]*

### II.5.2.3 Cellules solaires amorphes :

Le terme amorphe vient du grec (a : sans, morphe : forme) et signifie qui n'a pas de forme. En physique, on appelle amorphes les éléments dont les atomes présentent des formes irrégulières. Si les atomes ont une structure ordonnée, on les appelle des cristaux.

Pour la fabrication de cellules solaires amorphes, on applique le silicium sur un matériau support, comme par exemple le verre. L'épaisseur du silicium s'élève alors à environ 0,5 à 2  $\mu\text{m}$  . Ainsi, non seulement la quantité de silicium requise est-elle assez faible, mais le découpage fastidieux des blocs de silicium n'est-il pas nécessaire. Le degré de rendement des cellules solaires amorphes se situe seulement à 6-8 % [24].

• **Les inconvénients :**

- Coût de production bien plus bas.
- Rendement de seulement 5 % par module et 14% au laboratoire.
- Fonctionne sous de très faible éclairement.



*Figure II- 15:Cellules solaires amorphes [24]*

Grâce à la technologie des nouveaux matériaux tel que le tellurure de cadmium(Cd Te),l’arséniure de gallium (Ga As) ainsi que le diséléniure de cuivre et d’indium (CIS) ont permis d’obtenir des photopiles ayant des rendements 38 % au laboratoire[25]

*Tableau II- 2:Rendement des différentes technologies*

Matériau de base	Rendement en %	Surface en m <sup>2</sup>
Cellule monocristalline	15-18	7-9
Cellule polycristalline	13-16	8-9
cellule amorphe	6-8	13-20
Cellule Audiséniure de cuivre et d’indium	10-12	9-11

**II.5.2.4 Les cellules multi-jonctions à haut rendement :**

Aujourd'hui, la plupart des cellules photovoltaïques inorganiques sont constituées d’une simple jonction PN. Dans cette jonction, seuls les photons dont l’énergie est égale ou supérieure à la bande interdite du matériau (notée  $E_g$  en eV) sont capables de créer des paires électron-trou. En d'autres termes, la réponse photovoltaïque d’une cellule simple jonction est limitée à l’énergie du photon. Seule la proportion du spectre solaire dont

l'énergie des photons est supérieure au gap d'absorption du matériau est utile, l'énergie des photons plus faible n'est donc pas utilisable. D'autre part, même si l'énergie des photons est suffisante, la probabilité de rencontrer un électron est faible. Ainsi, la plupart des photons traversent le matériau sans avoir transféré leur énergie. Une première réponse pour limiter les pertes est connue de longue date du point de vue technologique, il suffit d'utiliser des systèmes à plusieurs niveaux, en empilant

des jonctions possédant des gaps décroissants, Figure(II-16). Ainsi il est possible d'exploiter le spectre solaire dans sa quasi-totalité avec des rendements de conversion très importants.



Figure II- 16:Les cellules multi-jonctions [26]

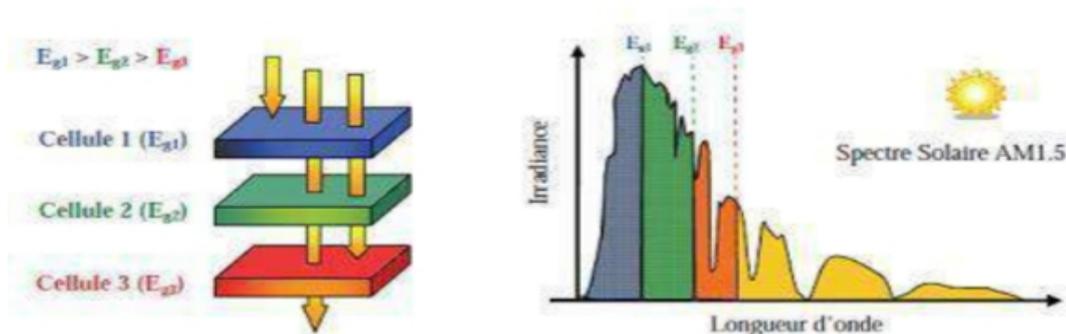


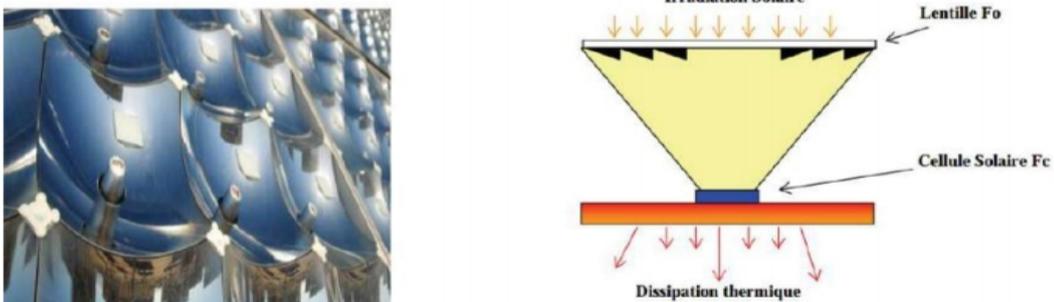
Figure II- 17:Principe de la cellule à multi-jonction

#### II.5.2.5 Autres types de cellules :

Il existe d'autres types de technologies photovoltaïques actuellement commercialisées ou encore à l'étude, les principales étant :

- **Photovoltaïque à concentration :**

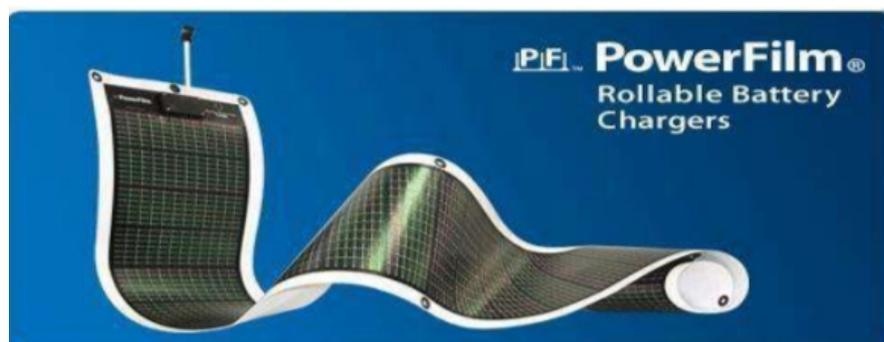
Certaines cellules sont destinées à fonctionner avec des rayons solaires concentrés. Elles sont alors placées à l'intérieur d'un collecteur qui concentre la lumière du soleil sur les cellules au moyen d'une lentille. L'idée est d'utiliser le moins possible de matériau photovoltaïque semi-conducteur, et le plus possible de la lumière du soleil. Leur rendement se situe entre 20 et 30%.



*Figure II- 18:Photovoltaïque à concentration et Schéma de principe d'un concentrateur photovoltaïque [27].*

- **Cellules flexibles :**

Basées sur un processus de production similaire à celui des couches minces, ces cellules sont constituées d'un dépôt de matière active sur un plastique fin, rendant le tout flexible. Cela ouvre la voie à une série d'applications, en particulier pour l'intégration aux bâtiments (toiture) et pour les applications domestiques.



*Figure II- 19:Cellules flexibles [24].*

**II.5.3 Le module photovoltaïque :**

Pour produire plus de puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module figure (II-20). Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. Ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA (éthylène-vinyl- acétate) figure (II-20) et protégé sur la surface avant d'un verre, trempé à haute transmission et de bonne résistance mécanique, et sur surface arrière d'une ou de polyéthylène [28]

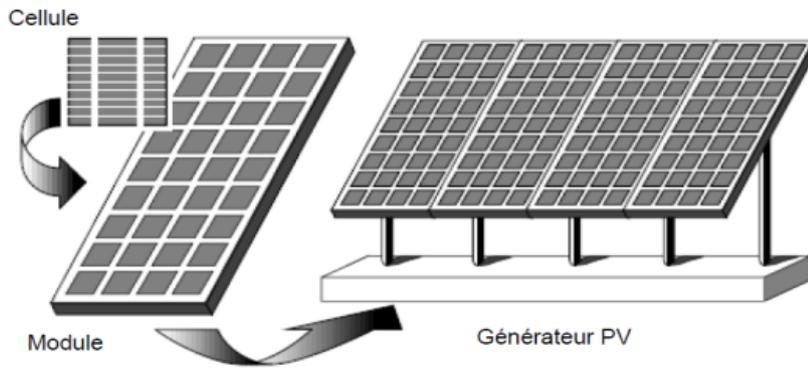


Figure II- 20:Module photovoltaïque.[29]

Actuellement la puissance d'un module est de quelques watts crêtes à quelques dizaines de watts crêtes. Pour obtenir des puissances supérieures, il est nécessaire d'associer en série- parallèle des modules Figure (II-21) pour avoir un générateur PV.[30]

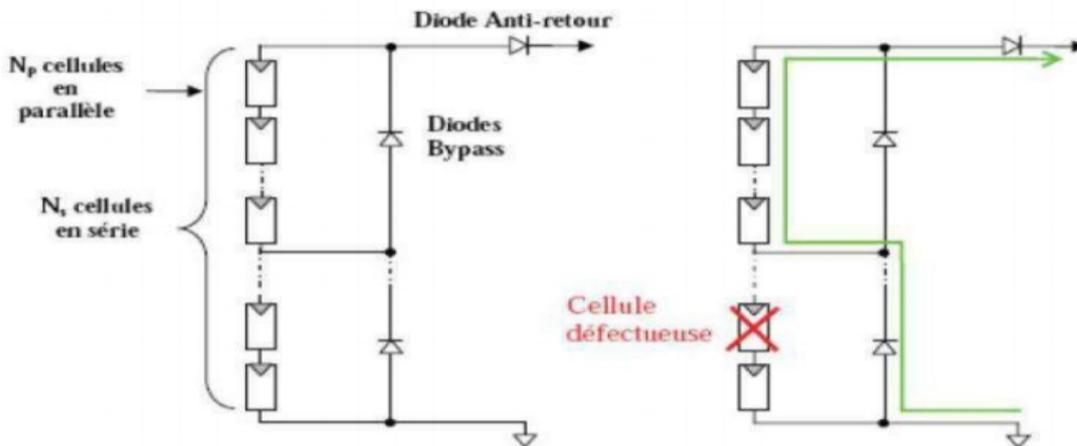


Figure II- 21:Schéma synoptique d'un générateur PV.[31]

Pour des déséquilibres importants dus à l'occultation d'une ou plusieurs cellules, les modules peuvent être amenés à travailler en récepteur. Pour remédier à ces problèmes, des diodes peuvent être placées en parallèle et en série avec les modules.[32]

#### **A. Les diodes en série :**

Pour empêcher la batterie de se décharger la nuit dans les cellules PV ou pour empêcher une série de modules contenant un module défaillant ou masqué de devenir réceptrice du courant fourni par les autres séries, qui ont alors une tension plus élevée qu'elle, une diode est intégrée dans chaque série. On l'appelle aussi diode anti-retour et elle est située en série avec les modules.[33]

#### **B. Les diodes en parallèle :**

Au sein d'une série un module qui ne peut plus produire d'énergie (masqué, défaillance), doit être protégé pour ne pas devenir récepteur et s'endommager irrémédiablement ; des diodes sont donc placées en parallèle sur chacun des modules du générateur. Elles permettent de dévier le courant produit par les autres modules de la série et sont placées en parallèle avec les modules. [34].

#### **II.5.3.1 Caractéristiques d'un module PV :**

- La puissance de crête,  $P_c$  : Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards ( $25^\circ\text{C}$  et un éclairement de  $1000 \text{ W/m}^2$ ).
- La caractéristique  $I/V$  : Courbe représentant le courant  $I$  débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.[35]
- Courant de court-circuit,  $I_{cc}$  : Courant débité par un module en court-circuit pour un éclairement " plein soleil ".
- Point de fonctionnement optimum,  $(U_m, I_m)$  : Lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil,  $P_m = U_m * I_m$ .
- Rendement : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.

- Facteur de forme : Rapport entre la puissance optimale  $P_m$  et la puissance maximale que peut avoir la cellule :  $V_{OC} * I_{cc}$ .

### II.5.3.2 Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque :

#### A. Caractéristique courant – tension (I-V) d'une cellule photovoltaïque :

Comme nous le voyons sur la figure (II-22), la cellule solaire PV est caractérisée par la courbe ( non linéaire qui dépend particulièrement des conditions d'ensoleillement et de température. Cette courbe nous informe sur trois points importants :

- Le point de fonctionnement optimal PPM (la puissance maximale de la cellule).
- Le point du courant maximal ( $I_{SC}$ ) Il se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées. Il est appelé courant de court-circuit ( $I_{SC}$ )
- Le pont de la tension maximale de la cellule ( $V_{ov}$ ) , (environ 0.6 V) pour un courant nul. Cette tension est nommée de circuit ouvert ( $V_{oc}$ ). [36]

#### B. Caractéristique puissance-tension (P-V) :

La puissance crête d'une cellule PV, notée  $W_c$  (Watt crête) ou  $W_p$  (Watt peak) représente la puissance électrique maximum délivrée dans les conditions suivantes dites conditions standard : [18]

- éclairement solaire de  $1 \text{ kW} / \text{m}^2$  .
- température de la cellule PV égale à  $+ 25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

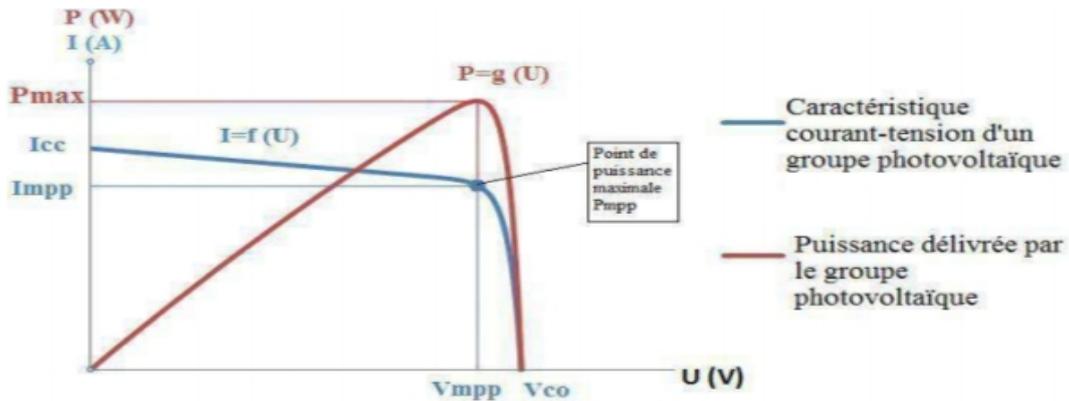


Figure II- 22:Caractéristique puissance-tension

**II.5.4 Application des systèmes photovoltaïques :**

**II.5.4.1 Electrification hybride (photovoltaïque-éolienne) :**

Ce système hybride de production d'énergie électrique est celui qui combine et exploite deux sources d'énergies renouvelables (photovoltaïque, éolienne) pour la production de l'énergie, comme représenter sur la figure (II-23)

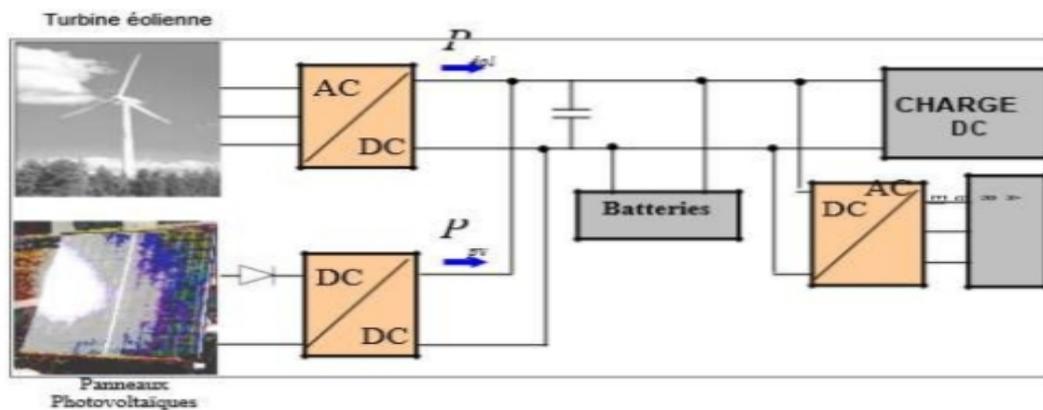


Figure II- 23:Structure de la chaîne hybride (éolienne, photovoltaïque).

Le système hybride comprend, un sous-système photovoltaïque avec un convertisseur DC/DC qui permet de rattraper à chaque fois le point de puissance maximale. Une turbine éolienne qui assure la conversion de l'énergie du vent en électricité. Les deux sources

d'énergie sont reliées à un bus continu. Le stockage est assuré par des batteries. La charge à alimenter peut-être continu ou alternative branchée à travers un onduleur.

#### II.5.4.2 Le pompage photovoltaïque :

Pour être ramenées en surface, les eaux souterraines ont besoin d'être pompées. Par conséquent, la nécessité d'une pompe et donc d'une source fiable d'énergie comme le photovoltaïque s'impose.

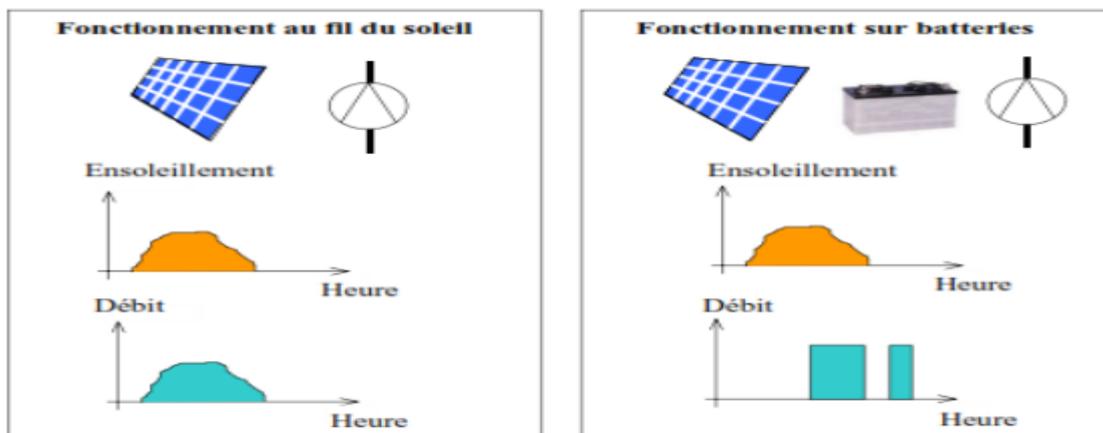


Figure II- 24:Caractéristiques du débit pour le pompage au fil du soleil et avec batterie

##### A. Le pompage au fil du soleil :

Le stockage se fait de manière hydraulique, l'eau étant pompée, lorsqu'il y a suffisamment d'insolation, dans un réservoir au-dessus du sol.

-Elle est ensuite distribuée par gravité au besoin.

- Permet d'avoir un système photovoltaïque plus simple, plus fiable. - Moins coûteux qu'un système avec batterie.

##### B. Le pompage avec batterie :

permet de s'affranchir des aléas du soleil et des problèmes d'adaptation entre générateur photovoltaïque et motopompe.

- Le débit de pompage peut se faire à la demande, lorsque les utilisateurs en ont besoin, ou permettre un pompage régulier durant toute la journée.

- L'utilisation d'un réservoir de stockage pour l'eau sera nécessaire afin de pouvoir fournir à la demande d'eau.
- L'utilisation de batteries comporte davantage de composants qui influent sur la fiabilité et le coût global du système.

### **C. Le chauffe-eau solaire :**

Produire de l'eau chaude, chaque jour, grâce à l'action de la lumière du soleil et la stocker pour la journée et la nuit dans un réservoir étanche et isolé (le ballon), c'est le principe fondamental du chauffe-eau solaire. Pour cela on utilise des panneaux sur lesquels, la source primaire d'énergie, le soleil, va rayonner et faire élever la température du liquide qui circule dans ce qu'on appelle, l'absorbeur. Lorsque le fluide est plus chaud que l'eau stockée dans le ballon, le fluide va se mettre à circuler et ainsi transmettre l'énergie emmagasinée.

### **D. La climatisation solaire :**

La climatisation solaire désigne l'ensemble des moyens de production de froid en utilisant comme ressource énergétique primaire l'énergie solaire afin de refroidir un bâtiment. La climatisation s'effectue soit en récupérant l'énergie électrique produite par les panneaux photovoltaïques soit la chaleur solaire récupérée grâce à des capteurs solaires thermiques.

### **E. Dessalement de l'eau de mer :**

Une des solutions pour pallier le manque d'eau potable sont les stations de dessalement. C'est un processus qui permet de supprimer le sel de l'eau salée ou saumâtre pour le rendre potable.

### **II.5.5 Installation photovoltaïque raccordée au réseau :**

Un système photovoltaïque connecté au réseau, est un système raccordé directement au réseau électrique à l'aide de convertisseurs. Ce type de système offre beaucoup de facilités pour le (producteur/consommateur) puisque c'est le réseau qui se charge du maintien de l'équilibre entre la production et la consommation d'électricité.

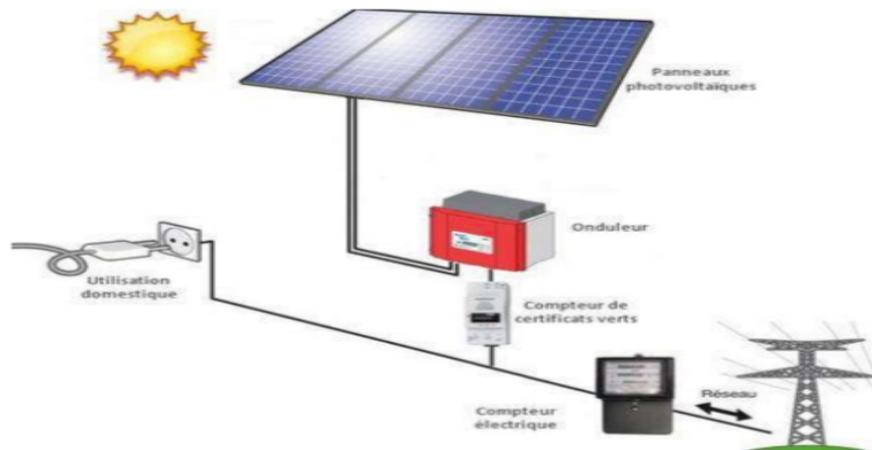


Figure II- 25:représente un système PV connecté au réseau électrique

### II.5.5.1 Classification des centrales photovoltaïques connectées au réseau :

Une première classification des (CPCR) en fonction de leur taille peut être faite de la manière suivante :[37]

#### A. Centrales de petite taille ( $P_w=1$ à $10$ KW) :

Pour des applications sur les toits de maisons individuelles ou d'institutions publiques telles que les écoles, parkings, ... Elles se connectent au réseau basse tension.

#### B. Centrales de taille moyenne ( $P_w=10$ à $100$ KW) :

Ce type de système peut se trouver installé et intégré sur un édifice, sur un toit ou une façade. Il peut être connecté à la basse ou à la moyenne tension du réseau de distribution électrique selon sa taille.

#### C. Centrales de grande taille ( $P_w500$ KW) :

Ce sont des systèmes centralisés et sont des propriétés de compagnies d'électricité. On peut également classer ces systèmes selon qu'ils soient munis de batteries de stockage ou non.

### II.5.5.2 Composition d'un système photovoltaïque raccordé réseau :

Un système PV est un ensemble complet d'équipements PV pour transformer la lumière du soleil en électricité, généralement il se compose de cinq éléments principaux : le générateur PV, la batterie, le régulateur, le convertisseur et la charge.

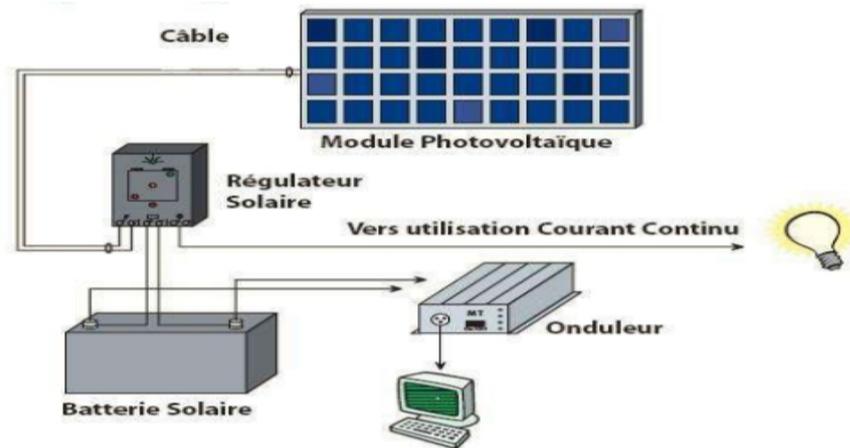


Figure II- 26: Les constituants d'un système PV.

#### A. Le panneau PV :

L'ensemble de cellules photovoltaïques reliées entre elles constitue le module ou le panneau PV, ce dernier est chargé de capter les rayons solaires et les convertir en électricité.

#### B. La batterie solaire :

Elle est chargée de stocker le courant produit par le panneau pour assurer l'autonomie du système, sa durée de vie est définie par nombre de cycle (charge-décharge), elle se caractérise par :

- Ampérage en Ampère heure (Ah).
- Voltage en Volt.

#### C. Le régulateur (contrôleur de charge) :

Les régulateurs sont mis en place dans le souci d'assurer une longévité de système de stockage, donc de minimiser le coût d'installation. En effet, un régulateur est chargé de :

- Contrôler la surcharge et la décharge de la batterie.
- Assurer l'optimisation du système du point de vue énergétique où il constitue un nœud de transfert d'énergie entre le module, le stockage et l'utilisation.

Pour fonctionner, un régulateur a besoin d'un indicateur qui l'informe sur l'état de charge des batteries. Il doit maintenir l'état de charge des batteries entre deux seuils : un seuil haut et un autre bas. Le choix des seuils dépend des caractéristiques des batteries et des conditions d'utilisation. Un régulateur est défini par : Ampérage en Ampère et Voltage en Volt. [38]

#### **D. Le convertisseur d'énergie (onduleur) :**

Il est chargé de convertir le courant continu développé par le solaire, vers un courant alternatif, et de voltage de branchement (12 V, 24 V...48V) vers 220 V, il est défini par : le voltage de branchement en volt et la puissance nominale à développer en watt.

#### **E. La charge :**

Elle représente l'ensemble des fonctions assurées par divers appareils reliés au système photovoltaïque. Vu les contraintes sur le rendement énergétique des systèmes photovoltaïque, il est importé de définir les critères sur lesquels s'appuiera un choix des charges à utiliser : charge continue ou alternative.

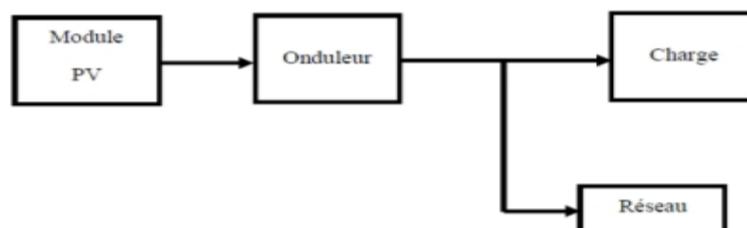
### **II.5.5.3 Installations autonomes :**

Selon le besoin, les systèmes autonomes alimentent un ou plusieurs consommateurs situés dans des zones isolées du réseau électrique. Ils sont indépendants du réseau et dépendent uniquement de l'énergie solaire pour répondre à la demande d'électricité.

Les systèmes PV autonomes sont installés là où ils constituent la source d'énergie électrique la plus économique. On peut classer ces systèmes en deux catégories :

#### **A. Systèmes avec accumulateurs :**

L'excédent de l'énergie produite est stocké dans des batteries. Le schéma synoptique de la figure suivante décrit ce système.



*Figure II- 27: Système photovoltaïque directement relié au réseau.*

L'absence des batteries est un point positif, car celle-ci augmente le coût de système photovoltaïque. En plus elle doit être entretenue et changée après quelques années.

### B. Systèmes photovoltaïques relié au réseau avec batterie :

Le système peut fournir de l'énergie au réseau et prélever l'énergie d'appoint nécessaire au réseau. Le schéma d'un système PV relié au réseau avec batterie est le suivant.

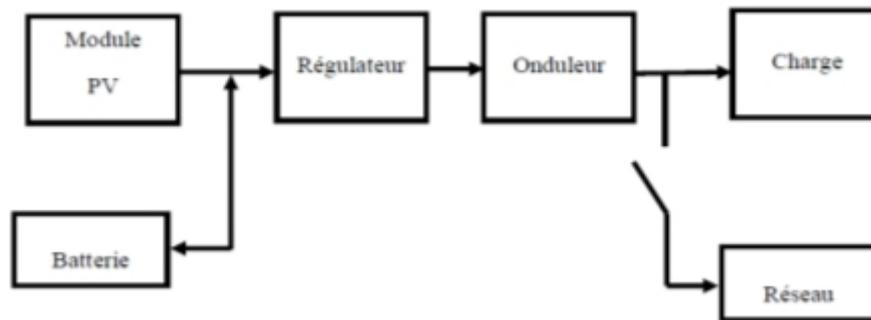


Figure II- 28: Système photovoltaïque relié au réseau avec batterie.

L'énergie est fournie par le module PV à la charge, l'excédent est stocké dans les batteries, dans le cas de décharge ou de surcharge de la batterie, on utilisera le réseau pour prélever ou délivrer l'énergie. [39].

### II.5.6 Options de consommation de l'énergie photovoltaïque :

#### II.5.6.1 Exportation vers le réseau :

Une partie de la production est injectée au réseau lorsque la production dépasse la consommation, le client soutire aussi du réseau le manque. Cette installation est équipée de deux compteurs, l'un mesurant l'énergie soutirée du réseau lorsque la consommation excède la production (compteur de consommation), l'autre mesurant l'énergie injectée dans le réseau (compteur d'injection). Ce principe exclut le compteur réversible comme est indiqué sur la figure (II.29).

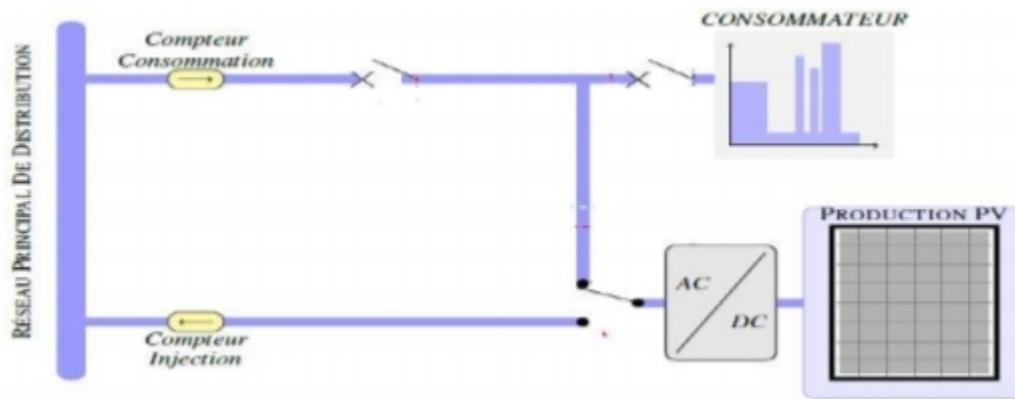


Figure II- 29:Schéma de principe de la configuration d'injection du surplus d'énergie.

### II.5.6.2 Installation PV raccordée au réseau avec injection totale de l'énergie produite :

Le générateur de production d'origine photovoltaïque est raccordé au réseau par l'intermédiaire d'un point de livraison distinct du point de livraison utilisé pour les besoins de soutirage du producteur. Comparé à l'achat des excédents, ce type de raccordement conduit le plus souvent à des modifications plus importantes de l'installation par le gestionnaire du réseau. Le producteur injecte au réseau la totalité d'énergie produite et soutire du réseau la totalité d'énergie nécessaire à sa consommation. La séparation entre les deux points de livraison consommation et injection (production) conduit donc à étoiler le branchement en deux parties, Avec cependant une seule liaison au réseau BT. Le branchement production comporte deux compteurs montés en tête bêche (production et consommation des dispositifs de la chaîne PV), voir figure (II.30).

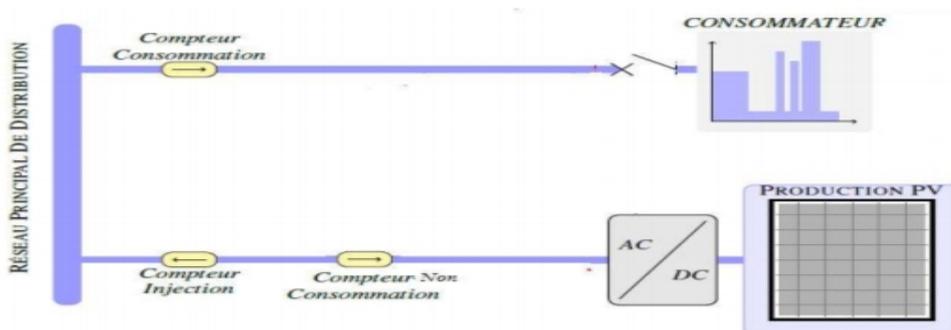


Figure II- 30:Schéma de principe de la configuration d'injection totale d'énergie.

**II.5.6.3 L'autoconsommation :**

Consommation locale de l'électricité photovoltaïque produite d'un point de vue physique, l'autoconsommation ne présente aucune différence avec la revente totale. Les centrales sont dans les deux cas raccordés au réseau public et l'électricité prend toujours le chemin le plus court. L'autoconsommation existe uniquement à travers le point de raccordement de cette centrale et son positionnement par rapport aux compteurs. Dans le cadre de l'autoconsommation, la centrale est raccordée sur le réseau côté propriétaire, donc en aval du compteur de consommation. La production est donc assimilée à une charge négative et vient diminuer la demande de puissance au réseau public. En ce sens cette technique permet alors de diminuer la consommation en provenance du réseau public et donc les factures associées. [40]

**II.6 Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons présenté quelques notions sur l'énergie solaire et le principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique par la cellule photovoltaïque, les principales caractéristiques et les technologiques des éléments constitutifs d'un générateur PV, ainsi que les différentes configurations des systèmes photovoltaïques et leurs applications et leurs composants.



**Chapitre III :Généralités sur les pompes**

### III.1 Introduction

Les pompes sont des moteurs électriques, les machines le plus banalement utilisées aussi bien sur le plan industriel que dans le domaine domestique. Dans la plupart des cas, il s'agit de pompes de construction courante pour lesquelles l'utilisateur peut trouver les renseignements et les indications concernant ce matériel dans les catalogues de constructeurs .

Cependant l'utilisation doit avoir une connaissance générale du fonctionnement des pompes afin d'effectuer le bon choix de la machine.

Il faut surtout éviter le gaspillage d'énergie qui dû à l'utilisation des pompes mal adaptées aux installations [41].

### III.2 Définition d'une pompe :

Une pompe est une machine hydraulique qui aspire et refoule un liquide (l'eau, l'huile, l'essence, les liquides alimentaires, etc....) D'un point bas à un endroit plus haut [42].

La pompe est destinée à élever la charge du liquide pompé. La charge ou l'énergie est la somme de trois catégories d'énergie :

- Energie cinétique.
- Energie potentielle.
- Energie de pression.

C'est donc un appareil génère une différence de pression entre l'entrée et la sortie de la machine. L'énergie requise pour faire fonctionner une pompe dépend :

- Des propriétés du fluide : la masse volumique, la viscosité dynamique,
- Des caractéristiques de l'écoulement : la pression, la vitesse, le débit volume, la hauteur,
- Des caractéristiques de l'installation : la longueur des conduites, le diamètre et la rugosité absolue [42].

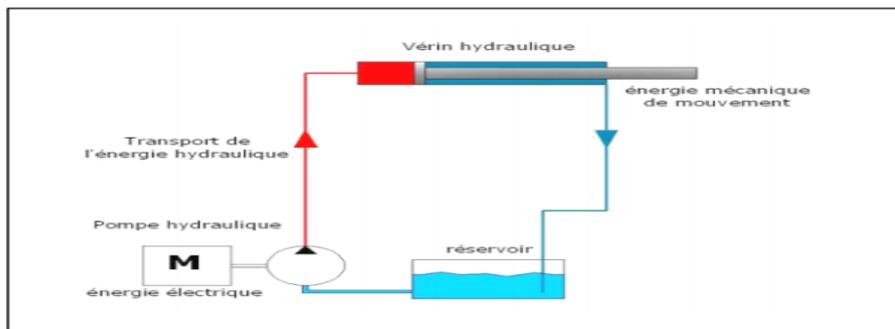


Figure III- 1:schéma d'une pompe hydraulique

### III.3 Classification des pompes :

Suivant les modes des déplacements des liquides à l'intérieur des pompes, on classe ces dernières en deux grandes familles :

- Les turbopompes.
- les pompes volumétriques.

L'utilisation d'un type de pompes ou d'un autre dépend des conditions d'écoulement du fluide. De manière générale, si on veut augmenter la pression d'un fluide on utilisera plutôt les pompes volumétriques, tandis que si on veut augmenter le débit on utilisera plutôt les pompes centrifuges.

Dans les turbopompes une roue, munie d'aubes ou d'ailettes, animée d'un mouvement de rotation, fournit au fluide de l'énergie cinétique dont une partie est transformée en pression, par réduction de vitesse dans un organe appelé récupérateur . Dans les pompes volumétriques, l'énergie est fournie par les variations successives d'un volume raccordé alternativement à l'orifice d'aspiration et à l'orifice de refoulement (grand encombrement) [43].



Figure III- 2:Pompe centrifuge



Figure III- 3:Pompe volumétrique à disque excentré

### III.4 Fonctionnement d'une pompe :

Le fonctionnement d'une pompe consiste à produire une différence de pression entre la région d'aspiration et la région de refoulement au moyen de l'organe actif (piston, roue,...etc.) de la pompe. Du point de vue physique, la pompe transforme l'énergie mécanique de son moteur d'entraînement en énergie hydraulique [44].

### III.4.1 Pompe volumétrique :

Une pompe volumétrique se compose d'un corps de pompe parfaitement clos à l'intérieur duquel se déplace un élément mobile rigoureusement ajusté. Ce déplacement est cyclique. Pendant un cycle, un volume de liquide pénètre dans un compartiment avant d'être refoulé. Une pompe volumétrique est constituée :

- d'un corps fixe ou stator.
- D'un ou de plusieurs éléments mobile participant au déplacement de fluide à l'intérieur de la pompe.
- D'autres éléments mobiles destiné à mettre en mouvement les éléments précédents.

Pour ce type de pompe l'entrée et la sortie sont non communicantes grâce à une étanchéité Interne, ainsi les fluides seront minime et les pressions importantes.

Une pompe volumétrique fonctionne en prélèvement en un volume  $V_0$  du fluide contenu dans la conduite d'arrivée pour l'emprisonner dans un espace avant de le pousser vers la sortie de pression. la dépression que se prélèvement provoque fait que le fluide se mettre en mouvement vers la pompe et fait de la pompe volumétrique une pompe auto-amorçant[44]

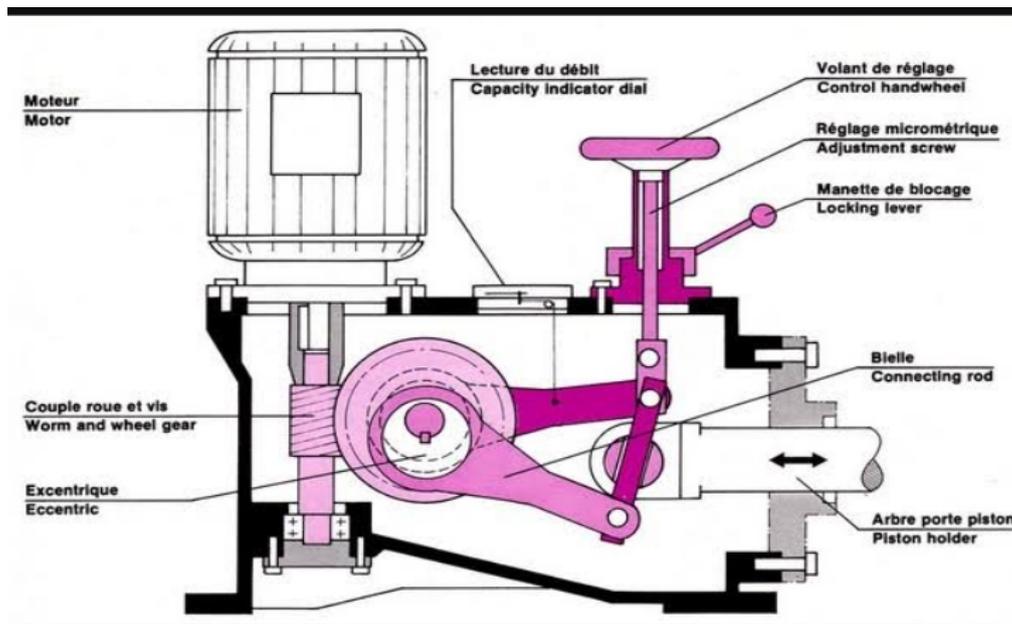


Figure III- 4: Fonctionnement de pompe volumétrique

### III.4.2 Turbopompe

On peut décomposer le fonctionnement en deux étapes :

#### A. L'aspiration :

Le liquide est aspiré au centre du rotor par une ouverture appelée distributeur dont le rôle est de conduire le fluide depuis la conduite d'aspiration jusqu'à la section d'entrée du rotor.

La pompe étant amorcée, c'est à dire pleine de liquide, la vitesse du fluide qui entre dans la roue augmente et par conséquent la pression dans l'ouïe diminue et engendre ainsi une aspiration et maintient l'amorçage [43].

#### B. L'accélération :

Le rotor transforme l'énergie mécanique appliquée à l'arbre de la machine en énergie cinétique. A la sortie du rotor, le fluide se trouve projeté dans la volute dont le but est de collecter le fluide et de le ramener dans la section de sortie. La section offerte au liquide étant de plus en plus grande, son énergie cinétique se transforme en énergie de pression [43].

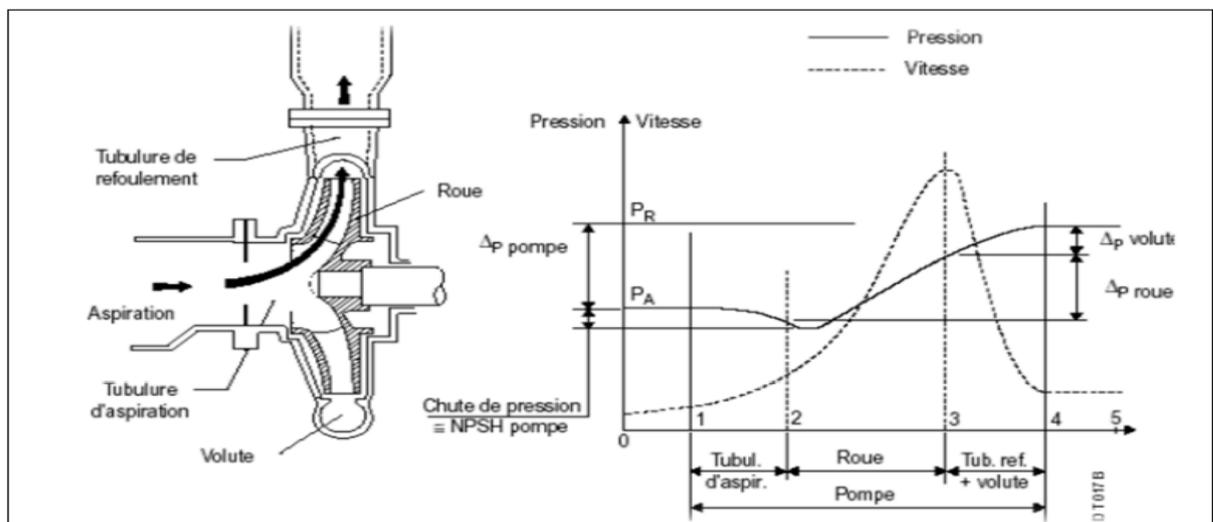


Figure III- 5:schéma évolution de la vitesse et de la pression dans la pompe

### III.5 Les caractéristiques d'une pompe :

Les constructeurs fournissent les caractéristiques des pompes en fonction du débit (souvent en  $m^3/h$ ) pour des conditions données (nature du liquide, vitesse du moteur pour une pompe centrifuge ou fréquence et course du piston pour une pompe à membrane). Une caractéristique de pompe dépend uniquement de la construction de la pompe. Les caractéristiques fournis sont la hauteur manométrique totale, la puissance consommée par le moteur (kW), le rendement et le N.P.S.H.req. La hauteur manométrique (Hmt) permet le choix de la pompe pour une courbe de réseau imposée.

Le N.P.S.H.req permet en fonction des caractéristiques du circuit d'aspiration de connaître la valeur limite de débit avec laquelle la pompe peut fonctionner sans risque de cavitation. Le rendement renseigne sur la zone de débit où le rendement est plus élevé : ainsi, il peut être économiquement avantageux de se placer à un débit plus faible (si bien sûr celui-ci n'est pas imposé par le procédé) en augmentant artificiellement la perte de charge sur le circuit de refoulement (utilisation d'une vanne de réglage). La puissance consommée pour un débit donné permet de connaître le coût de fonctionnement de la pompe [45].

#### III .5.1 Les courbes caractéristiques de la pompe :

Une pompe est toujours fournie par le constructeur avec une série de courbes caractéristiques pour une vitesse de rotation donnée. On cite:

- Courbe caractéristique : **Hauteur - Débit.**
- Courbe caractéristique : **Rendement, Puissance - Débit.**
- Courbe caractéristique : **NPSH – Débit [46].**

##### A. Courbe caractéristique hauteur – débit :

L'énergie que fournit la pompe au liquide se présente sous deux formes :

de l'énergie de pression, correspondant à l'augmentation de pression dans la pompe.

de l'énergie cinétique, correspondant à l'augmentation de vitesse du liquide entre l'aspiration et le refoulement.

La courbe représentant la variation de hauteur en fonction du débit s'appelle la caractéristique "hauteur d'élévation"  $H(Q)$  de la pompe. Pour chaque pompe, une courbe

est fournie par le constructeur. Elle a été établie par un essai de la pompe sur un banc d'essai.

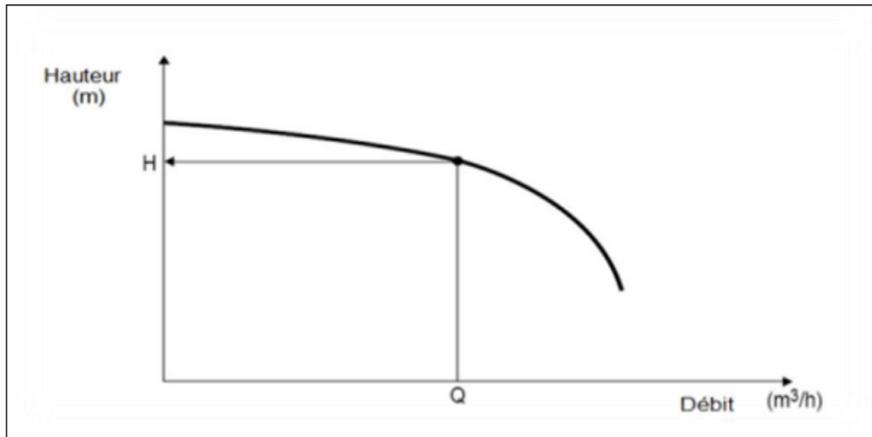


Figure III- 6: Courbe caractéristique hauteur en fonction du débit

**B. Courbe caractéristique : rendement, puissance-débit**

Le rendement de la pompe est le rapport entre la puissance hydraulique (reçue par le liquide) et la puissance mécanique fournie à la pompe. Ce rendement varie en fonction du débit. Il est représenté par une courbe fournie par le constructeur de la pompe. Le rendement permet de déterminer la puissance sur l'arbre connaissant la puissance hydraulique. La puissance sur l'arbre est une caractéristique de la pompe permettant de déterminer le moteur d'entraînement.

Le meilleur rendement de la pompe détermine le débit nominal pour lequel correspondent la hauteur nominale et la puissance nominale.

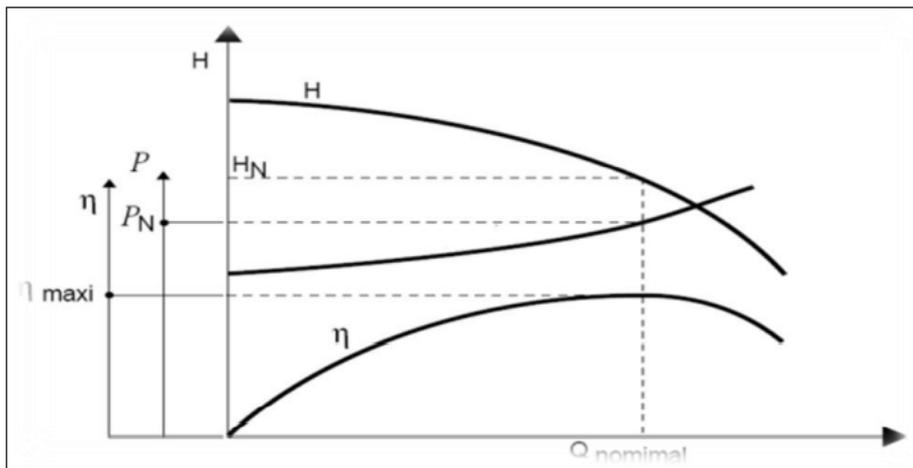


Figure III- 7: Courbes caractéristiques : rendement et puissance en fonction de débit

### C. Courbe caractéristique : NPSH-Débit :

Le **NPSH** est la hauteur totale de charge à l'entrée de la pompe.

**NPSH**: (net positive section head), abbreviation anglaise.

Le **NPSH** est défini comme étant la charge minimale requise à l'entrée de la bride d'aspiration pour assurer le fonctionnement correct de la pompe; il s'agit du **NPSH requis**. L'installation devra mettre à la disposition de la pompe au niveau de la bride d'aspiration, une charge au moins égale à celle requise ; il s'agit du **NPSH disponible** [46].

$$\text{NPSH}_{\text{disp}} > \text{NPSH}_{\text{requis}}$$

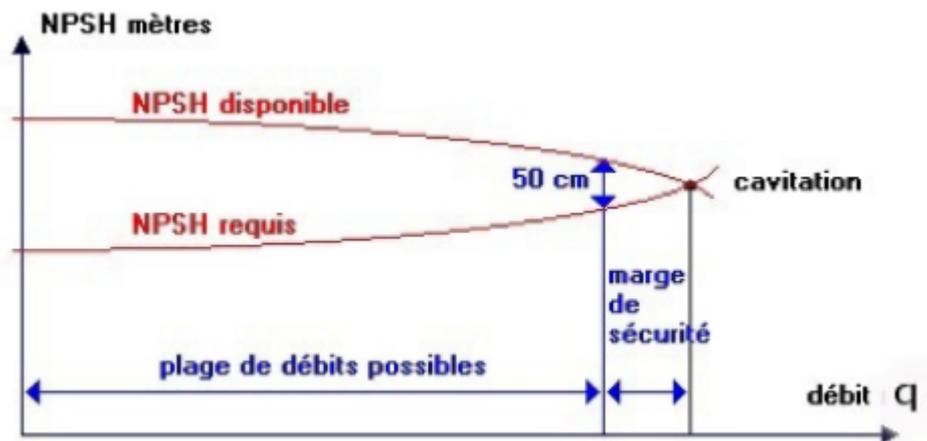


Figure III- 8: Courbes caractéristiques de NPSH en fonction de débit

### III.5.2 Sécurité de la pompe

Le rôle de la sécurité s'accomplit d'une manière très intéressante en évitant la présence des accidents et l'endommagement du matériel et des équipements. La sécurité de la pompe doit être établie suivant deux périodes :

- Avant de mettre la pompe en marche.
- Pendant la période de fonctionnement de la pompe [46].

#### A. Sécurité avant de mettre la pompe en marche

Avant de mettre la pompe en marche il faut :

- Vérifier les dispositifs, leur fixation et système de lubrification.

- Remplir la pompe par la brute.
- Fermer la vanne de refoulement et ouvrir celle d'aspiration.
- Au moment de démontage de la pompe quand la vanne d'aspiration, il est recommandé de laisser la vanne d'aspiration ouverte tout le temps de réparation, il est aussi suggéré

d'utiliser un dispositif empêchant le démarrage de la pompe quand la vanne d'aspiration est fermée.

- Vérifier l'état des conduites d'aspiration et de refoulement pendant et avant le démarrage de la pompe [46]

### **B. Sécurité de la pompe pendant le fonctionnement**

Pendant la mise en marche de la pompe, il faut :

- Consulter les appareils de contrôle.
- Surveiller les dispositifs la lubrification de la partie d'entraînement
- Eviter les fuites de brute du côté des couvertures tubulure garniture.
- Contrôler les vibrations de l'ensemble pompe moteur à l'aide d'indicateur.
- Pour la sécurité et la condition de production il faut instituer une pompe en réserve lors d'une panne de la pompe en service [46].

### **III.5.3 les fluides :**

Les fluides sont des corps dont les molécules sont très mobiles les unes par rapport aux autres, un fluide prend automatiquement la forme du récipient qui le contient, on peut classer les fluides en deux groupes : des liquides et des gaz, les liquides ont un volume propre alors que les gaz occupent tout le volume qui leur est offert.

Un fluide est dit incompressible lorsque le volume occupé par une masse donnée ne varie pas en fonction de la pression extérieure. Les liquides peuvent être considérés comme des fluides incompressibles (eau, huile, etc.).

Un fluide est dit compressible lorsque le volume occupé par une masse donnée varie en fonction de la pression extérieure. Les gaz sont des fluides compressibles. Par exemple,

l'air, l'hydrogène, le méthane à l'état gazeux, sont considérés comme des fluides compressibles [47].

### III.6 Différentes architectures envisageables des systèmes de pompage

#### III.6.1 Pompage avec réseau électrique

L'eau dans son usage domestique suit un cycle d'utilisation qui peut se résumer en 4 étapes :

- Extraction de l'eau,
- Traitement de l'eau,
- Utilisation domestique de l'eau,
- .-Epuraton et rejet de l'eau traitée.

Cette eau est généralement mobilisée grâce à des motopompes alimentées par le réseau électrique. Le dimensionnement du groupe de pompage dépend du réseau à alimenter. Un exemple d'une station de pompage se composant d'un total de 3 pompes en parallèle permet alors le relèvement de l'eau depuis le réservoir intermédiaire vers le réservoir de tête [48].



*Figure III- 9:Station de pompage alimentée par le réseau électrique*

#### III.6.2 Pompage photovoltaïque

Le pompage de l'eau est l'une des applications les plus courantes utilisant de l'énergie solaire pour l'irrigation ou l'alimentation en eau potable. La performance du pompage photovoltaïque dépend des caractéristiques du site (ensoleillement, température, obstacles

géographiques), du rendement des modules photovoltaïque, mais aussi des caractéristiques des autres équipements (modules photovoltaïque, onduleur, moteur, pompe, etc.).

### **A. Composants du système de pompage photovoltaïque**

Un système de pompage solaire de l'eau est généralement composé des éléments suivants :

- Des panneaux solaires photovoltaïques pour capter l'énergie du soleil et la convertir en électricité.
- Une pompe immergée ou montée en surface constituée d'un moteur électrique à courant alternatif ou continu.
- Une unité de conditionnement de puissance, constituée d'un convertisseur permettant de faire varier la fréquence et la tension de sortie en fonction de la puissance disponible du générateur solaire.
- Un câblage électrique, par lequel passe l'énergie du générateur au moteur, et les informations relatives aux contrôles de sécurité.
- Une infrastructure hydraulique qui conduit l'eau de sa source (puits) jusqu'aux points de distribution [49].

### **B. Méthodes de pompage photovoltaïque**

Dans les systèmes de pompage photovoltaïque, nous avons deux techniques possibles :

pompage au fil du soleil (Figure III-10) et pompage avec stockage d'énergie. Dans le cas où l'énergie solaire est consommée en temps réel ; on parle alors d'un pompage au fil du soleil sans batterie (Figure III-11). Cette technique permet d'utiliser directement une puissance continuellement variable, celle issue des modules photovoltaïques. Le débit de pompage va donc évoluer avec l'intensité de l'ensoleillement [50].

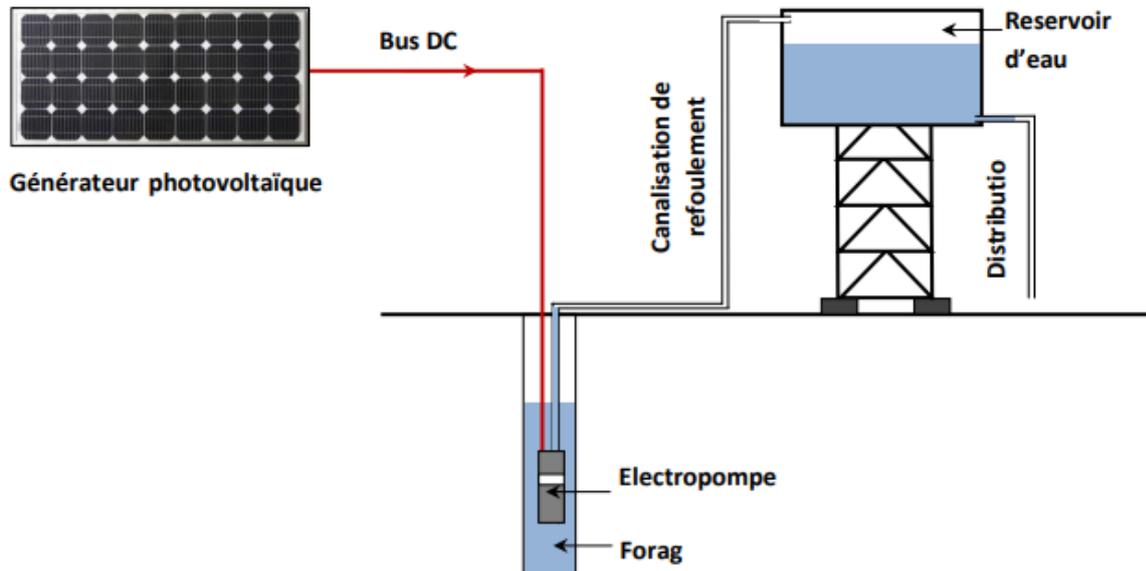


Figure III- 10:Schéma du principe de pompage au fil du soleil.

La deuxième technique consiste à utiliser un stockage d'énergie (figure III-10). Cette fois-ci, via des batteries. Ces batteries stockent l'énergie produite par les cellules photovoltaïques lors des périodes d'ensoleillement afin de pouvoir restituer cette énergie pour pomper l'eau en temps voulu. Le débit de pompage peut se faire à la demande, lorsque les utilisateurs en ont besoin. [51]

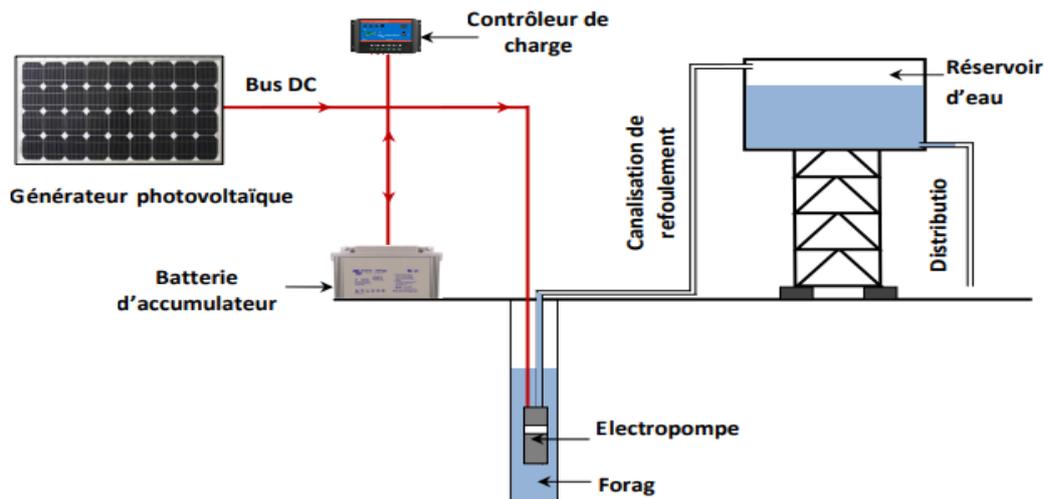


Figure III- 11:Schéma du principe de pompage avec stockage d'énergie.

Les avantages et inconvénients des deux techniques de pompage photovoltaïque sont résumés dans le tableau III.1.

Tableau III- 1: Les avantages et inconvénients des pompages au fil du soleil et avec batteries

Methodes de pompage	Avantages	Inconvénients
Pompage au fil du soleil	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Economie du coût des batteries par conséquence leur maintenance</li> <li>-Système photovoltaïque plus simple ,plus flable et moins coûteux</li> <li>-Meilleur rendement énergétique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Perte d'énergie au début et à la fin de la journée</li> <li>-Le débit de la pompage n'est pas constant et le rabattement du forage peut-être trop élevé durant certaines périodes de la journée</li> </ul>
Pompage avec batterie	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Débit de la pompe régulier et à pression fixe</li> <li>-Possibilité de pomper l'eau lorsque le soleil est absent</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Coût élevé d'entretien et maintenance des batteries</li> <li>-Chargement des batteries tous les 5 à 7 ans</li> <li>-Les batteries introduisent un certain degré de perte de rendement d'environ 20% à 30% de la production d'énergie</li> <li>-Coût élevé du système photovoltaïque</li> </ul>

Dans le cas où le moteur est à courant alternatif, un convertisseur électronique appelé onduleur est nécessaire pour convertir le courant continu provenant du générateur photovoltaïque en courant alternatif.

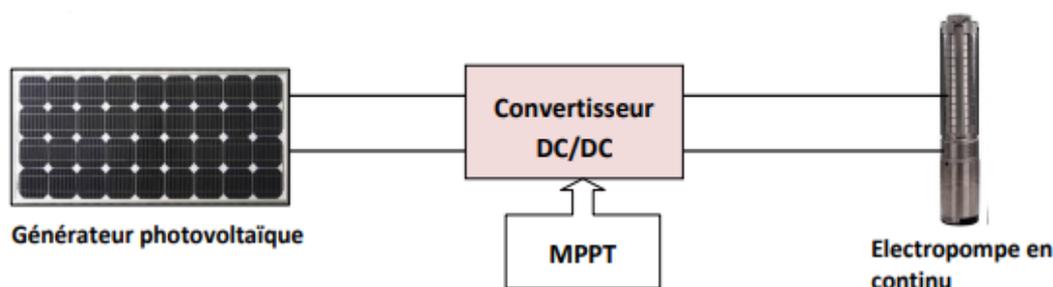
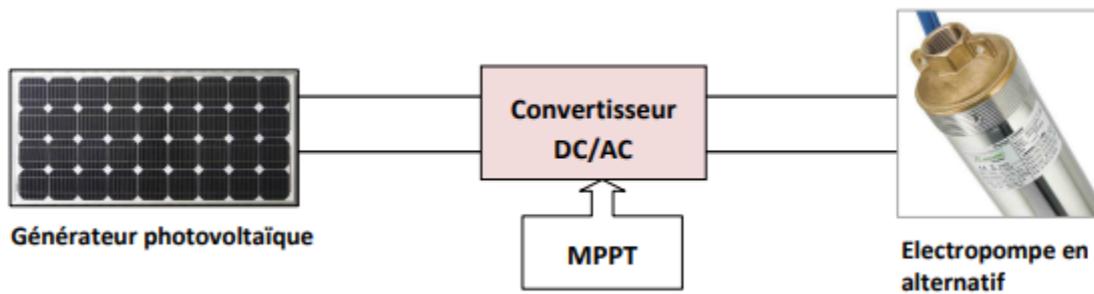


Figure III- 12: Diagramme du pompage PV par électropompe DC



*Figure III- 13:Diagramme du pompage PV par électropompe AC*

### III.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté de manière générale les pompes et les types de pompes ainsi que leur fonctionnement pour ses deux types: turbopompe et volumétrique.

Les pompes volumétriques permettent d'atteindre des pressions de sortie élevées, elles sont plus coûteuses que les pompes centrifuges, mais ont un bon rendement et sont auto-amorçantes.



**Chapitre IV :Dimensionnement d'un  
système de pompage photovoltaïque**

### IV.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous avons dimensionné des installations de système de pompage photovoltaïque (pompage avec et sans batteries), et pour cette partie pratique, nous proposons une zone dans le quartier de la ville de Tamanrasset. Nous avons estimé les besoins en eau de la communauté en fonction de la consommation d'électricité, puis nous avons quantifié l'énergie solaire renouvelable par emplacement et géographie. Avec ces données, il est possible de connaître la taille des modules PV nécessaires, le nombre de cellules, les régulateurs et onduleurs les plus adaptés, et enfin le câblage adapté. [52]

### IV.2 Présentation de la région d'étude :

La ville de Tamanrasset est une commune de la wilaya de Tamanrasset située dans le sud de l'Algérie, à 1900 Km au sud d'Alger. dont la population avoisine de 81752 habitants avec un dotation de 125 L/J/hab.

Elle est limitée par :

La commune d'Tazrouk à l'Est

La commune d'Abalessa à l'Ouest

La commune d'in Amguel et Idles au Nord

La commune d'in Guezzam au Sud

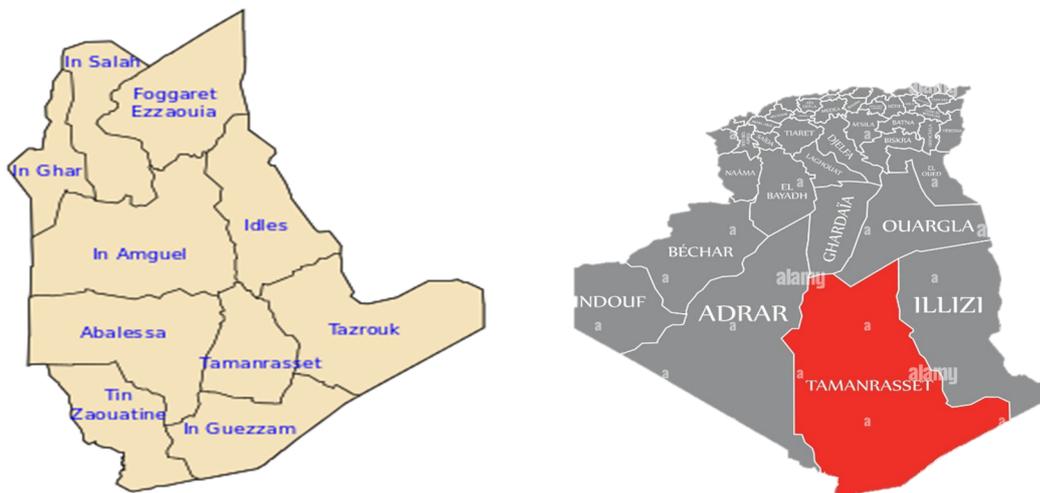


Figure IV- 1: le site géographique de Tamanrasset

tableau IV-1:les coordonnées géographiques terrestres de Tamanrasset

Latitude	26°05'16''N
Longitude	04°23'41''E
L'altitude	1320 m

Source : Google Earth

### IV.3 Pompage avec batterie :

#### IV.3.1 Estimation de besoin en eau

Pour le pompage d'une durée de 24 heures, on a le débit pompé est 11.39 l/s

#### Les besoins domestiques

$$Q_{\text{moyj}} = \text{dot} \times P$$

Dot : la dotation en l/j/hab

P : la population

tableau IV- 2:Les besoins domestiques

Localité	Population	Dotation (l/j/hab)	Débit ( m3/j)
Le quartier de la ville de Tamanrasset	6000	125	750

Dans un quartier du populatin de 6000 hab on a un débit de 750 m3/j

tableau IV- 3:Les besoins scolaires

Equipement	Unité	Nombre d'élève	Dotation (l/j/unité)	Débit (m3/j)
Ecole primaire	Elève	200	10	2

Dans cette école primaire on a un nombre de 200 élèves qui besoins un débit de 2 m3/j pour chaqu'un .

tableau IV- 4:Les besoins socioculturels

Equipement	Nombre d'usage	Dotation (l/j/unité)	Débit (m3/j)
Mosquée	500	10	5

On a un mosqué qui contien un nombre d'usage de 500 qui besoins un débit de 5 m3/j

*tableau IV-5:Récapitulation du besoin en eau*

Catégorie du besoin	Q <sub>moyj</sub> (m <sup>3</sup> /j)
Domestique	750
Scolaire	2
Socioculturel	5
<b>Totale</b>	<b>757</b>

**Consommation maximale journalier**

ce débit represent la consommation d'eau maximale de jour le plus chargé de l'année , il s'obtient par la relation suivent :

$$Q_{\max j} = K_{\max j} \times Q_{\text{moyj}}$$

$$Q_{\max j} = 1.3 \times Q_{\text{moyj}}$$

*tableau IV-6: La Consommation maximale journalier*

Localité	Q <sub>moy j</sub> (m <sup>3</sup> /j)	K <sub>max j</sub>	Q <sub>max j</sub> (m <sup>3</sup> /j)
Le quartier de la ville de Tamanrasset	757	1.3	984.1

**La consommation horaire**

$$Q_{\text{moy h}} = Q_{\max j} / 24 \text{ (m}^3\text{/h)}$$

$$Q_{\text{moyh}} = 41 \text{ m}^3\text{/h}$$

Q<sub>moyh</sub> : Débit moyen horaire

$$Q_{\max h} = Q_{\text{moyh}} \times K_{\max h}$$

$$K_{\max h} = \alpha \times \beta \quad \text{avec : } \alpha = 1.3 \quad \text{et} \quad \beta = 1.4$$

$$Q_{\max h} = 41 \times 1.82 = 74.62 \text{ m}^3\text{/h}$$

Q<sub>maxh</sub> : Débit maximum horaire

## IV.3.2 Volume de réservoir

Tableau IV-7: Evaluation du volume résiduel du réservoir de chef-lieu

Heures	AppORt		Distribut. (%)		Surplus	Déficit	Résidu m3/h
	Apport (%)	Volume (m <sup>3</sup> )	Distribut. (%)	Consomm. (m3)			
0—1	4.17	41	1,5	14.76	26.24	/	26.5
1—2	4.17	41	1,5	14.76	26.24	/	52.48
2—3	4.17	41	1,5	14.76	26.24	/	78.78
3—4	4.17	41	1,5	14.76	26.24	/	104.96
4—5	4.17	41	2,5	24.60	16.4	/	121.36
5—6	4.17	41	3,5	34.44	6.56	/	<b>127.92</b>
6—7	4.17	41	4,5	44.28	/	-3.28	124.64
7—8	4.17	41	5,5	54.12	/	-13.12	111.52
8—9	4.17	41	6,25	61.50	/	-20.5	91.02
9—10	4.17	41	6.25	61.50	/	-20.5	70.52
10—11	4.17	41	6,25	61.50	/	-20.5	50.02
11—12	4.17	41	6.25	61.50	/	-20.5	29.52
12—13	4.17	41	5	49.20	/	-8.2	21.32
13—14	4.17	41	5	49.20	/	-8.2	13.12
14—15	4.17	41	5,5	54.12	/	-13.12	0
15—16	4.17	41	6	59.04	/	-18.04	-18.04
16—17	4.17	41	6	59.04	/	-18.04	-36.08
17—18	4.17	41	5,5	54.12	/	-13.12	-49.2
18—19	4.17	41	5	49.20	/	-8.2	-57.4
19—20	4.17	41	4,5	44.28	/	-3.38	<b>-60.78</b>
20—21	4.17	41	4	39.36	1.6	/	-59.18
21—22	4.17	41	3	29.68	11.44	/	-47.74
22—23	4.17	41	2	19.68	21.28	/	-26.5
23—24	4.17	41	1,5	14.76	26.5	/	0
Total	100	984	100	984.16			

On obtien :

- Le volume résiduel sera :  $V_r = 128.92 + 60.78 = 189.7 \text{ m}^3$
- La capacité totale sera :  $V_t = 189.7 + 120 = 309.7 \text{ m}^3$
- La capacité normalisée sera :  $V_n = 500 \text{ m}^3$

En prend la hauteur de réservoir  $H= 4\text{m}$

Donc : la surface de réservoir  $S=125\text{ m}^2$

$$D = \sqrt{\frac{4 \times S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 125}{\pi}} = 12.66\text{ m} \cong 13\text{ m}$$

### IV.3.3 Présentation du système de pompage :

Notre étude est portée par la projection d'un système de pompage photovoltaïque . Elle prend son départ à partir d'un forage de débit de 35l/s, Avec un niveau statique  $N_s= 35\text{ m}$  et un niveau dynamique  $N_d = 42\text{m}$  .la pompe qui on a choisir c'est (model 6CR27) , fonctionnée 24 heures pour assurer la consommation maximale journalière de la ville de Tamanrasset.

Notre pompe refoule un débit de 11.39 l/s vers le réservoir de distribution par l'intermédiaire d'une conduite de 46 m de longueur à une hauteur manométrique :

$$HMT = H_g + \Delta h_t$$

HMT : la hauteur manométrique totale

$$H_g = N_d + H$$

$$H_g = 42 + 4 = 46\text{ m}$$

H : La longueur de refoulement est 46 m

$\Delta h_t$  : perte de charge totale (m)

$$\Delta h_t = \Delta h_{lin} + \Delta h_{sin}$$

$\Delta h_{lin}$  : perte de charge linéaire (m)

$\Delta h_{sin}$  : perte de charge singulière (m)

La formule la plus utilisée pour le calcul de la perte de charge linéaire pour un écoulement dans une conduite est celle de Darcy-Weisbach :

$$\Delta h_{Lin} = \frac{8 \lambda L Q^2}{g \pi^2 D^5}$$

**Avec :**

$\lambda$  : Coefficient de frottement linéaire.

L : Longueur de la conduite (m).

Q : débit véhiculé par la conduite (m/s).

D : Diamètre calculé dans la conduite.

$$\lambda = (1.14 - 0.86 \text{Ln} \frac{\varepsilon}{D})^{-2} \quad \text{Formule de Nikuradzé}$$

$\varepsilon$  : La rugosité de la conduite (mm),

Pour notre cas on prend :  $\varepsilon = 0.03 \text{ mm}$

$$D = 1.5 \sqrt{Q} = 1.5 \sqrt{0.01139} = 0.16 \text{ m}$$

$$\mathbf{D = 160 \text{ mm}}$$

$$\lambda = (1.14 - 0.86 \text{Ln} \frac{0.03}{160})^{-2}$$

$$\mathbf{\lambda = 0.013}$$

Dans notre cas , les pertes de charge singulières sont estimées à 10 % des pertes de charge linéaires

$$\Delta h_{sin} = 10\% \Delta h_{Lin}$$

$$\text{Donc : } \Delta h_T = 1.10 \Delta h_{Lin}$$

$$\Delta h_T = 1.10 \frac{8 \times 0.013 \times 134.6 \times (0.01139)^2}{10 \times 3.14^2 \times 0.16^5}$$

$$\Delta h_T = 0.06 \text{ mce}$$

$$\text{Donc} \quad \text{HMT} = 0.035 + 46 = 46.06 \text{ m}$$

#### IV.3.4 Dimensionnement de l'installation photovoltaïque :

##### Calcul des besoins énergétiques du système de pompage

La formule de la consommation journalière est :

$$E = \sum_{i=1}^n E_i$$

**Calcul la puissance de la pompe :**

$$P = \frac{g \times Q \times H \times M \times T}{\eta}$$

$$P = \frac{9.81 \times 0.011 \times 3.6 \times 60}{0.8} = 6.43 \text{ KW}$$

Pour les autre équipement (lampes ....) en va majoré la consommation de la pompe de 10%

$$E_p = 6.43 \times 1.1 = 7.07 \text{ KWh}$$

➤ **Notre pompe fonctionnée 24 h**

**Donc** , le besoin les besoins du système de pompage

$$E_p = P \times T_f$$

$$E_p = 7.07 \times 24 = 170 \text{ KWh/j}$$

➤ Afin de rester dans une plage confortable et éviter la surcharge de l'installation d'alimentation nous devons multiplier la consommation calculée par un coefficient de sécurité CS qui est évalué à 1.5 (Génie Electrique).

**La consommation majorée Em aura la valeur suivante :**

$$E_m = E_p \times C_s$$

$$E_m = 170 \times 1.5 = 255 \text{ KWh/jour.}$$

**Avec :**

Em : La consommation journalière majorée

#### **IV.3.5 Principes de calcul de l'énergie solaire :**

Le dimensionnement des panneaux solaires doit se faire dans le cas le plus défavorable à savoir le jour où le nombre d'heures d'ensoleillement soit minimal. Avant d'entrer dans le calcul de l'irradiation solaire, certains principes de base méritent d'être rappelés, notamment plusieurs variables qui seront mentionnées à plusieurs reprises par la suite

**Calcul de la déclinaison :**

Le jour le plus court de l'année est le 21 Décembre. Nous allons à présent calculer l'irradiation globale reçu par un panneau solaire tout au long de cette journée qui nous aidera par la suite à dimensionner les panneaux ainsi que les batteries d'accumulation. Sa valeur en degrés est donnée par l'équation de Cooper

$$\delta = 23.45 \sin \left[ 2\pi \left( \frac{284 + n}{365} \right) \right]$$

$$\delta = 23.45 \sin \left[ 2\pi \left( \frac{284 + 3}{365} \right) \right] = -23.45^\circ$$

**Angle horaire de soleil :**

On peut également déterminer les heures précises de lever et de coucher du soleil, connaissant ainsi la durée totale d'insolation (exposition au soleil).

$$\omega_0 = \text{accros} (-\tan \varphi. \tan \delta)$$

-Angle horaire au lever de soleil :

$$\omega_{\text{lever}} = -\omega_0$$

$$= -\text{accros} (-\tan \varphi. \tan \delta)$$

$$= -\text{accros} (-\tan 26. \tan -23,45)$$

$$\omega_{\text{lever}} = -77.87^\circ$$

-Angle horaire au coucher de soleil :

$$\omega_{\text{coucher}} = \omega_0$$

$$= \text{accros} (-\tan \varphi. \tan \delta)$$

$$= \text{accros} (-\tan 36.2. \tan -23,45)$$

$$\omega_{\text{coucher}} = 77.87^\circ$$

Pour éviter le lever et le coucher de soleil nous allons corriger l'angle horaire par  $-0.05^\circ$

Donc :

$$\omega_{\text{lever}} = -77.82^\circ$$

$$\omega_{\text{coucher}} = 77.82^\circ$$

**.Les heures précises de levée et de couché du soleil**

**Heure du lever :**

$$T_{\text{lever}} = \frac{\omega_{\text{lever}}}{15} + 12$$

$$T_{\text{lever}} = \frac{-7.82}{15} + 12 = 6.812 \text{ h} = \mathbf{6 \text{ h } 13 \text{ min } 53 \text{ s}}$$

**Heure du coucher :**

$$T_{\text{coucher}} = \frac{\omega_{\text{coucher}}}{15} + 12$$

$$T_{\text{coucher}} = \frac{7.782}{15} + 12 = 17.188 \text{ h} = 17 \text{ h } 3 \text{ min } 13 \text{ s (temps solaire vrai)}$$

**IV.3.6 Calcul des Coordonnées horizontales :****Calcul de la hauteur angulaire maximal de soleil :**

La hauteur maximal du soleil selon les données du site sera de :

$$H_{\text{max}} = \arcsin(\sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta).$$

$$H_{\text{max}} = \arcsin(\sin 26 \cdot \sin -23.45 + \cos 26 \cdot \cos -23.45).$$

$$\mathbf{H_{\text{max}}=40.45^\circ}$$

**Rayonnement global horizontal :**

Selon l'Atlas Solaire Algérien, et pour la Wilaya de Tamanrasset, le rayonnement global horizontal moyen est estimé à 2206 Wh/m<sup>2</sup>.

**Calcul de rayonnement diffus sur un plan horizontal :**

L'irradiation diffuse sur un plan horizontal  $D_h$  est calculée par la formule suivante :

$$\mathbf{D_h = (0.9 - 0.8 \sigma) \cdot \beta \cdot G_h}$$

Avec :

$\sigma$  : la fraction d'insolation

$\beta$  : le coefficient d'albédo

**Calcul de la fraction d'insolation :**

$$\mathbf{\sigma = S / S_0}$$

**Durée maximale d'insolation :**

$$S_0 = (2/15) c o^{-3}(-\tan \varphi. \tan \delta)$$

$$S_0 = (2/15) c o^{-3}(-\tan 26. \tan -23.45)$$

$$S_0 = 10.37h$$

Donc:

$$\sigma = 22.06 / 10.37 = 2.127 h$$

**L'irradiation diffuse sur un plan horizontal Dh sera :**

$$D_h = ((0.9 - 0.8) \times 2.127) \times 0.2 \times 2206$$

$$D_h = 93.04 \text{ w/m}^2$$

On déduit alors le rayonnement direct sur un plan horizontal

$$I_h = G_h - D_h$$

$$I_h = 2206 - 93.04$$

$$I_h = 2112.16 \text{ w/m}^2$$

**Calcul de rayonnement global sur un plan incliné :**

Avant de calculer le rayonnement global reçus par un plan incliné il faut d'abord calculer le rayonnement diffus et direct sur le plan incliné

$$D = \frac{1 + \cos i}{2} D_h + \frac{1 - \cos i}{2} \alpha. G_h$$

**Calcul de la meilleure inclinaison :**

$$i = \arctan\left(\frac{1}{\tan H m a x}\right)$$

$$i = \left(\frac{1}{\tan 44.65}\right) = 49.55^\circ$$

Alors le rayonnement diffus sur un plan incliné sera :

$$D = \frac{1 + \cos 54.59}{2} 93.04 + \frac{1 - \cos 54.59}{2} 0.2. 2206 = 107.76 \text{ w/m}^2$$

On peut utiliser les panneaux solaires mobiles c'est à dire les panneaux avec un Support mobiles donc on cherche la position des panneaux par rapport à l'horizontal a chaque mois pour garder les mêmes rayonnements globaux reçus

**Le rayonnement global reçu par les panneaux solaire**

on prend le rayonnement direct sur un plan incliné :  $I = 4.95 \times 10^3 \text{ w/m}^2$  (ANEEEXE I)

$$G = I + D = 4.95 \times 10^3 + 107.76$$

$$G = 5057.78 \text{ w/m}^2 = \mathbf{5.057 \text{ KW/m}^2}$$

**Calcul de la puissance crête du champ photovoltaïque :**

$$P_{c.ch} = \frac{E_m}{G}$$

**Avec**

$P_{c.ch}$  : la puissance crête du champ photovoltaïque (wc)

$E_m$  : La consommation énergétique journalière majorée (kwh)

$G$  : Le rayonnement global reçu par les panneaux solaire (kw/m<sup>2</sup>)

$$P_{c.ch} = \frac{E_m}{G} = \frac{255}{5.057} = 154.6 \text{ m}^2 \cdot \text{h} = 55.6 \times 10^4 \text{ m}^2 \cdot \text{s}$$

$$P_{c.ch} = \mathbf{55.6 \times 10^4 \text{ wc}}$$

**Calcul le nombre des panneaux :**

En utilisant des panneaux solaires de 260Wc (Marque BenQ-PM245P02)(Voir ANNEXE I)

Et comme nous savons que le jour le plus défavorable d' énergie solaire de l'année est le 21 Décembre .La durée de l'éclairage dans le jour est 10 h

Donc :

$$N_p = \frac{E_p}{\text{l'energie de p an de h u}}$$

$$N_p = \frac{170}{0.26 \times 10} = \mathbf{66 \text{ Panneaux}}$$

**Calcul de nombres des panneaux en série et en parallèle:**

**Nombre de modules en série**

$$N_{ms} = \frac{V_{ch}}{V_m} = \frac{384}{312} = 11 \text{ panneaux}$$

**Nombre de modules en parallèle**

$$N_{mp} = \frac{N_m}{N_{ms}} = \frac{6}{1} = 6 \text{ panneaux}$$

**Calcul de capacité de stockage des batteries :**

En couple deux (2) batterie de 12 V et 600 Ah

Donc on obtient une couple batterie de 24 V et 600 Ah ,

**La capacités de couple batterie :**

$$C_{batterie} = \frac{E_{pj}}{U \cdot D_e}$$

-Nombre de jours d'autonomie :  $N_j = 2$  jours

-U = 24 V

-Coefficient de décharge :  $D_e = 0.5$  Pour une batterie à sulfures de plomb

$$C_{batterie} = \frac{17810.2}{0.5 \times 24} = 28333.33 \text{ Ah}$$

**Calcule le nombre de couples batteries :**

La capacité d'une seule batterie = 600 Ah

$$N_{batt} = \frac{C_{batterie} 283333}{C_{batterie} 600} = 48 \text{ batterie}$$

Le nombre des couple batteries = 48 batterie

Donc le nombre de batteries nécessaire pour une autonomie de 2 jours est de : 96 batteries

**Nombre des batteries en série :**

$$N_{batt S} = 2 \text{ batterie}$$

**Nombre des batteries en parallèle :**

$$N_{batt P} = 48 \text{ batterie}$$

- On a choisi l'onduleur Solis hybride 4KUS avec une puissance de 40 KWc et une tension de fonctionnement de 384 V<sub>100A</sub>

#### IV .4 Pompage au fil de soleil

Après les calculs des besoin en eau de la ville de Tamanrasset on a obtient : $Q_{maxj} = 984.1$  m<sup>3</sup>/j

Avec un temps de pompage  $T_P = 10$  h ; et un débit de forage de 35 l/s .

##### IV.4.1 Calcul de $Q_{maxj}$ pour $T_P = 10$ h :

$$Q_{maxj} = 984.1 \text{ m}^3/\text{j} = 984100 \text{ l/s}$$

$$Q_{maxj} = 984100 / (3600 \times 10) = 27.33 \text{ l/s} = 0.027 \text{ m}^3/\text{s}$$

## IV.4.2 : Volume de réservoir

Tableau IV-8: Evaluation du volume résiduel du réservoir de chef-lieu

Heures	AppORt		Distribut. (%)		Surplus	Déficit	Résidum3/h
	Apport (%)	Volume (m <sup>3</sup> )	Distribut. (%)	Consom m.(m3)			
0—1	0	0	1,5	14.76	/	-14.76	-14.76
1—2	0	0	1,5	14.76	/	-14.76	-29.52
2—3	0	0	1,5	14.76	/	-14.76	-44.28
3—4	0	0	1,5	14.76	/	-14.76	-59.05
4—5	0	0	2,5	24.60	/	-24.60	-83.64
5—6	0	0	3,5	34.44	/	-34.44	-118.08
6—7	0	0	4,5	44.28	/	-44.28	-162.36
7—8	10	0	5,5	54.12	/	-54.12	<b>-216.48</b>
8—9	10	98.41	6,25	61.5	36.91	/	-179.57
9—10	10	98.41	6.25	61.5	36.91	/	-142.66
10—11	10	98.41	6,25	61.5	36.91	/	-105.75
11—12	10	98.42	6.25	61.5	36.91	/	-68.84
12—13	10	98.41	5	49.07	49.34	/	-19.5
13—14	10	98.41	5	49.07	49.34	/	29.84
14—15	10	98.41	5,5	54.12	44.29	/	74.13
15—16	10	98.41	6	59.04	39.37	/	113.5
16—17	10	98.41	6	59.04	39.37	/	152.87
17—18	10	98.41	5,5	54.12	44.29	/	<b>197.16</b>
18—19	0	0	5	49.20	/	-49.20	147.96
19—20	0	0	4,5	44.28	/	-44.28	103.68
20—21	0	0	4	39.36	/	-39.36	64.32
21—22	0	0	3	29.68	/	-29.68	34.64
22—23	0	0	2	19.68	/	-19.68	14.96
23—24	0	0	1,5	14.76	/	-14.76	0.2
Total	100	983.04	100	984.16			

-Le volume résiduel sera :  $V_r = 197.16 + 216.48 = 413.64 \text{ m}^3$

-La capacité totale sera :  $V_t = 413.64 + 120 = 533.64 \text{ m}^3$

-La capacité normalisée sera :  $V_n = 1000 \text{ m}^3$

En prend la hauteur de réservoir **H= 4m**

Donc , la surface de réservoir  $S=200 \text{ m}^2$

$$D = \sqrt{\frac{H \times S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 200}{\pi}} = 15.96 \text{ m} \cong 16 \text{ m}$$

#### IV.4.2 Présentation d'un système de pompage (pompage fils du soleil)

Notre pompe (model 8CX 77/7) refoule un débit de 27.34 l /s vers le réservoir de distribution par l'intermédiaire d'une conduite de 46 m de longueur à une hauteur manométrique :

$$H_{MT} = H_g + \Delta h_t$$

$$H_g = N_d + H$$

$$H_g = 42 + 4 + 1 = 47 \text{ m}$$

1 m la longueur de la cross

La longueur de refoulement est 47 m

$\Delta h_t$  : perte de charge totale (m)

$$\Delta h_t = \Delta h_{lin} + \Delta h_{sin}$$

$\Delta h_{lin}$  : perte de charge linéaire (m)

$\Delta h_{sin}$  : perte de charge singulière (m)

La formule la plus utilisée pour le calcul de la perte de charge linéaire pour un écoulement dans une conduite est celle de Darcy-Weisbakh :

$$\Delta h_{L.in} = \frac{8 \lambda L Q^2}{g \pi^2 D^5}$$

$\lambda$  : Coefficient de frottement linéaire.

L : Longueur de la conduite (m).

Q : débit véhiculé par la conduite (m/s).

D : Diamètre calculé dans la conduite.

$$\lambda = (1.14 - 0.86 \text{Ln} \frac{\varepsilon}{D})^{-2} \quad \text{Formule de Nikuradzé}$$

$$\varepsilon = 0.03 \text{ mm}$$

$$D = 1.5 \sqrt{Q} = 1.5 \sqrt{0.02735} = 0.250 \text{ m}$$

$$D = 250 \text{ mm}$$

$$\lambda = (1.14 - 0.86 \text{Ln} \frac{0.03}{250})^{-2}$$

$$\lambda = 0.012$$

Dans notre cas , les pertes de charge singulières sont estimées à 10 % des perte des charge linéaires

$$\Delta h_{\text{sin}} = 10\% \Delta h_{\text{Lin}}$$

$$\Delta h_T = 1.10 \Delta h_{\text{Lin}}$$

$$\Delta h_T = 1.10 \frac{8 \times 0.01247 \times (0.02735)^{2.5}}{1 \times 3.14 \times 0.25^5}$$

$$\Delta h_T = 0.035 \text{ mce}$$

Donc  $HMT = 0.035 + 47 = 47.035 \text{ m}$

#### IV.4.3 Dimensionnement de l'installation photovoltaïque :

##### Calcul des besoins énergétiques du système de pompage

La formule de la consommation journalière est :

$$E = \sum_{i=1}^n E_i$$

##### Calcul la puissance de la pompe :

$$P = \frac{g \times Q \times HMT}{\eta}$$

$$P = \frac{9.81 \times 0.02735 \times 47.035}{0.80} = 15.77 \text{ KW}$$

Pour les autres équipements (lampes ...) on va majorer la consommation de la pompe de 10%

$$P = 15.77 \times 1.1 = 17.35 \text{ KWh}$$

**Donc, le besoin du système de pompage**

$$E_p = P \times T_f$$

$$E_p = 17.35 \times 10 = 173.5 \text{ KWh/j}$$

**La consommation majorée  $E_m$  aura la valeur suivante :**

$$E_m = E_p \times C_s$$

$$E_m = 173.5 \times 1.5 = 260.25 \text{ KWh/jour.}$$

**Avec :**

$E_m$  : La consommation journalière majorée

#### IV.4.4 Calcul le nombre des panneaux :

En utilisant le même type de panneaux solaires : 260Wc (Marque BenQ-PM245P02 )

Donc :

$$N_p = \frac{E_p}{\text{l'énergie de panneau}}$$

$$N_p = \frac{173.5}{0.26 \times 10} = 53 \text{ Panneaux}$$

#### Câblage du système

Pour assurer le bon fonctionnement d'un système photovoltaïque autonome, il reste à prendre en considération le câblage qui assure la liaison entre les différents éléments de la centrale.

Le choix de la section des câbles est très important et il doit être fait de sorte à limiter la baisse de tension entre les composants à moins de 5% .

De manière générale, on peut résumer les liaisons existantes entre les divers composants dans un système avec batterie comme suit :

- liaison champ PV - batterie
- liaison batterie – onduleur
- liaison batterie - régulateur ( Dans notre cas le module de l'onduleur joue le rôle de la régulateur )
- liaison charge électrique – onduleur

**IV.5 Calculer les frais de pompage pour les deux méthodes (pompage avec batterie et pompage sans batterie)**

**IV.5.1 pompage avec batteries :**

*Tableau IV-9: prix totale de système de pompage avec batteries*

Module	Nombre	Prix DA	Prix totale DA
Panneaux	66	24700	1630200
Batterie	96	58500	13338000
Onduleur	1	189256.5	189256.5
Pompe	1	183981.6	183981.6
Réservoir	1	10000000	10000000
Frais totaux	/	/	<b>25341438.1</b>

Source : EL WISSAM Alger

**IV.5.2 Pompage sans batterie :**

*Tableau IV-10: prix totale de système de pompage sans batteries*

Module	Nombre	Prix DA	Prix totale DA
Panneaux	53	24700	1309100
Onduleur	1	189256.5	189256.5
Pompe	1	97426.62	97426.62
Réservoir	1	18000000	18000000
Frais total			<b>19595783.12</b>

**IV.6 Etude technoeconomique**

L'objectif de cette partie est de déterminer le prix de m<sup>3</sup> d'eau pendant la durée de vie de chaque système (avec batteries et au fil du soleil )

Tableau IV-11:L'amortissement total d'un système de pompage avec batteries

Composant du système	N(année)	C(DA)	A(DA/année)
Panneaux	25	24700	988
Batterie	7	58500	8357.14
Onduleur	6	189256.5	31542.75
Pompe	6	183981.6	30663.6
Réservoir	30	10000000	333333.33
Fraix total	/	/	<b>404884.82</b>

Tableau IV-12:L'amortissement total d'un système de pompage au fils du soleil

Composant du système	N(année)	C(DA)	A(DA/année)
Panneaux	<b>25</b>	24700	<b>988</b>
Onduleur	<b>6</b>	189256.5	<b>31542.75</b>
Pompe	<b>6</b>	97426.62	<b>16237.77</b>
Réservoir	<b>30</b>	18000000	<b>600000</b>
			<b>648768.52</b>

Tableau IV-13:Résultats de comparaison entre les deux système

Les coefficients de comparaisons	Système de pompage avec batteries	Système de pompage au fils du soleil
L'investissement total (IT)	<b>25341438.1</b>	<b>19595783.12</b>
l'amortissement total (AT)	<b>404885.08</b>	<b>648768.52</b>
la durée de vie	25	25

**La consommation pendant la durée du vie du système de pompage pv**

$$984.1 \times 365 \times 24 = 8620716 \text{ m}^3$$

A cause de manque des données on considère les frais du maintenance et de cablage et l'amortissement sont égaux dans les deux cas :

**Calcul le prix de m<sup>3</sup> d'eau :**

**1 cas :**

$$\text{Prix} = 25341438.1 / 8620716 = 2.94 \text{ DA /m}^3$$

**2 cas**

$$\text{Prix} = 19595783.12 / 8620716 = 2.27 \text{ DA/m}^3$$

#### **IV.7 Interprétation des résultats :**

Nous obtenons :

**le prix de m<sup>3</sup> d'eau au fils du soleil : Prix = 2.27 DA /m<sup>3</sup>**

**le prix de m<sup>3</sup> d'eau pompage avec batteries : Prix = 2.94 DA /m<sup>3</sup>**

On remarque que le prix de 1m<sup>3</sup> d'eau au fils du soleil est moins cher que avec batteries, donc on conclut que le pompage au fils du soleil est plus rentable que le pompage avec batteries

**Conclusion générale**

## **Conclusion générale**

Ce mémoire concerne un aperçu sur le système de pompage photovoltaïques (par batteries et par fils du soleil) destiné pour l'alimentation en eau potable. Ce système se présente comme une solution idéale pour l'alimentation en eau dans les régions peu peuplées, isolées et enclavées. Les contributions de ce travail dans le domaine de l'énergie solaire photovoltaïque sont encouragées d'utilisation de l'énergie renouvelable en générale pas que l'énergie solaire dans tous les domaines car : fiable, propre, rentable....

D'après l'application de deux types de pompage photovoltaïque (au fils de soleil et avec batteries) on a remarqué que l'utilisation de pompage au fils de soleil est le plus rentable par rapport au pompage avec batteries, pour plus de rentabilité au prix de 1m<sup>3</sup> d'eau on recommande de faire des études de rentabilité de pompage d'eau par des autres sources d'énergies renouvelables.

**Références**

## **Chapitre 1**

- [1] : FRERIS Leon, INFIELD David, « Les Energie Renouvelable Pour La Production De L'électricité », édition DUNOD, Paris 2009
- [2] : Dr SAIDI Hemza Polycopié de cours : Energies Renouvelables 1ère année master électrotechnique. Année 2016/2017
- [3] GERGAUD Olivier, « modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur » thèse de doctorat, l'école normal de CACHAN, 2002.
- [4] ADEME, « la production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde », 2010.
- [5] Programme des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique, disponible sur <https://portail.cder.dz/spip.php?article1573>
- [6] <https://www.energy.gov.dz/?rubrique=energies-nouvelles-renouvelables-et-maitrise-de-lrenergie>
- [7] Bulletin des Energies Renouvelables, Semestriel N° 5 Juin 2004. Disponible sur <http://www.cder.dz/evenements/Download/bulletin5.pdf>
- [8] magazine/energies-renouvelables-avantages-inconvenients
- [9] Melle CHABANI Zeyneb/Mémoire de Magister : La part des énergies renouvelables dans le bilan énergétique national à l'horizon 2030/Année: 2013/2014 ;Pag :26
- [10] MEZOUARI-SABDJAKDINE Fadila, « conception et exploitation des centres de stockage des déchets en algérien, et limitation des impacts environnementaux » Thèse doctoral. 2011

## **Chapitre2 :**

- [11] M. Iqbal .Une introduction au rayonnement solaire, Academic Press, New York (1983).
- [12] Bc. Monika Kokrdová " L'ENERGIE SOLAIRE " Magisterská diplomová práce, UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI FILOZOFICKÁ FAKULTA , Année 2011 . pag: 8
- [13] : k.Amara, « Contribution à l'étude de conception d'une centrale photovoltaïque de puissance (1MW) interconnectée au réseau de distribution électrique moyenne tension». Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de TIZI-OUZOU (2015).
- [14] : J. Graf, « Centrales photovoltaïques », guide pour le dimensionnement et la réalisation de projets, à l'usage des bureaux d'ingénieurs (1996).
- [15] J. A. Duffie, A. Wiley and W.A. Beckman, « Solar Engineering of Thermal Processes », Second Edition. -Interscience Publication, 1991.
- [16] Zekai ,Sen. Solair Energie Fundamentals and Modeling Techniques, Springer 2008.

- [17] P. Besse moulin, J. Olivier. Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette. La météorologie 8e série n° 31 septembre (2000), 42-59.
- [18] :Ricaud Jan, Gisement solaire et transferts énergétiques, Université de Cergy-Pontoise, 2011.
- [19] Rapport technique de la station radiométrique, „Enger MENA““ High Précision Météorologique Station of Research Unit for Renewable Energies in the Saharien Environnement in ADRAR, Alegria, 2014.
- [20] M. Salmi, «Contribution à La Quantification De L'irradiation Solaire Globale En Algérie Et Applications Aux Générateurs Photovoltaïques», Thèse de doctorat en Sciences, Université Ferhat Abbas de Sétif (2012)
- [21] Z. Benjellouli « Contribution à la modélisation d'une cellule solaire » mémoire de magistère université de Bechar (2009).
- [22] C. Bernard « station solaire autonome pour l'alimentation station pompage » l'archive ouverte pluridisciplinaire HAL 2006].
- [23] A. Hammidat Hadj arab et M.T BOUKADOUM « performance et cout des systèmes de pompage PV en ALGERIE » (2005).
- [24] Philippe Guibert : «TP Energie Solaire » Université pierre et marie curie : Master Energétique et Environnement.
- [25] : N.HOUCINE ; Etude de gestion d'une mini-centrale solaire et mise au point d'un dispositif automatique de mesures, contrôle et régulation de l'énergie électrique. Thèse de Doctorat.Université de la science et de la technologie d'Oran Mohammed Boudiaf, Juin 2016.
- [26] Site internet  
[http://fr.solarpedia.net/wiki/index.php?title=Le\\_photovolta%C3%AFque\\_sous\\_concentration](http://fr.solarpedia.net/wiki/index.php?title=Le_photovolta%C3%AFque_sous_concentration)
- [27] Site internet  
[http://fr.solarpedia.net/wiki/index.php?title=Le\\_photovolta%C3%AFque\\_sous\\_concentration](http://fr.solarpedia.net/wiki/index.php?title=Le_photovolta%C3%AFque_sous_concentration)
- [28] Site internet :  
[http://fr.solarpedia.net/wiki/index.php?title=Le\\_photovolta%C3%AFque\\_sous\\_concentration](http://fr.solarpedia.net/wiki/index.php?title=Le_photovolta%C3%AFque_sous_concentration)
- [29] M. BENGHANEM. Etude de la performance des systèmes photovoltaïque autonomes Travaillant à poste fixe. Thèse de Doctorat, U.S.T.H.B, avril 1999.
- [30] M. BENGHANEM. Etude de la performance des systèmes photovoltaïque autonomes Travaillant à poste fixe. Thèse de Doctorat, U.S.T.H.B, avril 1999.

- [31] M. BURESCH. Photovoltaic energy systems. McGraw-Hill U.S.A, 1983.
- [32] F. Lasnier, T. G. Ang, « Photovoltaic Engineering Handbook », IOP Publishing Ltd.1980.ISBN 0-85274-311-4.
- [33] E. BUCHET. Etude du dimensionnement et développement d'un logiciel d'aide à la conception de système de production d'énergie utilisant la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire, Thèse de Doctorat, Faculté de Science et Technique de Saint-Jérôme, d'Aix Marseille, juillet 1988.
- [34] A. HADJ ARAB. Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque de faible puissance, Thèse de magister, H.C.R, décembre 1989.
- [35] [www.solarelectripower.org](http://www.solarelectripower.org).
- [36] F. Lasnier, T. G. Ang, « Photovoltaic Engineering Handbook », IOP Publishing Ltd. 1980.ISBN 0-85274-311-4.
- [37] F. Bouchtouche cherfa «Etude et réalisation d'une centrale photovoltaïque connectée au réseau de distribution électrique BT». Mémoire de magister, Ecole National Polytechnique Elharach, 2004.
- [38] GOAR Nouredine, MAHMOUDI Abdelkader, ' ' Réalisation d'un convertisseur DC/DC dans une chaine de conversion d'énergie photovoltaïque ' ', Mémoire de Master, Université Larbi Ben M'Hidi - Oum El Bouaghi, Juin 2017.
- [39] GUEDAOURIA H., ' ' Dimensionnement d'un système photovoltaïque pour alimenter le laboratoire LPDS au sien de l'université de Béchar ' ', Mémoire de Master, Université Tahri Mohammed Bechar, 2017.
- [40] H.Yotto « Etude et conception d'une mini centrale PV » mémoire fin d'études Master 2 IE Bénin 2011

### **Chapitre 3**

- [41] BENHARRAT.M, KHALEF.F« pompe centrifuge » , université abdelhamid ibn badis de mostaganem, faculté de science et de la technologie 2016 /2017.
- [42] JOEL.M.ZINSALO ,note de cours « pompes et stations de pompage » unversité d'abomeycalavi.
- [43] HAMAMMED.MOHAMMEDYAHIA,MADONICHOUKRI « Etude de système de refoulement TFNA\_DZIOUA », Université AboubakrBelkayid,Tlemcen.

[44] DINBUTA NSEKA MERVEILLE,KAELA TSHILOMBO ROJER,MWAPE.TONDO Adrien ,NGELEKA.TSHIBANGU.Moxime ;WANDANDA BAUDOUIN JOE- « Eude comparative d'un montage série et d'un montage en parallèle de deux pompes hydraulique » Université de LUBUMBASHI ,Faculté polytechnique .

[45] Mécanique des fluides I /Rappels de statique des fluide, academia.edu.

[46] ABDALLAH Benkhattouhocine « Analyse et diagnostic des pompes industrielles (Etude de cas au niveau de HENKEL Ain Temouchent » Université de Tlemcen.

[47] Amine Belaid « Etude et conception d'une pompe centrifuge » Université de biskra

[48] Jean-Loup PRENSIER – Christophe DAUX, « La chaîne d'énergie du pompage de l'eau », Edité le 17/05/2006

[49] HAMDI Abderrazzak, « Conception et dimensionnement d'un système Photovoltaïque pour habitation et pompage », Mémoire de master 2017 – 2018, Université Mohamed Khider de Biskra.

[50] DEGLA Mohammed larbi-BEN AHMED Bachir, « Dimensionnement d'un Système de Pompage Photovoltaïque », Mémoire de master 2017, Universitékasdi Merbah Ouargla.

[51] BOUCHOUICHA Kada, « Modélisation multi spectrale des images satellitaire - Application : Quantification du bilan d'énergie Sol-Atmosphère », thèse de doctorat en sciences 2017, université d'Oran

#### **Chapitre 4**

[52] Djidja Djamilia , Reggane Mellissa ;Mémoire de fin d'étude : Etude d'une installation photovoltaïque pour l'alimentation en électricité d'un centre enfûteur de GPL (NAFTAL) , Promotion 2012 .

**Annexes**

## Annexes I :

## Green Triplex PM245P01 (245 ~ 260 Wp)

## Temperature Coefficient

NOCT	46 ± 2 °C
Typ. Temperature Coefficient of $P_{MPP}$	-0.48 % / K
Typ. Temperature Coefficient of $V_{OC}$	-0.36 % / K
Temperature Coefficient of $I_{sc}$	0.05 % / K

\* NOCT: Normal Operation Cell Temperature, measuring conditions: irradiance 800 W/m<sup>2</sup>, AM 1.5, air temperature 20 °C, wind speed 1 m/s

## Mechanical Characteristics

Dimensions (L x W x H)	1639 x 983 x 40 mm (64.53 x 38.70 x 1.57 in)
Weight	19.5kg (43 lbs)
Front Glass	High transparent solar glass (tempered), 3.2 mm (0.13 in)
Cell	60 multicrystalline solar cells, 156 x 156 mm (6" x 6")
Cell Encapsulation	EVA
Back Sheet	Composite film (White)
Frame	Anodized aluminum frame (Black)
Junction Box	IP-67 rated with 3 bypass diodes
Cables	1 x 4 mm <sup>2</sup> (0.04 x 0.16 inch <sup>2</sup> ), length: each 1.2 m (47.24 in)
Connector Type	MC4 compatible

## Operating Conditions

Operating Temperature	-40 ~ +85 °C
Ambient Temperature Range	-40 ~ +45 °C
Max. System Voltage UL	1000V
Serial Fuse Rating	15 A
Maximum Surface Load Capacity	Tested up to 2400 Pa according to UL1703

## Dimensions mm [inch]

