

**République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

**UNIVERSITE AHMED DRAIA ADRAR
FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA MATIERE**



**MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME
DE MASTER EN PHYSIQUE ENERGETIQUE**

Thème

**Faisabilité technique et rentabilité économique d'un système
hybride (Photovoltaïque - éolien) destiné pour l'alimentation
d'une maison dans la région d'Adrar**

Soutenu le : 07 / 06 / 2015

Présenté par :

Melle. BENABDELLKARIM Mabrouka

Melle. DRISSI Hiba

Encadré par : Dr. MAOUEDJ Rachid

Co-encadreur: Melle. SENOUCI Ahlem

Président : Mr. OMARI Boumediene

Examineurs: Mr. BOUSSOUKAIA Tahar

2014 - 2015



Dédicaces

Nous dédions ce modeste travail

A

Nos très chers parents

Nos frères

Nos sœurs

Toutes nos amies

*A toute personne ayant participé de près
ou de loin à la réalisation de ce modeste
travail.*

*Ce travail est dédié également à la
promotion de physique énergétique 2015.*

Mabrouka et Hiba

Remerciements

Nous exprimons toute notre gratitude et sincère dévouement à Dieu le tout puissant qui grâce à son aide nous avons terminé ce modeste travail.

*Nous tenons à remercier chaleureusement notre promoteur **Dr.R.Maouedj** pour son aide et son encadrement, ses encouragements et surtout sa compréhension durant toute la période de préparation de ce mémoire.*

Nous remercions également l'honorable jury qui a bien voulu examiner notre travail.

Nos professeurs qui nous ont enrichis de connaissances et tout le département de physique énergétique.

SOMMAIRE

Nomenclatures et Abréviations.....	i
La liste des figures.....	iv
La liste des tableaux.....	vii
Introduction générale.....	1

Chapitre I

Situation énergétique mondiale

I.1-Introduction	3
I.2-L'Énergie	3
I.3- Les ressources énergétiques de la planète	3
I.4- Les ressources énergétiques non renouvelables	4
a. Pétrole	4
b. Le charbon	7
c. Le gaz	10
d. L'énergie nucléaire.....	13
I.5- Les ressources énergétiques renouvelables.....	14
a. Énergie hydraulique.....	14
b. Énergie éolien	15
c. Biomasse.....	16
d. La géothermie.....	17
e. Énergie solaire.....	19
e.1. L'énergie solaire thermique.....	19
e.2. L'énergie solaire photovoltaïque.....	20
I.6-La production d'électricité d'origine renouvelables en L'Algérie	20
I.7-Conclusion :.....	22
Références bibliographiques :	23

Chapitre II

Etude d'un système de conversion éolienne

II.1-Introduction.....	25
II.2-Contexte historique	25
II.3-Définition de l'énergie éolienne.....	25
II.4-Les avantages et les Inconvénients des systèmes éoliennes	26
a. Avantages	26

b. Inconvénients	26
II .4-Définition de l'énergie éolienne.....	26
II .5 -Les différents types d'éoliennes	26
a. Les éoliennes à axe horizontal	26
b. Les éoliennes à axe vertical.....	27
II .6-Principe de fonctionnement.....	28
II.7-Eléments constitutifs d'un aérogénérateur (Axe horizontale)	28
II .8-Composantes d'une éolienne.....	30
a. La nacelle	31
b. La tour:	31
c. Le rotor:	32
d. Le multiplicateur:	32
e. La génératrice:	32
II -8.Les pales d'éolienne:	33
II.9-Force de poussée sur une pale d'éolienne	34
a. Énergie fournie par le vent	35
b. Puissance dans un écoulement	35
c. Limite de Betz	36
II.10-Conclusion:.....	37
Références bibliographiques	38

Chapitre III Etude d'un système de conversion Photovoltaïque

III.1-Introduction	39
III.2- Généralités sur le soleil	39
III .2.1-Le soleil	39
III .2.2-La constante solaire	39
III.3- Position du soleil	39
III.3.1-Coordonnées géographiques terrestres	40
III.3.2-Déclinaison	40
III.3.3-Angle horaire du soleil	41
III.3.4-Les temps solaires	41
III.3.4.1-Le Temps Solaire Vrai (T.S.V)	41
III.3.4.2-Le Temps Solaire Moyen (T.S.M)	42
III.3.4.3-Le Temps Universel (T.U)	42
III.3.4.4-Le Temps Légal (T.L)	42

III .3.4.5-le Temps Civil	42
III.4-Mouvements de la terre	43
a.1. Mouvement de rotation	43
a .2.Mouvement de translation	44
b. Distance Terre – Soleil	44
III.5-Le spectre de rayonnement solaire	45
III.6-Les différents types de rayonnement	45
III.7-Rayonnement solaire	46
III.8-Rayonnement solaire sur un plan horizontal	47
III.9-Rayonnement solaire sur un plan incliné	48
III.10-Coordonnées du capteur	49
III.10.1-La hauteur de la normale du capteur γ	49
III.10.2-Azimut du capteur α	50
III.11-Angle d'incidence sur un capteur plan	50
III.12-Potentiel solaire	51
III.13-Conversion de l'énergie solaire	52
III.13.1-L'énergie solaire passive	52
III.13.2-L'énergie photovoltaïque	52
III.13.3-L'énergie solaire active	53
III.14-Energie solaire photovoltaïque	53
III.14.1-Définition	53
III.14.2-Avantages et inconvénients de la technologie photovoltaïque	54
III.14.2.1-Avantages.....	54
III.14.2.2-Inconvénients	54
III.15-Energie reçue par un capteur photovoltaïque	55
a.Estimation de l'énergie instantanée (ciel clair)	55
b. Estimation de l'énergie instantanée (ciel couvert)	55
c. Estimation de l'énergie journalière incidente	56
d. Estimation de l'énergie annuelle incidente	56
III.16-Électricité solaire par effet photovoltaïque	57
III.16.1-Principe de fonctionnement	57
III.16.2-Cellules photovoltaïques	58
III.16.3-Fonctionnement des cellules photovoltaïques	59
III.16.4-Différents types des cellules photovoltaïques	59
III.16.4.1-Cellules monocristallines	59
III.16.4.2-Cellules poly cristalline	60

III.16.4.3-Cellules amorphes	60
III.16.5-Modules (ou panneaux)	61
III.16.6-Générateur photovoltaïque	61
III.17-Caractéristiques d'un module	63
III.18-Conclusion	63
Références Bibliographiques	64

Chapitre IV Installation et experimentation d'un système hybride (PV-éolien)

IV.1-Introduction	67
VI.2-Sélection du site d'installation.....	67
a. Emplacement	67
VI.3-Aérogénérateur Whisper 100	68
VI .3.1-Les caractéristiques de l'aérogénérateur Whisper 100	68
VI.3.2-Description générale de l'aérogénérateur (vue simplifiée de la Whisper 100)	69
VI.3.3-Kit d'insert du mât	69
VI .3.4-Installation de la queue	69
VI.3.5-Installation des pales et du capuchon	69
VI .3.6-Assemblage et levage des mâts	70
VI .3.7-Fondation, tours et Encrages.....	71
VI.3.8-Utilisation du béton.....	71
VI.3.9-Fixation de la base du mât	71
VI.3.10-Montage du contrôleur Whisper	72
VI.4-Le champ Photovoltaïque	72
VI.5-Batteries SP100	72
VI .6-Installation recommandée du fusible des batteries	74
VI.7-Le régulateur de charge 24 V	74
VI.8-Convertisseur d'onde carrée modulée CP 300	74
VI.9-Câblage du contrôleur Whisper	75
VI.10-Présentation des différentes étapes pour l'installation du système	75
VI .11-Étude économique du système	80
VI.11.1-cout des systèmes photovoltaïques	80
a. Equipement et matériels solaires	80
b. Etude technique et réalisation	81
c. Travaux de génie civil	81

d. Le coût de l'entretien	81
VI.12-estimation du cout global du système installé	81
VI.13-Conclusion	82
Référence bibliographies	83
Conclusion générale	84

La liste des figures

Chapitre I		Situation énergétique mondiale
(I-1)	Les énergies de l'hydraulique	15
(I-2)	Les énergies de la éolien	15
(I-3)	Les énergies de la Biomasse	16
(I-4)	Les énergies de La géothermie à haute énergie	17
(I-5)	Les énergies de La géothermie à basse énergie	18
(I-6)	Les énergies de solaire thermique	20
(I-7)	L'énergie solaire photovoltaïque	20
(I-8)	Structure de production d'électricité -2012	21
(I-9)	Structure de production d'électricité d'origine renouvelable -2012	21
(I-10)	Taux de croissance annuel moyen 2002-2012	22
(I-11)	Taux de croissance annuel moyen 2011-2012	22

Chapitre II		Etude du système de conversion éolienne
(II-1)	Conversion de l'énergie cinétique du vent	26
(II-2)	Conversion de l'énergie cinétique du vent	27
(II-3)	Eolienne de type Darrieus et Savonius	28
(II- 4)	Les composantes de l'aérogénérateur	29
(II-5)	Composante d'une éolienne de forte puissance	30
(II -6)	Différents types de tours	32
(II -7)	Classification des éoliennes à axe horizontal selon le nombre de pale	34
(II-8)	Tube de courant autour d'une éolienne	36
Chapitre III		Etude du système de conversion Photovoltaïque
(III-1)	Définition des coordonnées terrestres d'un lieu donné	40
(III-2)	Schématisation du mouvement de la terre autour du soleil	43
(III-3)	Les mouvements de la terre	44

(III-4)	Variation de la distance terre –soleil en fonction du nombre du jour de l'année	45
(III-5)	Donne une classification de ces rayonnements en fonction de leur longueur d'onde	46
(III-6)	Les composants du rayonnement solaire	46
(III-7)	Positionnement du panneau par rapport au solaire	50
(III-8)	Carte de l'irradiation en Algérie (mois de juillet)	51
(III-9)	Durée moyenne d'ensoleillement en Algérie	51
(III-10)	Energie moyenne reçue en Algérie	52
(III-11)	Système Photovoltaïque	53
(III-12)	Diagrammes de bandes d'énergie au voisinage de la jonction	58
(III-13)	Coupe transversale d'une cellule PV typique	58
(III-14)	Cellule photovoltaïque B (monocristalline).	59
(III-15)	Cellule PV polycristalline	60
(III-16)	Cellule au Silicium amorphe (couche mince)	60
(III-17)	. Cellules, module et panneau photovoltaïques.	61
(III-18)	Caractéristiques résultantes d'un groupement de Ns cellules en série.	62
(III-19)	Caractéristiques résultant d'un groupement de Np cellules en parallèle.	63

Chapitre IV		Installation et expérimentation d'un système hybride PV-éolien
(IV -1)	Présentation simplifiée des composantes de l'aérogénérateur	69
(IV -2)	Kit d'insert du mât	69
(IV -3)	Schéma de description générale de l'aérogénérateur	69
(IV-4)	Schéma de description de l'installation des pales et du	69
(IV-5)	Capuchon les types des mâts. Pour les petites éoliennes, les mâts haubanés (à gauche) sont les plus économiques. Les mâts en treillis autoportant (au centre) et les mâts tubulaires en porte-à-faux (à droite) sont plus coûteux, mais restent des options possibles.	70
(IV-6)	Montage du contrôleur Whisper	72
(IV-7)	Schéma pour la configuration des batteries 24 V	73
(IV-8)	Installation du fusible	74
(IV-9)	Convertisseur d'onde carrée modulée CP 300	74

(IV-10)	Raccordement de l'aérogénérateur avec le contrôleur Whisper et les batteries	75
(IV-11)	Schémas représente les différentes étapes pour le montage des pales avec l'aérogénérateur	75
(IV-12)	Photo du champ PV et de l'aérogénérateur	75
(IV-13)	Photos du banc d'essai	75
(IV-14)	Le profil journalier de la charge	76
(IV-15)	Variation horaire de la vitesse du vent du 07 au 13 Avril 2015	77
(IV-16)	Variation horaire de la puissance produit par l'aérogénérateur du 07 au 13 Avril 2015	77
(IV-17)	Variation horaire de l'irradiation solaire du 07 au 13 Avril 2015	77
(IV-18)	Variation horaire de la puissance produit par le champ PV du 07 au 13 Avril 2015	78
(IV-19)	Variation horaire de la température ambiante du 07 au 13 Avril 2015	78
(IV-20)	Variation horaire de la température des modules PV du 07 au 13 Avril 2015	78
(IV-21)	Variation horaire de la tension des batteries du 07 au 13 Avril 2015	78
(IV-22)	Variation horaire de l'état de charge des batteries SOC (State of charge of the battery) du 07 au 13 Avril 2015	79
(IV-23)	Variation horaire de la charge et des puissances produites par chacun des systèmes : aérogénérateur, PV et le système hybride du 07 au 13 Avril 2015	80
(IV-24)	Variation journalière de la charge et des puissances produites par chacun des systèmes : aérogénérateur, PV et le système hybride du 07 au 13 Avril 2015	80
(IV-25)	Distribution des coûts des équipements du système hybride	81
(IV-26)	Distribution des coûts du système de pompage photovoltaïque	82
(IV-27)	Distribution des coûts du système hybride	82

La liste des tableaux

Chapitre I		Situation énergétique mondiale
(I-1)	Production mondiales de pétrole	5
(I-2)	Consommation mondiales de pétrole	6
(I-3)	Réserves mondiales de pétrole	7
(I-4)	Production de charbon	8
(I-5)	Consommation de charbon	9
(I-6)	Réserves prouvées charbon fin 2013	10
(I-7)	production du gaz dans le monde	11
(I-8)	Consommation du gaz dans le monde	12
(I-9)	Réserves de gaz prouvées dans le monde	13
(I-10)	Principaux pays producteurs en hydroélectricité en 2012	15
(I-11)	Principaux pays producteurs d'électricité éolienne en 2012	16
(I-12)	Principaux pays producteurs d'électricité de la biomasse en 2012	17
(I-13)	Principaux pays producteurs d'électricité géothermique en 2012	18
(I-14)	Principaux pays producteurs d'électricité solaire en 2012	19
(I-15)	Production électrique par source	22

Chapitre III		Etude du système de conversion Photovoltaïque
(III-1)	Potentiel solaire dans l'Algérie	51

Chapitre IV		Installation et expérimentation d'un système hybride PV-éolien
(IV- 1)	Les caractéristiques de l'aérogénérateur Whisper 100	68
(IV-2)	Analyse économique du système hybride PV-éolien	81

Introduction générale :

La consommation d'énergie, dans le courant du siècle dernier, a considérablement augmenté à cause de l'industrialisation massive. Les prévisions des besoins en énergie pour les années à venir ne font que confirmer, voire amplifier, cette tendance, notamment compte tenu de l'évolution démographique et du développement de certaines zones géographiques, en Asie en particulier.

D'une part, les gisements des ressources énergétiques traditionnelles, d'origines principalement fossiles, ne peuvent être exploités que pour quelques décennies, ce qui laisse présager d'une situation de pénurie énergétique au niveau mondial de façon imminente.

D'autre part, les déchets des centrales nucléaires posent d'autres problèmes en termes de pollution des déchets radioactifs, du démantèlement prochain des vieilles centrales et du risque industriel.

La situation géographique de la wilaya d'Adrar favorise le développement et l'épanouissement de l'utilisation de l'énergie solaire et éolienne. En effet, vu l'importance de l'intensité du rayonnement reçu ainsi que la durée de l'ensoleillement qui dépasse les dix heures par jour pendant plusieurs mois et la vitesse du vent est très important et dépasse 5m/s dans la région. Adrar peut couvrir certains de ces besoins en énergie solaire et éolienne.

Le système hybride de production de l'énergie dans sa vue la plus générale, est celui qui combine et exploite plusieurs sources d'énergies. Il consiste à l'association de deux ou plusieurs technologies complémentaires de manière à accroître la production d'énergie.

Notre étude s'intéresse à la filière solaire et éolienne, le projet est mis en place à l'unité de recherche en énergies renouvelables en milieu saharien à Adrar. Le système hybride (Photovoltaïque-éolien) pour la production de l'électricité est installé et couplé à un système de stockage électrochimique (batteries) à petite échelle.

Les systèmes hybrides photovoltaïque-éolien comprennent généralement :

- ✓ Un système de production de l'électricité (générateur PV, Aérogénérateur) ;
- ✓ Un système de régulation ;
- ✓ Un système de stockage ;

- ✓ Des équipements de puissance ;
- ✓ Une charge.

L'objectif de ce travail est " l'étude des performances d'un système hybride (photovoltaïque-éolien), pour la production de l'électricité dans la région d'Adrar ".

Ce travail est structuré en quatre chapitres :

✎ Le premier chapitre est consacré la production et consommation les ressources énergétiques de la planète : les ressources énergétiques non renouvelables c.-à-d les énergies des carburants fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel...) et les ressources des énergies renouvelables (hydraulique, éolien, Biomasse, géothermie, solaire) dans la monde et d'Algérie.

✎ Le deuxième chapitre est consacré à une étude qui défini et justifie les différentes composantes du système éolien proposée et aussi la présentation des caractéristiques géographiques et météorologiques de la région d'Adrar.

✎ Le troisième chapitre est consacré à la présentation des généralités sur les systèmes photovoltaïque et la modélisation du champ photovoltaïque.

✎ Enfin dans le dernier chapitre, nous avons présenté l'étude faisabilité technique et rentabilité économique d'un système hybride (Photovoltaïque- éolien) destine pour l'alimentation d'une maison dans la région d'Adrar. Les principaux résultats obtenus et leurs interprétations sont présentés.

Notre travail est clôturé par une conclusion générale qui résume les résultats obtenus et expose quelques perspectives de recherche envisagées.

I.1-Introduction :

Le caractère renouvelable d'une énergie dépend de la vitesse à laquelle la source se régénère, mais aussi de la vitesse à laquelle elle est consommée. Le pétrole ainsi que tous les combustibles fossiles ne sont pas des énergies renouvelables, les ressources étant consommées à une vitesse bien supérieure à la vitesse à laquelle ces ressources sont naturellement créées.

L'énergie fournies par le soleil, le vent, la chaleur de la terre, les chutes d'eau, les marées ou encore la croissance des végétaux, les énergies renouvelables n'engendrent pas ou peu de déchets ou d'émissions polluantes. Elles participent à la lutte contre l'effet de serre et les rejets de CO₂ dans l'atmosphère, facilitent la gestion raisonnée des ressources locales, génèrent des emplois.

L'énergie solaire (solaire photovoltaïque, solaire thermique), l'hydroélectricité, l'éolien, la biomasse, la géothermie sont des énergies inépuisables par rapport aux gisements de combustibles fossiles en voie de raréfaction (Pétrole, charbon, lignite, gaz naturel) [1].

I.2-L'Énergie :

L'énergie (du grec : ενεργεια, energeia, force en action) est la capacité d'un système à modifier un état, à produire un travail entraînant un mouvement, de la lumière ou de la chaleur. C'est une grandeur physique qui caractérise l'état d'un système et qui est d'une manière globale conservée au cours des conversions.

Dans le Système international d'unités, l'énergie s'exprime en joules. Dans la vie courante, le kilowattheure lui est préféré, et en physique des particules on utilise plutôt l'électronvolt, la conversion entre ces unités dont les ordres de grandeur diffèrent se résumant à une simple constante de proportionnalité. On utilise parfois aussi la tonne d'équivalent pétrole [2].

I. 3- Les ressources énergétiques de la planète :

Les ressources énergétiques de la planète se présentent sous deux formes différentes : énergies renouvelables (énergies de flux) et énergies non renouvelables (énergies de stock). 100 des consommations commerciales d'énergie, les seules à pouvoir être mesurées, sont assurées par les énergies de stock, principalement les ressources fossiles.[3]

I.4- Les ressources énergétiques non renouvelables :

L'énergie fossile est l'énergie chimique contenue dans les combustibles fossiles. Au cours des temps géologiques, de la matière organique (biomasse) a été enfouie dans le sol ou a sédimenté au fond des lacs et des océans.

Elle s'est ensuite transformée en kérogène, puis en combustibles fossiles : pétrole, gaz naturel ou charbon [4].

a. Pétrole :

Le pétrole est un mélange naturel d'hydrocarbures qui se forme au sein des roches sédimentaires (les roches mères) à partir de la transformation de la matière organique [5].

D'un gisement à un autre, le pétrole n'a pas les mêmes constituants. Quelques caractéristiques physiques des pétroles [5]:

- Les pétroles les plus courants sont liquides/huileux.
- Leur densité varie de 0,6 à 0,9.
- Leur viscosité s'apparente à celle du miel.
- Les molécules du pétrole sont immiscibles dans l'eau.

❖ L'essence :

L'essence contient des métaux comme le plomb, rejetés dans l'air en même temps que les gaz d'échappement. Les rejets de plomb sont nocifs pour la santé et l'environnement [6].

❖ Le gazole :

Le gazole est le carburant utilisé dans les moteurs Diesel. Le rendement énergétique du moteur Diesel est bien supérieur à celui du moteur à essence, il émet 14 fois plus de particules et il contient du soufre responsable de la formation de Dioxyde de soufre SO₂.

Ces particules sont responsables à la pollution de l'air [6].

❖ Le kérosène :

Le pétrole peut devenir aussi après la transformation, du kérosène, ce carburant est un peu plus lourd que l'essence mais plus léger que le gazole, il est utilisé pour les avions [6].

Tableau (I-1) : Production mondiale de pétrole [7].

Pays	Production annuelle en milliers de barils/jour en 2012	Production annuelle en milliers de barils/jour en 2013	Évolution 2012-2013	Part de la production mondiale
Russie	10643	10786	1,3 %	12,9%
Arabie saoudite	11635	11 525	-1,1%	13,1%
États-Unis	8892	10003	13,5 %	10,8%
Iran	3751	3558	-6 %	4%
Chine	4 155	4180	0,6 %	5%
Canada	3740	3948	6%	4,7%
Mexique	2911	2 875	-1,1 %	3,4%
Koweït	3165	3126	-1,3 %	3,7%
Émirats Arabes Unis	3399	3646	7,4%	4%
Venezuela	2643	2623	-0,8%	3,3%
Nigeria	2417	2322	-4 %	2,7%
Brésil	2149	2114	-1,7 %	2,7%
Norvège	1917	1837	- 4,4%	2%
Angola	1784	1801	0,8 %	2,1%
Irak	3116	3141	0,8 %	3,7%
Reste du monde	16244	15536	-4,3 %	17,9%
Total monde	86251	86808	0,6%	100,0%

Au cours de l'année 2013, la production de pétrole a augmenté de 0,6 %. Les pays de l'OPEP, avec l'Arabie Saoudite en tête, produisent 42,1 % du pétrole mondial. La Russie, qui

n'est pas membre de l'OPEP, est le deuxième producteur de pétrole au monde. Les Etats-Unis, enfin, où la production a augmenté significativement en 2013 (+12,5 %), portée par le développement des huiles de schiste, sont en troisième place [7].

Tableau (I-2) : Consommation mondiale de pétrole [7].

Pays	Consommation annuelle en milliers de barils/jour en 2012	Consommation annuelle en milliers de barils/jour en 2013	Évolution 2012-2013	Part dans consommation mondiale
États-Unis	18490	18 887	2%	19,9%
Chine	10367	10756	3,8%	12,1%
Japon	4709	4551	-3,8%	5%
Inde	3 685	3727	1,2%	4,2%
Russie	2312	3313	3,1%	3,7%
Arabie Saoudite	2989	3075	3,1%	3,2%
Brésil	2807	2973	5,8%	3,2%
Allemagne	2356	2382	0,7%	2,7%
Corée du sud	2458	2460	0%	2,6%
Canada	2394	2385	-0,5%	2,5%
Mexique	2 063	2 020	2,6%	2,1%
Iran	1927	2002	4%	2,2%
France	1689	1683	-0,6%	1,9%
Reste du monde	30784	31118	1,1%	34,8%
Total monde	89931	91333	1,4%	100%

Avec une hausse de leur consommation en 2013, les Etats-Unis demeurent les plus gros consommateurs de pétrole. Ils sont suivis par la Chine, dont la consommation croît

fortement. Le Japon reste troisième consommateur mondial, avec une demande soutenue récemment par la très forte chute du nucléaire après Fukushima.

Les pays de l'OCDE, qui consomment 49,2 % du pétrole mondial (contre 57 % en 2007), déploient des mesures d'efficacité énergétique, notamment dans les transports. Leur consommation de pétrole a diminué de 0,4 % en 2013. Dans l'Union européenne, plus particulièrement, la consommation de pétrole s'est contractée de 0,2 million de barils par jour en 2013, ce qui représente une baisse de 1,9 %. A l'inverse, les pays non-OCDE ont consommé 1,4 million de barils par jour supplémentaires en 2013, soit une hausse de 3,1 % par rapport à 2012 [7].

Tableau (I-3) : Réserves mondiales de pétrole [7].

Pays	Réserves prouvées en 2013 en milliards de barils	Part des réserves mondiales
Venezuela	298,3	17,7%
Arabie Saoudite	265,9	15,8%
Canada	174,3	10,3%
Iran	157	9,3%
Irak	150	8,9%
Koweït	101,5	6,0%
Emirats Arabes Unis	97,8	5,8%
Russie	93	5,5%
Lybie	48,5	2,9%
Nigeria	37,1	2,2%
Etats –Unis	44,2	2,6%
Kazakhstan	30,0	1,8%
Qatar	25,1	1,5%
Chine	18,1	1,1
Brésil	15,6	0,9%

Reste du monde	131,6	7,7%
Total monde	1688	100%

L'estimation des réserves de pétrole correspond à la quantité de pétrole exploitable à un moment donné. Au niveau actuel, les réserves mondiales correspondent à 53,3 ans de production. Elles sont essentiellement concentrées dans les pays de l'OPEP, qui détiennent 71,9 % des réserves mondiales [7].

b. Le charbon :

Le charbon est une matière combustible qui provient de résidus fossilisés de forêts. Lentement elles se sont transformées en charbon [6].

Quand l'homme a découvert le charbon il l'a utilisé pour chauffer les maisons ou faire tourner les machines des usines ou faire fonctionner les trains. Aujourd'hui on s'en sert encore pour produire de l'électricité, mais lorsqu'il brûle il émet beaucoup de CO₂. Cette émission de CO₂ est très polluante et accélère le réchauffement climatique. Le charbon est donc une source d'énergie fossile non renouvelable [6].

Tableau (I-4) : Production de charbon [7].

Pays	Production annuelle en milliers de barils/jour en 2012	Production annuelle en milliers de barils/jour en 2013	Évolution 2012-2013	Part de la production mondiale
Russie	168,7	165,1	-1,9 %	4,3%
Inde	229,1	228,8	0,1%	5,9%
États-Unis	517,8	500,5	-3,1 %	12,9%
Allemagne	45,7	43	-5,5 %	1,1%
Chine	1822,5	1840	1,2 %	47,4%
Afrique du sud	145,6	144,7	-0,3%	3,7%
Indonésie	237,4	2 58,9	9,4%	6,7%

Australie	251,4	269,1	7,3 %	6,9%
Kazakhstan	58,6	58,4	-0,1%	1,5%
Pologne	58,8	57,6	-1,6%	1,5%
Colombie	57,9	55,6	-3,7 %	1,4%
Ukraine	45,9	45,9	0,3 %	1,2%
Reste du monde	222,9	214	-4 %	5,5%
Total monde	3862,2	3881,4	0,8%	100 ,0%

La croissance de la production mondiale de charbon, à l'image de la consommation, ralentit : elle s'élève à 0,8 % en 2013, bien au dessous de la moyenne de croissance des 10 années précédentes (environ 5 %).

Les grands pays consommateurs de charbon en sont également les grands producteurs. La Chine, déjà premier producteur mondial en 2012, a encore augmenté sa production de charbon de 18 Mtep en 2013. La même année, les pays d'Asie Pacifique ont produit à eux seuls 69 % du charbon mondial, tirée notamment par la production indonésienne, celle-ci ayant augmenté de 21,5 Mtep, soit la hausse la plus importante parmi les producteurs de charbon.

Aux Etats-Unis, deuxième producteur de charbon, la production a fortement diminué pour atteindre son plus bas niveau depuis 1993. L'Union Européenne quant à elle ne produit que 3,9% de la production mondiale de charbon. Tous les pays membres de l'Union Européenne ont diminué leur production en 2013, à l'exception de la Hongrie et de l'Ukraine [7].

Tableau (I-5) : Consommation de charbon [7].

Pays	Consommation en 2012	Consommation en 2013	Évolution 2012-2013	Part dans consommation mondiale de charbon
États-Unis	436,7	455,7	4,6%	11 ,9%
Chine	1856,4	1925,3	4%	50,3%
Japon	124,4	128,6	3,6%	3,4%
Inde	302,3	324,3	7,6%	8,5%

Russie	98,1	93,5	-4,4%	2,4%
Australie	47,3	45	-4,7%	1,2%
Ukraine	42,7	42,6	-0,1%	1,1%
Allemagne	80,1	81,3	1,8%	2,1%
Corée du sud	81	81,9	1,4%	2,1%
Indonésie	50,4	54,4	8,2%	1,4%
Taiwan	41,1	41	-0,1%	1,1%
Pologne	54,3	56,1	3,6%	1,5%
Afrique du sud	88,5	88,2	-0,3%	2,3%
Reste du monde	420 ,4	408,9	-2,8%	10,7%
Total monde	3723,7	3826,7	3%	100%

La hausse de la consommation mondiale de charbon connaît toutefois un ralentissement. Elle a augmenté de 3 % en 2013 (contre 5,4 % en 2011).

Le charbon satisfait encore près de 30 % de l'énergie primaire mondiale, et 40 % de la génération d'électricité mondiale. A moyen terme, son utilisation pourrait néanmoins être limitée par le renforcement d'objectifs de réduction des émissions de CO₂ et ses impacts en termes de pollution locale.

Deuxième consommateur de charbon au monde, les Etats-Unis, ont légèrement augmenté leur consommation de charbon en 2013, une remontée des prix du gaz et une baisse de ceux du charbon ayant favorisé l'utilisation de cette source d'énergie dans certaines régions du pays. Cependant, la tendance globale est à une baisse de la consommation de charbon en raison de la concurrence avec le gaz de schiste.

En Inde, dont la consommation de charbon connaît une forte croissance, le charbon (302 Mtep) a couvert la moitié des besoins en énergie primaire (595 Mtep) en 2013. Le Japon, devant satisfaire ses besoins en énergie après l'accident de Fukushima, a eu recours à toutes les énergies disponibles et a également consommé davantage de charbon en 2013 [7].

Tableau (I-6) : Réserves prouvées charbon fin 2013 [7].

Pays	Réserves prouvées en 2013 Milliards de tonnes	Part dans les réserves mondiales
Etats-Unis	237295	26,6%
Russie	157010	17,6%
Chine	114500	12,8%
Australie	76400	8,6%
Inde	60600	6,8%
Allemagne	40548	4,5%
Ukraine	33873	3,8%
Kazakhstan	33600	3,8%
Afrique du sud	30156	3,4%
Colombie	6746	0,8%
Canada	6582	0,7%
Reste du Monde	94221	10,6%
Total Monde	891531	100%

Les réserves de charbon sont plutôt bien réparties géographiquement. Les productions régionales peuvent ainsi répondre, plus facilement que dans d'autres secteurs, aux besoins locaux. Par exemple, la totalité des productions chinoises et indiennes est consommée localement. De manière générale, en Asie, sa production et sa consommation sont en forte augmentation.

Le coût d'exploitation du charbon étant assez faible, il permet de répondre à la hausse de la demande en énergie dans les grands pays émergents. En 2013, la Chine, à elle seule, représente 50 % de la demande mondiale de charbon [7].

c. Le gaz :

Il y a des millions d'années des organismes vivants microscopiques ont été enfouis dans le sol et se sont transformés en gaz naturel sous l'action d'une température élevée, d'une forte pression et de l'absence de contact avec l'air [6].

Ces poches de gaz naturel se trouvent entre 3 000 et 4 000 mètres sous la surface de la Terre. C'est un très bon combustible qu'on utilise par exemple pour faire la cuisine, chauffer l'eau des maisons et produire du chauffage. Le gaz naturel est utilisé dans certains bus, ils sont appelés bus au GNV (Gaz naturel pour véhicule) [6].

Tableau (I-7) : production du gaz dans le monde [7].

Pays	Production annuelle en milliers de barils/jour en 2012	Production annuelle en milliers de barils/jour en 2013	Évolution 2012-2013	Part de la production mondiale
Russie	533,1	544,3	2,4 %	17,9%
Arabie saoudite	89,4	92,7	4,0%	3%
États-Unis	620,8	627,2	1,3 %	20,6%
Iran	149,1	149,9	0,8%	4,9%
Chine	96,4	105,3	9,5 %	2,5%
Canada	140,4	139,3	-0,5%	4,6%
Mexique	51,2	51	-0,2 %	1,7%
Indonésie	64	63,4	-0,7 %	2,1%
Malaisie	59,8	62,1	4,2%	2%
Pays –Bas	57,5	61,8	7,9%	2%
Egypte	54,8	50,5	-7,7 %	1,7%
Qatar	135,7	142,7	5,4%	4,7%
Algérie	73,4	70,7	- 3,2%	2,2%
Reste du monde	680,6	676,7	-0,6 %	22,2%

Total monde	3016,6	3041,3	1,1%	100,0%
--------------------	---------------	---------------	-------------	---------------

Les Etats-Unis sont les premiers producteurs de gaz naturel, fournissant 20,6 % de la production mondiale. Grâce au développement des gaz de schiste qui prennent une part de plus en plus importante dans la production, les Etats-Unis ont connu en 2012 la plus forte hausse de production de gaz naturel (29 Mtep supplémentaires). Ils consomment localement plus de 94 % de leur production. La Russie qui a enregistré une hausse de sa production en 2013, demeure le deuxième producteur mondial. Elle exporte 38 % de sa production de gaz naturel, notamment en direction de l'Europe. Le Qatar, quant à lui, liquéfie son gaz pour l'exporter sous forme de Gaz Naturel Liquéfié (GNL). 67 % de sa production de gaz naturel est ainsi exportée [7].

Tableau (I-8) : Consommation du gaz dans le monde [7].

Pays	Production annuelle en milliers de barils/jour en 2012	Production annuelle en milliers de barils/jour en 2013	Évolution 2012-2013	Part de la production mondiale
États-Unis	657,3	671,0	2,4%	22,2%
Russie	374,6	372,1	-0,4%	12,3%
Iran	145,4	146,0	0,7%	4,8%
Chine	131,7	145,5	10,8%	4,8%
Japon	105,3	105,2	0,2%	3,5%
Arabie saoudite	89,4	92,7	4,0%	3,1%
Canada	90,2	93,1	3,5%	3,1%
Mexique	71,6	74,5	4,2%	2,5%
Royaume Uni	66,3	65,8	-0,6%	2,2%
Allemagne	70,5	75,3	7,0%	2,5%

Italie	61,8	57,8	-6,2%	1,9%
Emirats arabes unis	59,0	61,5	4,5%	2,0%
Inde	52,9	46,3	-12,2%	1,5%
Egypte	47,3	46,3	-2,0%	1,5%
Ukraine	44,6	40,5	-8,9%	1,3%
France	38	38,6	1,7%	1,3%
Reste du monde	880,2	888,3	1,0%	29,4%
Total monde	2986,3	3020,4	1,4%	100,0%

La consommation de gaz naturel ne cesse de progresser, c'est aujourd'hui la troisième source d'énergie la plus utilisée dans le monde, après le pétrole et le charbon : elle représente près d'un quart (24 %) de l'énergie primaire employée.

Comme pour la production, les Etats-Unis sont, en 2013, les premiers consommateurs de gaz naturel au monde (671 Mtep). Le pays qui enregistre la plus forte hausse de consommation est la Chine, bénéficiant des politiques anti-pollution locales et du soutien des autorités [7].

Tableau (I-9) : Réserves de gaz prouvées dans le monde [7].

Pays	Fin 2013(en milliers de milliards de mètres cubes)	Pert des Réserves mondiales
Iran	33,8	18,2%
Australie	3,7	2,0%
Irak	3,6	1,9%
Chine	3,3	1,8%
Indonésie	2,9	1,6%
Algérie	4,5	2,4%
Venezuela	5,6	3,0%

Qatar	24,7	13,3%
Russie	31,3	16,8%
Turkménistan	17,6	9,4%
Etats –unis	9,3	5,0%
Nigeria	5,1	2,7%
Emirats Arabes Unis	6,1	3,1%
Total 10 pays premiers	32,4	17,4%
Total monde	185,7	100%

Trois pays : la Russie, l’Iran et le Qatar abritent actuellement près de 49 % des réserves conventionnelles de gaz naturel prouvées dans le monde. Les réserves de gaz non conventionnel (shale gas, tight gas et coal bed methane) sont mal connues. En 2012, aux Etats-Unis, 50 % des réserves étaient constituées de gaz non conventionnel. Dans d’autres pays comme le Mexique, la Chine, ou encore l’Australie, les estimations des réserves non-conventionnelles sont progressivement révisées à la hausse. Cependant, l’exploitation des réserves de gaz non conventionnel est confrontée à l’acceptabilité par les populations de certaines régions [7].

d. L'énergie nucléaire :

L’énergie nucléaire est produite par les noyaux des atomes qui subissent des transformations, ce sont les réactions nucléaires. Ces réarrangements nucléaires conduisent à des configurations plus stables, le différentiel d’énergie (correspondant au différentiel de masse) constitue alors l’énergie libérée par la réaction. La transformation de la masse en énergie selon la célèbre formule $E=mc^2$ est utilisée dans les réactions de fission et fusion nucléaire [5].

Selon le contexte d'usage, le terme d'énergie nucléaire recouvre deux sens différents [5]:

- ❖ Au niveau macroscopique, l’énergie nucléaire correspond, d’une part à l’énergie libérée par les réactions de fusion nucléaire au sein des étoiles et à la principale source d’énergie du volcanisme terrestre, d’autre part aux usages civils et militaires de l’énergie libérée lors des réactions de fission ou de fusion du noyau atomique (à noter que l'utilisation industrielle de la fusion nucléaire n'est pas maîtrisée à ce jour);

- ❖ Au niveau microscopique, l'énergie nucléaire est l'énergie associée à la force de cohésion des nucléons, la force nucléaire forte (protons et neutrons) au sein du noyau des atomes.

Les transformations du noyau libérant cette énergie sont appelées réactions nucléaires. La force nucléaire faible, elle, régit les réactions entre particules et neutrinos. La production d'électricité d'origine nucléaire En 2013 elle en représente 11 % de la production mondiale d'électricité.

- Ressource quasi infinie.
- Quantité d'énergie produite.
- Dangers du nucléaire (Tchernobyl il y a 20 ans)
- Combustible radioactif.
- Production de déchets radioactifs, qui le restent pendant des milliers d'années.

I.5- Les ressources énergétiques renouvelables :

Une énergie renouvelable est une source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de l'homme. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les astres, principalement le Soleil (rayonnement), mais aussi la Lune (marée) et la Terre (énergie géothermique) [8].

Soulignons que le caractère renouvelable d'une énergie dépend non seulement de la vitesse à laquelle la source se régénère, mais aussi de la vitesse à laquelle elle est consommée [8].

a. Énergie hydraulique :

L'énergie hydraulique est une [énergie renouvelable](#). Cette source d'[énergie renouvelable](#) exploite les [mouvements](#) de l'eau actionnés par le [Soleil](#) et la [gravité](#) à travers le cycle de l'eau, les [marées](#) et les courants marins[9] .



Figure (I-1): Les énergies de l'hydraulique [10].

Tableau (I-10): Principaux pays producteurs en hydroélectricité en 2012 [7].

Pays	Production (TWH) 2012	Part prod. mondiale
Chine	823,3	22,5%
Brésil	416,8	11,4%
Canda	380,1	10,4%
Etats –unis	298,1	8,1%
Russie	164,8	4,5%
Norvège	142,9	3,9%
Inde	114,8	3,1%
Japon	85,7	2,3%
Venezuela	82,4	2,2%
Suède	78,6	2,1%
Reste du monde	1075,9	29,4%
Monde	3663,4	100%

b. Énergie éolien :

L'éolienne est un dispositif destiné à convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, elles sont généralement utilisés pour produire de l'électricité et entre dans la catégorie des énergies renouvelables [11].



Figure (I-2): Les énergies de la éolien [10]

Tableau (I-11) : Principaux pays producteurs d'électricité éolienne en 2012 [7].

Pays	Production 2012	Part prod. mondiale
États-Unis	140,9	26,4 %
Chine	118,1	22,1 %
Espagne	49,1	9,2 %
Allemagne	46,0	8,6%
Inde	30,0	5,6 %
Royaume-Uni	19,6	3,7%
France	14,9	2,8 %
Italie	13 ,4	2,5%
Canada	11,8	2,2%
Danemark	10,3	1,9 %
Total 10 premiers	80,2	15,0 %
Total monde	534,3	100,0 %

c. Biomasse :

La biomasse se définit comme « la fraction biodégradable des produits, déchets et résidus provenant de l'agriculture, y compris les substances végétales et animales issues de la terre et de la mer, de la sylviculture et des industries connexes, ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et ménagers» [12].

Toutes ces matières organiques peuvent dégager de l'énergie soit par combustion directe ou suite à une ou plusieurs étapes de transformation.

La biomasse énergie (hors biocarburants et combustion des déchets urbains) représente environ 9,6 Mtep en 2009: 9,1 Mtep en bois énergie (dont 6,6 Mtep en bois domestique) et 0,5 Mtep environ de biogaz [12].



Figure (I-3): Les énergies de la Biomasse [10]

Tableau (I-12) : Principaux pays producteurs d'électricité de la biomasse en 2012 [7].

Pays	Production 2012	Part prod mondiale
États-Unis	63,3	14,9 %
Brésil	42,0	12,9 %
Allemagne	41,4	12,7%
Japon	31,8	9,8 %
Royaume-Uni	15,2	4,7%
Finlande	10,8	3,3%
Suède	10,7	3 ,3%
Italie	10,2	3,1%
Pologne	10,0	3 ,1%
Pays –Bas	7,2	2,2 %
Total 10 premiers	83,5	25,6 %
Total monde	326,2	100,0 %

d. La géothermie :

La géothermie est l'étude des répartitions des températures à l'intérieur de la Terre, et des phénomènes physiques et géologiques qui leur sont liés. Classification de l'énergie géothermique [13].

Classiquement quatre types :

- ❖ La géothermie à haute énergie : la température élevée du gisement (entre 80°C et 300°C) permettant la production d'électricité [10].

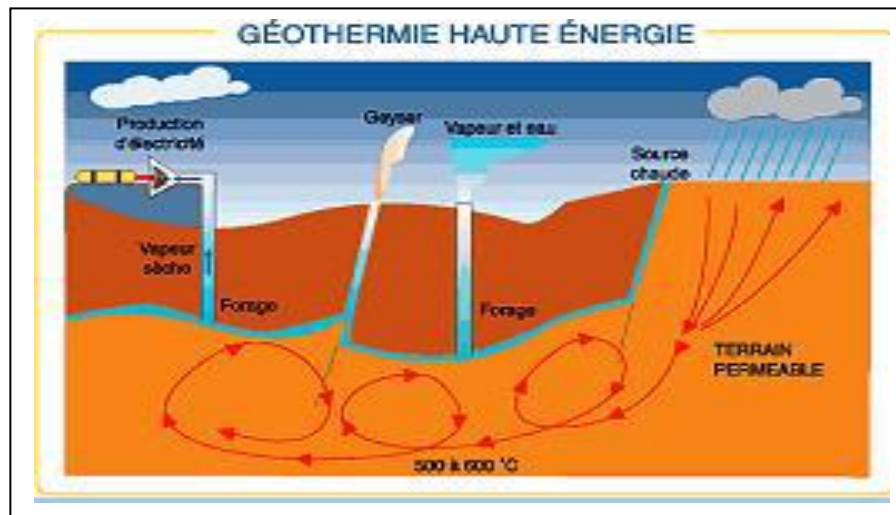


Figure (I-4): Les énergies de La géothermie à haute énergie [10]

- ❖ La géothermie à basse énergie : La température de l'eau entre 30°C et 100°C. Cette technologie est utilisée principalement pour le chauffage urbain collectif par réseau de chaleur [10].

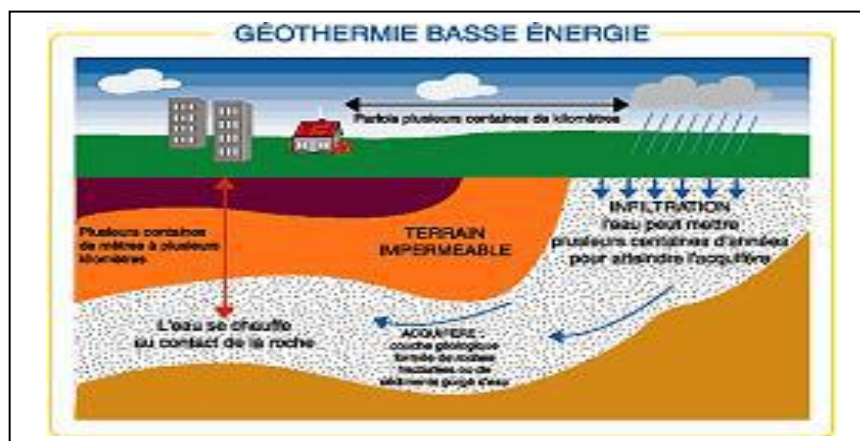


Figure (I-5): Les énergies de La géothermie à basse énergie [13]

- ❖ La géothermie à très basse énergie : la température est comprise entre 10 °C et 30 °C. Cette technologie est appliquée au chauffage et la climatisation avec la pompe à chaleur géothermique.
- ❖ La géothermie moyenne énergie : Présente dans de nombreux endroits du globe, les ressources de moyenne énergie (90 à 150°C) se retrouvent dans le même décor géologique que la géothermie haute énergie, à une profondeur moindre (inférieure à 1000 m) [10].

Tableau (I-13) : Principaux pays producteurs d'électricité géothermique en 2012 [7].

Pays	Production 2012	Part prod. mondiale
États-Unis	19,6	27,9%
Philippines	10,2	14,6%
Indonésie	7,9	11,2%
Nouvelle-Zélande	6,2	8,8%
Mexique	5,8	8,3%
Italie	5,6	7,9%
Islande	5,2	7,4%
Japon	2,5	3,6%
Salvador	1,5	2,2 %
Kenya	1,5	2,1%
Reste de monde	4,2	6,0%
Total monde	70,4	100,0 %

e. Énergie solaire :

Le Soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie, il envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique de l'humanité. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (KWc /m²) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge.

Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du Soleil que n'en consomme l'humanité en une année. L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés [14]:

Tableau (I-14) : Principaux pays producteurs d'électricité solaire en 2012 [7].

Pays	Production (TWh) 2012	Part prod. mondiale
<u>Allemagne</u>	28,0	26,8 %

Italie	18,9	18,0 %
États-Unis	15,0	14,3 %
Espagne	11,9	11,4 %
Japon	7,2	6,9 %
Chine	5,2	5,0 %
France	4,1	3,9 %
République tchèque	2,2	2,1 %
Belgique	1,7	1,6 %
Australie	1,5	1,4 %
Reste de monde	9,0	8,6 %
Total mondial	104,5	100,0 %

e.1. L'énergie solaire thermique :

Le thermique solaire est un procédé de transformation de l'énergie solaire en une forme thermique, qu'on peut utiliser

- ❖ En usage direct de la chaleur : chauffe-eau solaire, chauffage solaire, cuisinière et séchoir solaire.
- ❖ En usage indirect où la chaleur sert pour un autre usage : centrales solaires thermodynamiques, froid solaire [15].

Les systèmes solaires thermiques convertiront cette irradiation solaire en chaleur. On peut convertir entre 30 et 70 % de l'énergie solaire [16].



Figure (I-6): Les énergies de solaire thermique [10]

e.2. L'énergie solaire photovoltaïque :

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie électrique produite à partir du rayonnement solaire. Elle fait partie des énergies renouvelables. Pour exploiter cette énergie, on doit concevoir des cellules photovoltaïques qui convertissent l'énergie lumineuse en électricité. Plusieurs cellules sont reliées entre elles sur un module solaire photovoltaïque.

Plusieurs modules sont regroupés pour former une installation solaire. Cette installation produit de l'électricité qui peut être consommée sur place par un particulier ou alimenter un réseau de distribution (chauffer de l'eau ou produire de l'électricité). Les réseaux peuvent mettre en place des installations comme la tour de Thémis, elle pourrait atteindre 30% d'énergie solaire convertie en électricité grâce à des turbines à gaz et à vapeur. L'énergie est captée en haut d'une tour à 1650 mètres d'altitude avec des miroirs et des héliostats (miroirs orientables) [16].



Figure (I-7): L'énergie solaire photovoltaïque [10]

I.6-La production d'électricité d'origine renouvelables en L'Algérie :

L'Algérie se repose presque exclusivement sur les combustibles fossiles (99,2%) pour répondre aux besoins croissants d'électricité de sa population. Les énergies renouvelables n'occupent donc qu'une faible part du mix électrique national (0,8%) et leur production est partagée entre la filière hydraulique qui a généré cette année (389GWh) .soit 0,7% du total ,et les filières solaires photovoltaïque (11Gwh) et thermodynamique (58GWh) ,qui représentent quant à elles 0,1% du bilan.

La production fossile a augmenté en moyenne de 6,7% par an sur la période 2002-2012. L'Algérie amorce cependant aujourd'hui une dynamique verte avec le lancement d'un programme prévoyant l'installation de plus de 2200MWde capacités renouvelables 1200MWétant dédiés à couvrir la demande intérieure en électricité et 10000 MW destinés à l'exportation.

De plus l'option du nucléaire est toujours d'actualité pour faire face à la demande d'électricité galopante et Une premières centrale d'une puissance de 1000MW pourrait voir le jour en 2025. En parallèle, sone gaz, qui contrôle 75% des capacités de production du pays, souhaite miser sur le développement des énergies renouvelables le nouveau programme pour le développement des énergies vertes s'appuiera en grande partie sur le secteur solaire pour lequel l'Algérie dispose d'un des meilleurs potentiels au monde. L'Algérie entend ainsi se positionner comme un acteur majeur de la production d'électricité solaire photovoltaïque, mais également thermodynamique. Le pays a inauguré en juillet 2011 sa première centrale hybride solaire gaz d'une puissance de 150MW, dont 30MW solaire dans la région saharienne de Hassi R'mel [18].

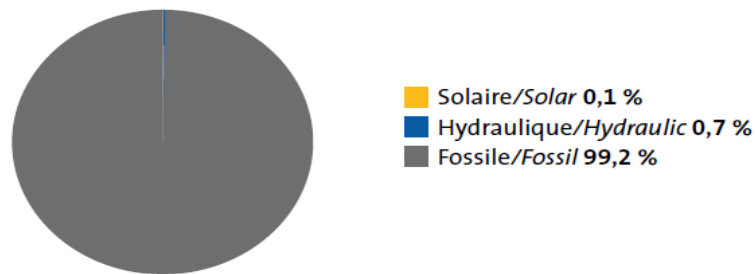


Figure (I-8): Structure de production d'électricité en 2012 [18]

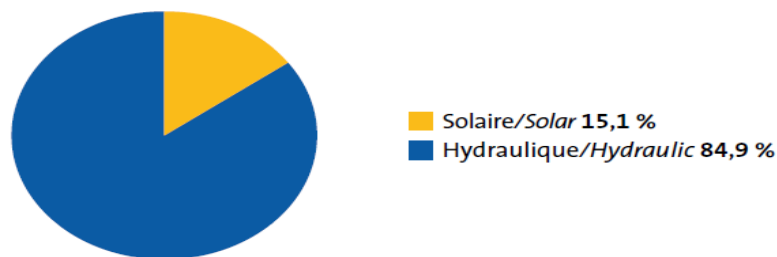


Figure (I-9): Structure de production d'électricité d'origine renouvelable en 2012 [18]

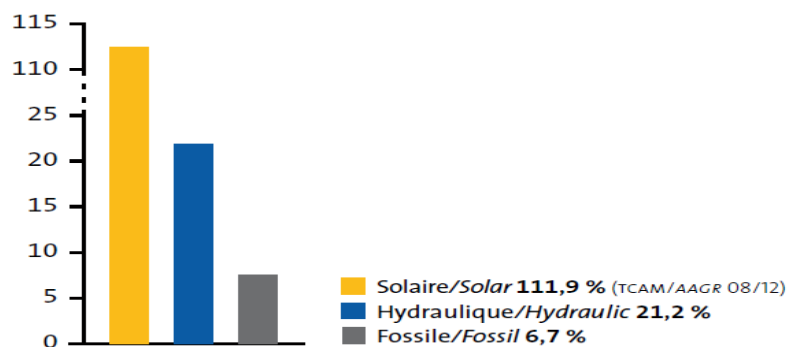


Figure (I-10): Taux de croissance annuel moyen 2002-2012 [18]

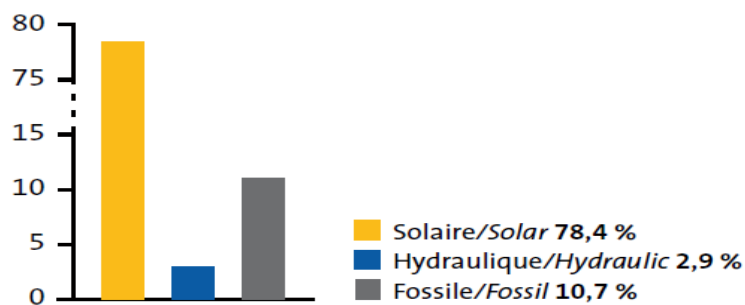


Figure (I-11) : Taux de croissance annuel moyen 2011-2012 [18]

Tableau (I-15) : Production électrique par source [18] :

TWh	2002	2009	2010	2011	2012	TCAM 02/12	TC 11/12
Solaire	0	0,004	0,004	0,039	0,069	111,9%	78,4%
Dont photovoltaïque	0	0,004	0,004	0,004	0,011	33,9%	163,8%
Dont thermodynamique	0	0	0	0,035	0,058	0	68,1%
Hydraulique	0,057	0,306	0,174	0,378	0,389	21,2%	2,9%
Fossile	29,7	40,0	47,9	51,2	56,7	6,7%	10,7%
Tot. renouvelable	0,057	0,310	0,178	0,417	0,458	23,2%	9,9%
Tot. conventionnelle	29,7	40,0	47,9	51,2	56,7	6,7%	10,7%
Total production	29,7	40,3	48,1	51,6	57,1	6,7%	10,7%
Part renouvelable	0,2%	0,8%	0,4%	0,8%	0,8%	0	0

I.7-Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons fait un panorama des sources d'énergies renouvelables et non renouvelables existant pour la production de la chaleur et de l'électricité. Pour les énergies renouvelables, le rayonnement solaire et le vent sont les sources se prêtant le mieux une production d'électricité.

Les menaces du changement climatique et d'épuisement de nos ressources (non renouvelables) de carburants fossiles et d'uranium pèsent de plus en plus sur l'économie, la stabilité politique de nos pays et sur le comportement des citoyens.

Le contexte du développement durable implique l'amélioration de l'efficacité énergétique à des effets positifs sur la croissance économique et l'environnement, ainsi que des effets connexes tels que la réduction des émissions de gaz à effet de serre, la prévention de la pollution, l'amélioration de la sécurité des approvisionnements énergétiques, ainsi que celle de la santé et de l'emploi.

Références bibliographiques :

- [1] Cours des Masters, « Énergies renouvelables », Université Mentouri de Constantine.
- [2] Bouziane Khadidja, « Etude D'une Installation Photovoltaïque De Production D'hydrogène Par Electrolyse De L'eau », Mémoire magister, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2010/2011.
- [3]<http://www.universalis.fr/encyclopedie/energie-les-ressources/1-les-ressources-energetiques/#>
- [4] « Programme des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique », Mars 2011.
- [5] http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_nucl%C3%A9aire
- [6] Cours de technologie, Les énergies : « Les différents types d'énergies ».
- [7] <http://www.planete-energies.com/fr/l-energie-au-quotidien/qui-produit-qui-consomme-/lepetrole-227.html>
- [8]<http://www.planete-energies.com/fr/l-energie-au-quotidien/qui-produit-qui-consomme-/lepetrole-227.html>
- [9]http://www.bp.com/assets/bp_internet/globalbp/globalbp_uk_english/reports_and_publications/statistical_energy_review_2011/STAGING/local_assets/pdf/statistical_review_of_world_energy_full_report_2011.pdf
- [10] <http://www.planete-energies.com/fr/l-energie-au-quotidien/qui-produit-qui-consomme-/le-gaz-229.html>
- [8] Redjem Radia, « Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne », Mémoire de Magistère, Université Mentouri de Constantine, Département d'Electrotechnique, 04/07/2009.
- [9] BP Statistical Review of World Energy June 2012.
- [10] Marie-Jeannette, Inès, « Margaux, Énergie solaire photovoltaïque ».
- [11] Hassini Belghitri Houda, « Modélisation, Simulation Et Optimisation D'un Système Hybride Eolien-Photovoltaïque», Mémoire de magister, Département de Physique, université Abou-Bakr Belkaid de Tlemcen ,2010 .

[12] Direction Générale de l'Energie et du Climat, L'industrie des énergies décarbonnées en 2010.

[13] Benjamin Dessus, « Energies renouvelables : où, comment et pour faire ? », Global Chance, 2005.

[14] M. Belhadj, « Modélisation d'un Système de captage photovoltaïque Autonome », Mémoire de Magister Universitaire de Béchar, 2007-2008.

[15] Saadi Souad, « Effet des paramètres opérationnels sur les performances d'un capteur solaire plan ». Mémoire de magistère, Université Mentouri de Constantine, 2010.

[16] « Etude du potentiel vendéen et des applications possibles de l'énergie solaire thermique et photovoltaïque», Alliance Soleil SARL, Février 2007.

[17] <http://www.cartografeipresente.org/article818.htm>.

[18] 15e-inventaire-Chap03-3.9.1-Algérie . <http://www.energies-renouvelables.org/observer/html/inventaire/Fr/sommaire.asp>

II .1-Introduction:

L'utilisation des systèmes éoliens pour la production d'électricité est une solution pour satisfaire les besoins en électricité dans un site isolé est assez bien venté.

De tel système présente plusieurs avantages du fait de sa flexibilité et sa fiabilité. Il existe deux types d'éoliennes modernes : les éoliennes à axe horizontal et à axe vertical [1].

II .2-Contexte historique :

Très tôt, dans l'histoire des techniques [2], le vent a été exploité afin d'en extraire de l'énergie mécanique : pour la propulsion des navires dès l'antiquité (3000 ans Av. JC), pour les moulins (à céréales, olives), le pompage ou, au Moyen Age, pour l'industrie (forges...).

La conversion de l'énergie du vent en énergie mécanique est en effet relativement aisée, il faut « seulement » disposer d'un potentiel satisfaisant et résister aux caprices des vents excessifs. Parallèlement, les progrès technologiques, tant dans les domaines de l'électrotechnique, de l'électronique que dans celui des matériaux, font que l'on peut désormais disposer de machines aux performances étonnantes en terme de puissance produite, tout en limitant les impacts sur l'environnement [3].

Dans les sites isolés, la rentabilité étant plus facile à obtenir, des petites éoliennes dans la gamme de quelques 100 W à quelques 10 kW sont commercialisées depuis plus longtemps. La baisse des coûts des cellules photovoltaïques permet aujourd'hui de construire des systèmes hybrides éoliens et photovoltaïques qui profitent de la fréquente complémentarité vent-soleil (réduction des coûts des batteries de stockage nécessaires en site isolé) [2,4].

Ainsi l'histoire de l'énergie éolienne a pour une grande partie été influencée par des facteurs extérieurs, tels l'apparition de la machine à vapeur, la distribution généralisée d'électricité, la crise énergétique de 1973.

II .3-Définition de l'énergie éolienne:

L'éolienne est un dispositif destiné à convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, elles sont généralement utilisées pour produire de l'électricité et entre dans la catégorie des énergies renouvelables [7] :

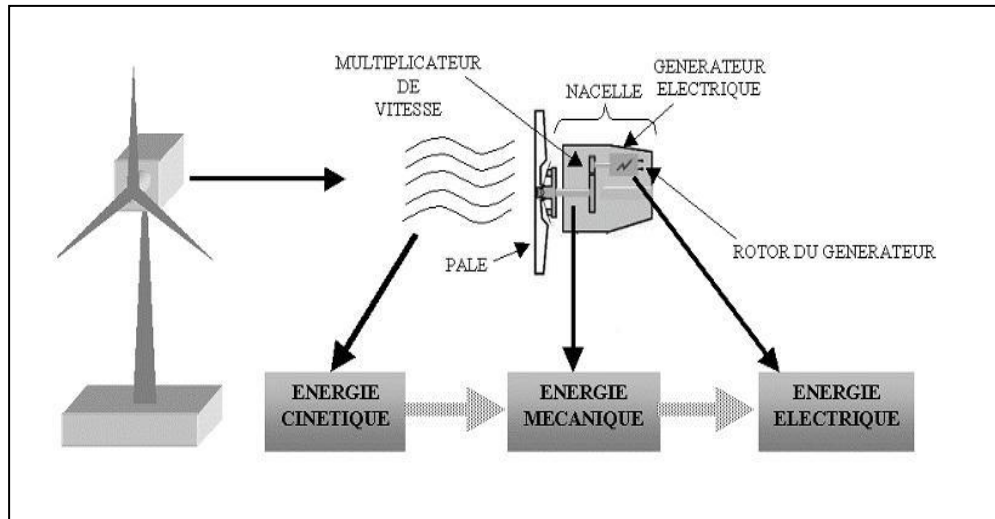


Figure (II-1) : Conversion de l'énergie cinétique du vent [7]

II .4-Les avantages et les inconvénients des systèmes éoliennes :

Tous systèmes de production d'énergie à ses avantages et ses inconvénients [5-6] :

a .Avantages

Énergie propre non polluant, gratuite, abondante et inépuisable

- Elle peut être complémentaire aux filières traditionnelles
- Elle ne consomme pas de combustibles
- Elle permet que le terrain occupé par les parcs éoliens soit utilisé à d'autres fins, par exemple : agricoles
- Bas impact environnemental
- Ils fonctionnent de façon rentable dans les régions éloignées et venté.
- Ils sont flexibles et peuvent être élargis à n'importe quel moment pour répondre à vos besoins en matière d'électricité.
- Temps de réalisation d'une centrale éolienne minimum.
- Ils ont une longue durée de vie.
- On élimine les frais et les risque de transport associé des énergies fossiles.

b. Inconvénients:

- Instable, elle est sujette à des variations du vent et à des périodes de calme
- Difficulté de stockage de l'énergie
- Les équipements sont chers et produisent du bruit
- Impact visuel (effets d'ombre dus au mouvement et réflexions intermittentes)
- Interférences électromagnétiques.

II.5 -Les différents types d'éoliennes :

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontal [7].

a. Les éoliennes à axe horizontal :

Ce sont les machines les plus répandues actuellement du fait de [7]:

- Leur rendement est supérieur à celui de toutes les autres machines. Elles sont appelées éoliennes à axe horizontal car l'axe de rotation du rotor est horizontal, parallèle à la direction de vent. Elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales, ou des hélices multipale pour le pompage de l'eau.
- Elles ont un rendement élevé.

Les éoliennes à axe horizontal (ou à hélice) sont de conception simple.

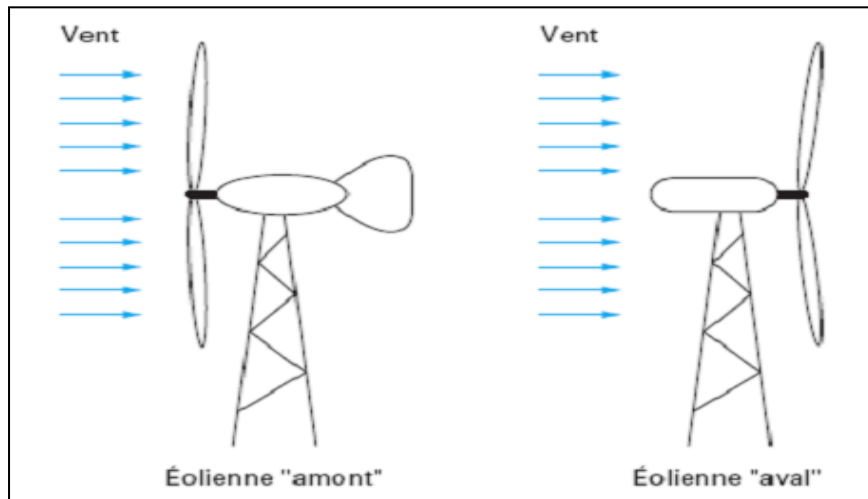


Figure (II-2) : Conversion de l'énergie cinétique du vent [7]

b. Les éoliennes à axe vertical:

Pour ces capteurs, l'axe de rotation est vertical et perpendiculaire à la direction du vent, et sont les premières structures développées pour produire de l'électricité.

Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol, donc elles sont facilement accessibles.

Elles sont adaptées à tous les vents et ne nécessitent pas de dispositif d'orientation [7].

Deux d'entre elles sont particulièrement remarquables : Savonius et Darrieus. L'éolienne Savonius comporte principalement deux demi cylindres dont les axes sont décalés l'un par rapport à l'autre. Comme les machines à aubes, elle utilise essentiellement la traînée pour tourner. Cette machine présente deux avantages [7]:

- Elle est simple à fabriquer

- Elle démarre avec des vitesses de vent de l'ordre de 2 m/s.

L'éolienne inventée par le Français Darrieus est un rotor dont la forme la plus courante rappelle vaguement un fouet à battre les oeufs. Cette machine est bien adaptée à la fourniture d'électricité. Malheureusement, elle ne peut pas démarrer seule.

Ce type de machine, qui peut offrir les puissances les plus fortes n'a pas connu le développement technologique qu'il méritait à cause de la fragilité du mécanisme encore mal maîtrisée. Toutefois, cela devrait pouvoir être résolu si des efforts supplémentaires étaient faits dans la recherche sur ce sujet [7].



Éolienne de type Darrieus

Éolienne de type Savonius

Figure (II-3): éolienne de type Darrieus et Savonius [7]

II .6-Principe de fonctionnement:

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique. Cette Conversion se fait en deux étapes:

- Au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique, en utilisant des profils aérodynamiques. Le flux d'air crée autour du profil une poussée qui entraîne le rotor et une traînée qui constitue une force parasite.
- Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique [7].

II.7-Eléments constitutifs d'un aérogénérateur (Axe horizontale) :

L'aérogénérateur utilise l'énergie cinétique du vent pour entraîner l'arbre de son rotor : cette énergie cinétique est convertie en énergie mécanique qui est elle-même transformée en énergie électrique par une génératrice électromagnétique solidaire au rotor. L'électricité peut

être envoyée dans le réseau de distribution, stockée dans des accumulateurs ou utilisée par des charges isolées [7].

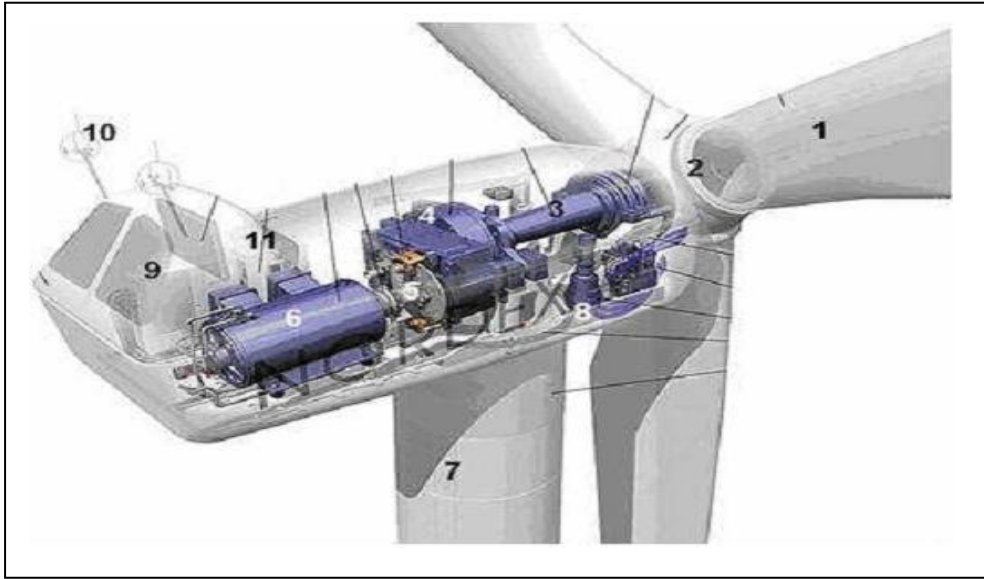


Figure (II- 4): les composantes de l'aérogénérateur [7]

1- Les pales: sont les capteurs de l'énergie cinétique qui transmettent l'énergie au rotor

2 -Le moyeu: il est pourvu d'un système qui permet d'orienter les pales pour regular la vitesse de rotation.

3- L'arbre primaire(ou arbre lent) : relie les pales au multiplicateur.

4-Le multiplicateur: il permet de réduire le couple et d'augmenter la vitesse. C'est l'intermédiaire entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire.

5- L'arbre secondaire: il amène l'énergie mécanique à la génératrice. Il est équipé d'un frein à disque mécanique qui limite la vitesse de l'arbre en cas de vents violents.

6- Le générateur électrique: il assure la production électrique. Sa puissance peut atteindre jusqu'à 5 MW. Il peut-être une dynamo (produit du courant continu) ou un alternateur (produit du courant alternatif). L'alternateur est le plus utilisé pour des raisons de coût et de rendement.

7- Le mât: c'est un tube en acier, pilier de toute l'infrastructure. Sa hauteur est importante : plus elle augmente, plus la vitesse du vent augmente mais en meme temps le coût de la structure augmente. En général, le mat a une taille légèrement supérieure au diamètre des pales.

8- Le système d'orientation de la nacelle: c'est une couronne dentée équipée d'un moteur qui permet d'orienter l'éolienne et de la verrouiller dans l'axe du vent grâce à un frein.

9- Le système de refroidissement: il est à air, à eau ou à huile et destiné au multiplicateur et à la génératrice.

10- Les outils de mesure du vent: girouette pour la direction et anémomètres pour la vitesse. Les données sont transmises à l'informatique de commande.

11- Le système de contrôle électronique: il gère le fonctionnement général de l'éolienne et de son mécanisme d'orientation.

12- Au pied du mât se trouve un transformateur [7]

Les solutions techniques permettant de recueillir l'énergie du vent sont très variées. Deux familles de voilures existent : les aérogénérateurs à axe vertical (VAWT) et à axe horizontal (HAWT). Le graphique de la (Figure II-4) donne une vue sur les coefficients de puissance C_p habituels en fonction de la vitesse spécifique, λ pour différents types d'éoliennes [8].

II .8-Composantes d'une éolienne:

Une installation est généralement constituée d'une éolienne, d'une tour avec de solides fondations et d'un ensemble d'équipements électriques pour le stockage de l'énergie produite ou pour gérer la connexion avec le réseau électrique local. La figure (II-5) présente les composantes d'une éolienne [9] :

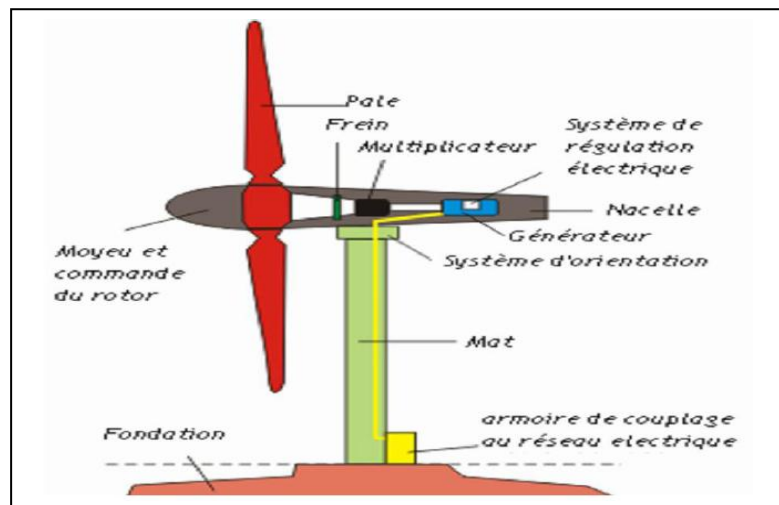


Figure (II -5): Composante d'une éolienne de forte puissance [9]

L'éolienne est pour sa part, composée d'un rotor bi ou tri pale, bien souvent à axe horizontal, d'une génératrice à courant continu ou d'un alternateur et d'une nacelle qui permet de fixer et supporter le rotor et la génératrice.

a. La nacelle :

Regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres primaire et secondaire, multiplicateur, Le frein à disque, différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent). A cela viennent s'ajouter, le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne [10].

b. La tour:

Son rôle est d'une part de supporter ensemble rotor et nacelle pour éviter que les pales ne touchent le sol, mais aussi de placer le rotor à une hauteur suffisante, de manière à sortir autant que possible le rotor du gradient de vent qui existe à proximité du sol, améliorant ainsi la captation de l'énergie. Certains constructeurs proposent ainsi différentes hauteurs de tour pour un même ensemble rotor et nacelle de manière à s'adapter au mieux à différents sites d'implantation.

Trois grands types de tour peuvent se rencontrer:

- ❖ **Tour mât haubané:** de construction simple et moins coûteuse mais s'adresse essentiellement aux machines de faible puissance. Une intervention au niveau de la nacelle nécessite en général de coucher le mât [10].
- ❖ **Tour en treillis:** sont les moins chères, mais souvent mal acceptées et très peu utilisées. Son avantage essentiel est sa simplicité de construction, qui la rend attractive pour les pays en voie de développement. Pour des machines de grande taille, son aspect inesthétique devient un handicap certain.
- ❖ **Tour tubulaire:** est beaucoup plus élégant, mais le prix d'une telle tour peut atteindre trois ou quatre fois celui d'un pylône haubané [10]

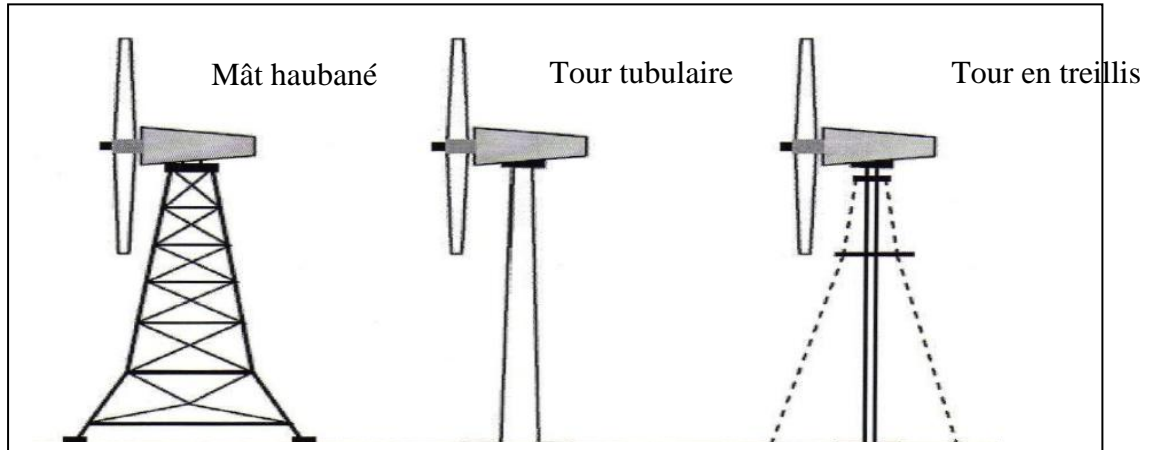


Figure (II -6) : Différents types de tours [11]

c. Le rotor:

Formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3 [10].

d. Le multiplicateur:

Les rotors dont le diamètre est supérieur à 5 m ont des vitesses de rotation trop faibles pour pouvoir entraîner directement un alternateur classique. Il est donc indispensable pour ces machines d'interposer entre l'aéromoteur et l'alternateur un multiplicateur. 3 types de multiplicateurs peuvent être utilisés avec les aéromoteurs :

- Le plus simple est le multiplicateur à engrenages à un ou plusieurs trains de roués dentées cylindriques ; d'une réalisation économique il est tout de même encombrant pour un rapport de multiplication élevé [10].
- L'utilisation de trains planétaires permet de réaliser des multiplications élevées sous un encombrement réduit avec un bon rendement de transmission. Les axes d'entrée et de sortie sont colinéaires voire coaxiaux.
- Le réducteur à couple conique permet une disposition de l'arbre de sortie perpendiculaire à l'arbre d'entrée [10].

e. La génératrice:

C'est un alternateur qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. Les plus simples et robustes sont des générateurs à induction. Il existe plusieurs types de génératrices pour stabiliser la vitesse des moteurs: génératrices à basses vitesses de vent, l'autre pour les hautes vitesses génératrice auto-excitée [12].

Enfin, La nouvelle génératrice discoïde de Jeumont Industrie est une innovation majeure car elle réduit la taille, normalement imposante, de ces alternateurs multipale. Toutefois, le courant produit doit passer par un onduleur de grande puissance. Il s'agit là aussi d'une technologie de pointe [12].

II -8. Les pales d'éolienne:

Une pale d'éolienne extrait l'énergie cinétique du vent et la transforme, grâce à sa connexion avec le rotor, en mouvement de rotation. Le phénomène de portance aérodynamique est au coeur du principe de fonctionnement.

Les pales forment une partie très importante des éoliennes. De leur nature dépendront le bon fonctionnement et la durée de vie de la machine ainsi que le rendement du moteur éolien [10].

Cependant, il est bon de savoir que les pales déterminent grandement le rendement de l'éolienne et ces performances. Concevoir une pale revient à déterminer:

- **La longueur de la pale :** Le diamètre de l'hélice est fonction de la puissance désirée. La détermination de ce diamètre fixe aussi la fréquence de rotation maximum, que l'hélice ne devra pas dépasser pour limiter les contraintes en bout de pales dues à la force centrifuge. Il est essentiel de prendre en compte le travail en fatigue des pales et les risques de vibrations, surtout pour les très longues pales [13].

Pour les roues à marche lente, ayant une inertie importante, le diamètre reste limité à 8 m à cause de leur comportement lors de rafales de vent. Pour les roues à marche rapide, la longueur des pales peut être grande, supérieure à 30m.

- **Le calage initial et le gauchissement de la pale:** ils seront déterminés afin d'avoir tout au long de la pale un angle d'attaque optimum pour le régime de rotation du rotor correspondant à la vitesse du vent nominale. C'est à dire la vitesse de vent pour laquelle l'éolienne a le meilleur rendement [13].
- **Les matériaux de fabrication de la pale :** le choix des matériaux est une étape importante. En effet, le matériau détermine le procédé de fabrication, le coût, la durée de vie et la fiabilité des pales qui subissent beaucoup de contraintes en fatigue. Le matériau idéal doit être léger, résistant, homogène pour avoir des pales de même masse, facile à mettre en oeuvre pour diminuer le coût, résistant à l'érosion et à la Corrosion. Certains types de bois, certains métaux, mais aujourd'hui surtout des matériaux composites répondent aux critères requis [13].

- **Nombre de pales:** Le nombre de pales B , que l'éolienne possèdera influence aussi le design de la pale. Le nombre de pale est déterminé en fonction de la vitesse spécifique λ , et du couple à fournir. Lorsque la vitesse spécifique est fixée, une valeur pour le nombre de pale est recommandée. Ainsi pour $4 < \lambda < 10$ le nombre de pale recommandé se situe entre 1 et 3 inclusivement (Figure (II-7)) [14].

Les éoliennes à marche lente ont en général entre 20 et 40 ailettes et ont un couple de démarrage proportionnel au nombre de pales et au diamètre ; leur rendement par rapport à la limite de Betz est faible car leur vitesse en bout de pale est limitée.

Les éoliennes à marche rapide sont généralement bipales ou tripales. La roue bipale est la plus économique et la plus simple mais elle est génératrice de vibrations qui peuvent être importantes. La roue tripale présente moins de risques de vibrations, d'où fatigue et bruit plus faibles, mais elle est plus compliquée et plus lourde [10].

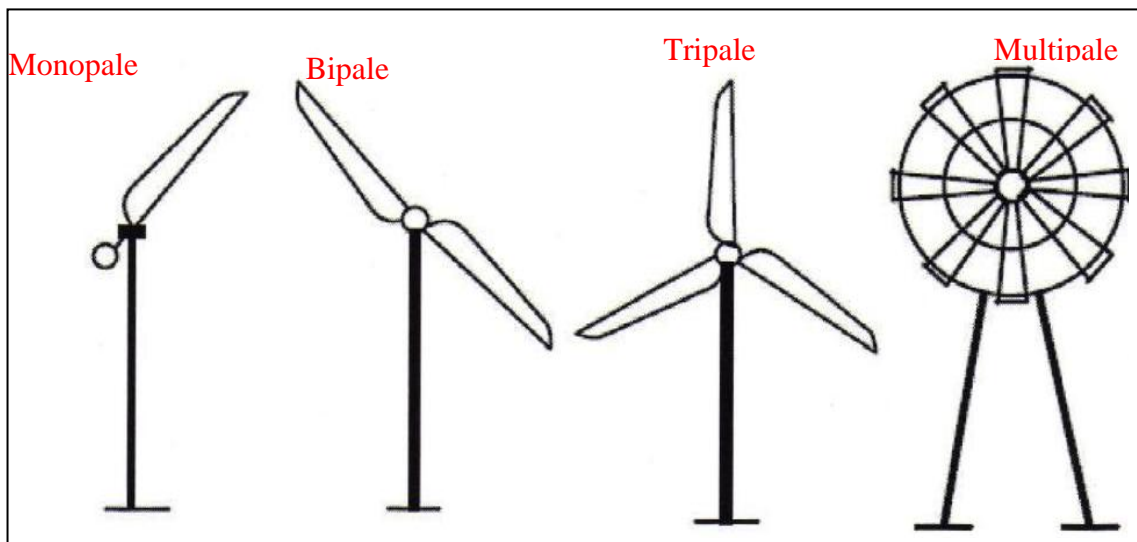


Figure (II-7): Classification des éoliennes à axe horizontal selon le nombre de pales [11]

II.9-Force de poussée sur une pale d'éolienne :

Une équation permet de calculer la force de poussée, F , ou la force résistive de l'air sur une pale [4,8]:

$$F = \frac{1}{2} \rho \cdot V^2 \cdot A \cdot C_x \quad (\text{II-1})$$

Où :

C_x : coefficient de traînée

A : surface projetée perpendiculairement à l'écoulement

ρ : masse volumique de l'air

V: vitesse relative de l'air par rapport à la pale

a. Énergie fournie par le vent:

Le vent fournit une énergie cinétique. En effet, il s'agit d'une masse d'air qui se déplace. L'énergie cinétique est donnée par l'équation suivante :

$$E_C = \frac{1}{2} m \cdot V^2 \quad (\text{II-2})$$

Où :

m: masse du volume de vent ou d'air (kg),

v : vitesse du vent (m/s),

E_c : énergie cinétique (Joule).

b. Puissance dans un écoulement:

Pour une conduite de section A, traversée par le vent soufflant à la vitesse V (m/s), L'énergie récupérable chaque seconde, donc la puissance, peut s'écrire à l'aide de l'équation de l'énergie cinétique, la masse m est alors remplacée par le débit massique (kg/s) pour passer de l'énergie à la puissance. Pour un fluide incompressible, la masse m s'écrit [8] :

$$m = \rho \cdot L \cdot A \quad (\text{II-3})$$

ρ = la masse volumique de l'air

A= la section du tuyau

L= la longueur de tuyau parcourue chaque seconde par le vent.

L'énergie serait alors:

$$E_C = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (\text{II-4})$$

$$E_C = \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 \cdot L \cdot A \quad (\text{II-5})$$

Ou encore Le débit massique s'écrit :

$$m = \rho \cdot v \cdot A \quad (\text{II-6})$$

ρ = la masse volumique de l'air

A = la section du tuyau ou l'aire balayée par le rotor

v = vitesse du vent

La puissance P est :

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot V^2 \cdot A \cdot V \quad (\text{II-7})$$

$$m = \rho \cdot v \cdot A$$

Ou encore :

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot V^3 \cdot A \quad (\text{II-8})$$

L'aire, A, balayée par le rotor est proportionnelle au carré du diamètre D du rotor

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (\text{II-9})$$

L'expression de la puissance en fonction du diamètre sera :

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot v^3 \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (\text{II-10})$$

Si le système éolien à axe horizontal représenté sur la (figure (II-8) sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval [10] :

$$P = \rho \frac{S}{4} \cdot (V_1 + V_2) \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{II-11})$$

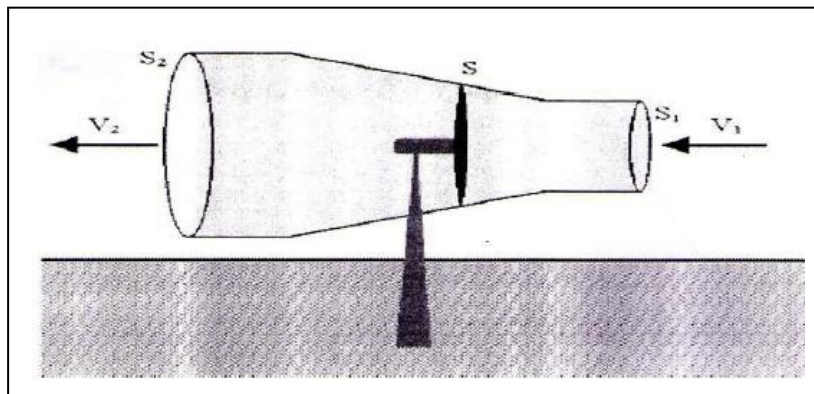


Figure (II -8) : Tube de courant autour d'une éolienne [10].

Nous voyons donc que la puissance dans le vent est proportionnelle au cube de la vitesse du vent et au carré de l'aire balayée par le du rotor. Cependant il y a des limites et nous allons les présenter.

c. Limite de Betz:

La totalité de l'énergie ne peut pas être captée par l'éolienne car la vitesse en aval du rotor n'est jamais nulle. Donc une partie de l'énergie cinétique du vent n'a pas été captée. Le

théorème du physicien Allemand Betz montre que le maximum d'énergie récupérable dans le vent par le rotor est égal à $16 / 27$, soit environ 62 % de l'énergie totale du vent [8].

La notion de coefficient de puissance C_p peut maintenant être présentée. Le coefficient de puissance représente le ratio entre la puissance du rotor et la puissance disponible dans le vent. La notion de coefficient de puissance C_p peut maintenant être présentée. Le Coefficient de puissance représente le ratio entre la puissance du rotor et la puissance disponible dans le vent [8];

$$C_p = \frac{\text{Puissance rotar}}{\text{Puissance vent}} \quad (\text{II-12})$$

En tenant compte de la limite de Betz, $C_{p_{\max}}$ vaut donc $16 / 27$ soit 0.5926 : [8].

$$C_{p_{\max}} = \frac{P_{\text{rotar}}}{P_{\text{vent}}} = \frac{P_{\text{rotar}}}{\frac{1}{2}\rho \cdot A \cdot V^3} = \frac{16}{27} \quad (\text{II-13})$$

La puissance maximale du rotor vaut donc :

$$P_{\text{max rot}} = \frac{16}{27} \cdot \frac{1}{2}\rho \cdot A \cdot V^3 \quad (\text{II-14})$$

En prenant tous les autres rendements d'une éolienne comme celui de la génératrice ou du réducteur, le rendement global d'une machine se situe autour de 50 % de la limite de Betz [8].

$$P_{\text{reellerotor}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{16}{27} \cdot \frac{1}{2}\rho \cdot A \cdot V^3 \quad (\text{II-15})$$

$$\frac{1}{2} = \text{rendement} \quad \frac{16}{27} = C_{p_{\max}} \quad \frac{1}{2}\rho \cdot A \cdot V^3 = P_{\text{vent}}$$

Pour conclure, dans bien des cas on a [11]:

$$P_{\text{reelle}} = 0.29 \cdot P_{\text{vent}} \quad (\text{II-16})$$

II.10-Conclusion:

Dans ce deuxième chapitre, on a présenté les éoliennes, leurs composants, leur classification, les matériaux utilisés pour leur fabrication, leurs avantages ainsi que leurs inconvénients. Nous avons aussi défini les paramètres qui sont utilisés pour leur classification,

notamment, le coefficient de puissance en aboutissant sur la définition du potentiel énergétique éolien.

Références bibliographiques:

- [1] S. Lazaar, « Contribution à l'étude d'une station éolienne pour la production de l'électricité. Application aux sites de Tlemcen, Djelfa et Ghardaïa », Mémoire de Magister, Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen, Unité de Recherche Matériaux et Energies Renouvelable URMER Tlemcen, 2009.
- [2] B. Multon, O. Gergaud, H. Ben ahmed, « Etat de l'art dans les aérogénérateurs électriques », Extrait du rapport de synthèse ECRIN « L'Electronique de Puissance Vecteur d'Optimisation Pour les Energies Renouvelables », 2002.
- [3] P. Leconte, M. Rapin et E. Szechenyi, Techniques de l'Ingénieur, traité Génie mécanique, Réf : BM 4 640.
- [4] M. Ben medjahed, « Gisement éolien de la région côtière de Béni Saf Et son impact sur l'environnement », mémoire de Magister, Université Abou Bekr Belkaïd Tlemcen, Unité de Recherche Matériaux et Energies Renouvelable URMER Tlemcen. 2008.
- [5] Liuchen Chang, « Systèmes de conversion de l'énergie éolienne », IEEE Canadian Review-Summer / Été, pp. 1-5. 2002.
- [6] Site Internet, www.rncan.gc.ca/penser. Programme d'encouragement aux systèmes d'énergie renouvelables.
- [7] Bogdan, SB, Salameh, ZM, « Methodology for optimally the combination of a battery bank and PV array in a wind/PV hybrid system ». IEEE transaction on Energies conversion 11(2), 367-375, 1996.
- [8] A. Mirecki, « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance ». Thèse Doctorat, L'institut national polytechnique de Toulouse 2005.
- [9] T. Philippe, Th. Claude, « Etude d'une éolienne ». Projet technologique. Université de Québec. TCH-090-095. 2007.
- [10] <http://www.windpower.org/fr/core.htrn>.
- [11] M. Sathyajith, « Wind Energy », Fundamentals, Resource Analysis and Economics, Inde, 2006.
- [12] B. Denis, V. Paredes, « l'énergie éolienne », INSA, Lyon
- [13] G. Cuntty, « Guide de l'énergie éolienne; Éolienne et aérogénérateurs ». Edisud Ed. 2001.

[14] http://www.eoltec.comfr/Main_fr.htm

[15] World Energy Outlook 2002. IEA Publications

III.1-Introduction :

La terre est animée d'un mouvement de rotation autour de l'axe des pôles (NORD SUD). Le centre de la terre décrit une ellipse ayant le soleil comme foyer. Au lieu de faire l'étude de la terre autour du soleil et de son axe ; il est plus important pour notre étude de s'intéresser au mouvement apparent du soleil dans la sphère céleste.

Sur le plan humain, le soleil a une importance primordiale car il est à l'origine de la vie sur terre, en lui fournissant d'énormes quantités d'énergie, qui permet la présence de l'eau à l'état liquide et la photosynthèse des végétaux. Le rayonnement solaire est aussi responsable du climat et des phénomènes météorologiques [1].

III.2- Généralités sur le soleil :**III .2.1-Le soleil :**

Le soleil est une sphère gazeuse composée presque totalement d'hydrogène. Son diamètre est de 1391000 km (100 fois celui de la terre), sa masse est de l'ordre de 2.1027 tonnes [2].

Toute l'énergie du soleil provient des réactions thermo – nucléaires qui s'y produisent. Elles transforment à chaque seconde 564,106 tonnes d'hydrogène en 560,106 tonnes d'hélium, la différence (4 millions de tonnes) est dissipée sous forme d'énergie ($E=mc^2$), ce qui représente une énergie totale de 36.10^{22} kW. La terre étant à une distance de 150.10^6 km du soleil, elle reçoit approximativement une énergie de $1,8.10^{14}$ kW [2].

III .2.2-La constante solaire :

La valeur du rayonnement solaire " I_c ", reçu par une surface perpendiculaire aux rayons solaires placée à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre (soit à environ 80 Km d'altitude) varie au cours de l'année avec la distance Terre/Soleil. Sa valeur moyenne " I_0 " appelée constante solaire est de l'ordre de 1354 W.m^{-2} .

En première approximation, on peut calculer la valeur de " I_c " en fonction du numéro du jour de l'année " n_j " par la relation suivante [3] :

$$I_c = I_0 [1 + 0.033 \cdot \cos(0.984 \cdot n_j)] \quad (\text{III-1})$$

III.3- Position du soleil :

Les ondes électromagnétiques provenant du soleil portent l'énergie, la projection de cette énergie dépend de l'orientation de la surface réceptrice. Pour récupérer le maximum d'énergie en provenance du soleil, il est nécessaire d'orienter au mieux le récepteur par rapport aux rayons lumineux. La connaissance de la position du soleil en fonction du temps est primordiale.

III.3.1-Coordonnées géographiques terrestres :

Ce sont les coordonnées angulaires qui permettent de repérer un point sur la terre.

Latitude ϕ :

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 est négative dans l'hémisphère sud [4].

Longitude λ :

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 est négative à l'est de la méridienne origine [4].

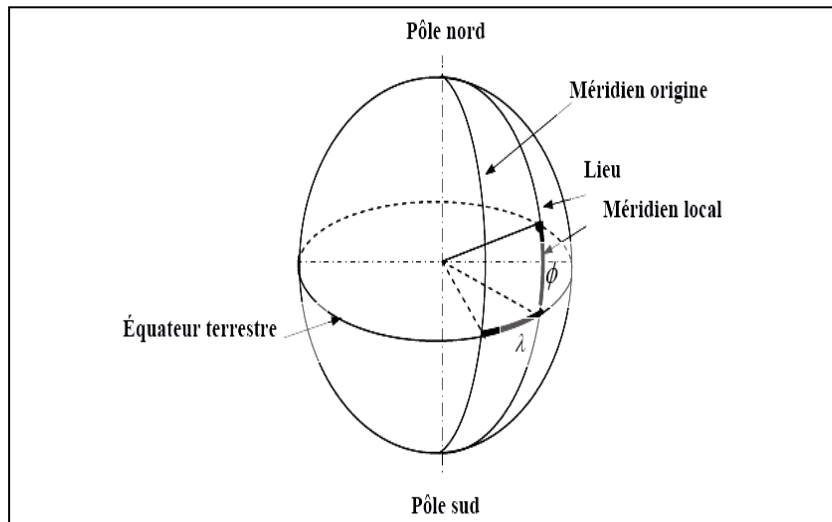


Figure (III.1) : Définition des coordonnées terrestres d'un lieu donné [5].

III.3.2-Déclinaison δ :

C'est l'angle formé par le vecteur Soleil Terre avec le plan équatorial. Elle est due à l'inclinaison de l'axe des pôles terrestre par rapport au plan écliptique, ce qui est traduit par les différentes saisons. Elle varie au cours de l'année entre $-23,45^\circ$ et $+23,45^\circ$.

Elle est nulle aux équinoxes de printemps (21 mars) et d'automne (23 septembre), et maximale aux solstices d'été (22 juin) et d'hiver (22 décembre) [6].

La variation journalière de la déclinaison est d'environ de $0,5^\circ$. Elle est calculée par une équation simple approximative [7] :

$$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(\left(\frac{360}{365}\right)(284 + n)\right) \quad (\text{III-2})$$

Ou par une série de Fourier [4] :

$$\delta = (0,006918 - 0,399912\cos\beta + 0,070257 \sin\beta - 0,00678\cos2\beta + 0,000907\sin2\beta - 0,002697\cos3\beta + 0,00148\sin 3 \beta) \frac{180^\circ}{\pi} \quad (\text{III-3})$$

III.3.3-Angle horaire du soleil (H) :

C'est l'angle que font les projections de la direction du soleil avec la direction de méridien du lieu [8], l'angle horaire du soleil varie à chaque instant de la journée selon la relation :

$$H = 15(TSV - 12) \quad (\text{III-4})$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} TSV = TL - DE + \left(\frac{Et+4\lambda}{60}\right) \\ ET = 9,87\sin2N' - 7,35\cos N' - 1,5\sin N' \\ N' = \frac{360}{365} \cdot (N - 81) \\ DE=+1 \text{ pour l'Algérie} \end{array} \right. (\text{III-5})$$

DE: Décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich ;

TSV : Temps solaire vrai = temps repéré de façon que le soleil se trouve au zénith à midi ;

TL: Temps légal = temps donné par une montre ;

Et : Correction de l'équation du temps ;

λ : Longitude du lieu.

L'angle horaire H varie de -180° à $+180^\circ$.

On prend:

$$\left\{ \begin{array}{l} H>0 \text{ après midi} \\ H<0 \text{ le matin} \\ H=0 \text{ midi TSV} \end{array} \right.$$

III.3.4-Les temps solaires :

III.3.4.1-Le Temps Solaire Vrai (T.S.V) :

Le temps solaire vrai, en un instant et un lieu donné, est l'angle horaire du soleil (ω). Il est donné sous la forme suivante [9] :

$$TSV = 12 + \frac{\omega}{15} \quad (\text{III-6})$$

ω : En degré.

Si $\omega = 0$, TSV=12h.00

Si $\omega < 0$, la matinée.

Si $\omega > 0$, l'après-midi.

III.3.4.2-Le Temps Solaire Moyen (T.S.M) :

Il est appelé parfois temps locale (TSM), Il est donné par la relation [9] :

$$Et = TSV - TSM \quad (III-7)$$

Avec :

Et : l'équation du temps, qui corrige le T.S.V par rapport au T.S.M.

$$Et = 9.87 \sin(2N') - 7.53 \cos(N') - 1.5 \sin(N') \text{ [min]}$$

$$N' = (nj - 81) \cdot \frac{360}{365}$$

Où : nj est le numéro du jour dans l'année.

III.3.4.3-Le Temps Universel (T.U) :

C'est le temps civil moyen du méridien de Greenwich (méridien origine) appelé encore GMT (Greenwich Mean Time) [9]:

$$TU = TSM - \left(\frac{L}{15}\right) \quad (III-8)$$

Où : L : est la longitude.

$L > 0$; pour les villes situées à l'Est de Greenwich.

$L < 0$; pour les villes situées à l'Ouest de Greenwich.

$TU = TSM$; pour le méridien de Greenwich.

III.3.4.4-Le Temps Légal (T.L) :

C'est le temps officiel d'un état, il est donné par [9] :

$$TL = TU + \Delta H \quad (III.9)$$

Où :

ΔH : le décalage horaire entre le méridien de Greenwich et l'état considéré.

$\Delta H = 1$ heure pour l'Algérie.

III.3.4.5-le Temps Civil :

Représente le temps qui a pour origine minuit [9].

III.4-Mouvements de la terre :

La trajectoire de la terre autour du soleil est une ellipse dont le soleil est l'un des foyers. Le plan de cette ellipse est appelé l'écliptique [1,10].

L'excentricité de cette ellipse est faible ce qui fait que la distance Terre/ Soleil ne varie que de $\pm 1,7 \%$ par rapport à la distance moyenne qui est de $149\,675\,106\text{ km}$ [10].

La terre tourne également sur elle même autour d'un axe appelé l'axe des pôles et passant par le centre de la terre appelé l'équateur. L'axe des pôles n'est pas perpendiculaire à l'écliptique en fait l'équateur et l'écliptique font entre eux un angle appelé inclinaison de l'ordre de $23^{\circ}27'$ [1].

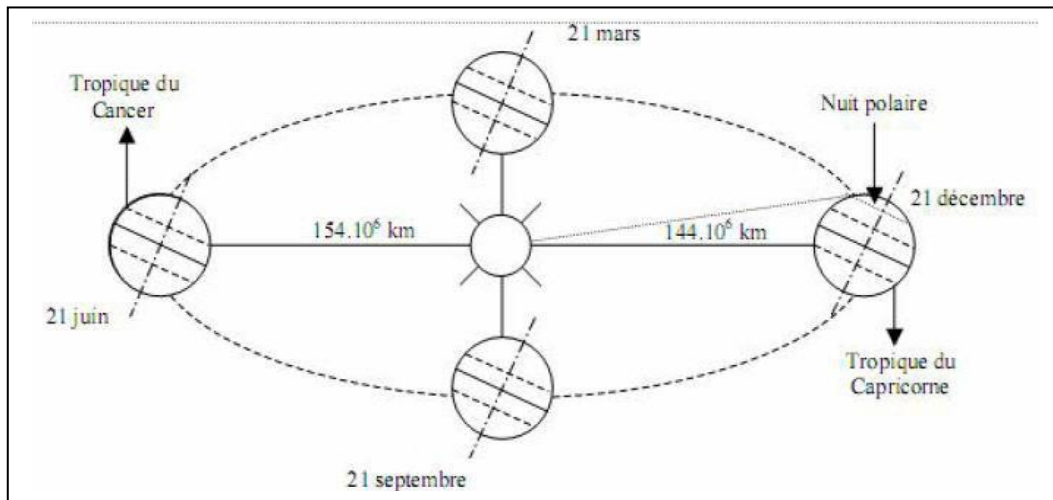


Figure (III.2): Schématisation du mouvement de la terre autour du soleil [10]

a.1. Mouvement de rotation :

La terre tourne autour de l'axe des pôles (Pôle Nord, Pôle Sud) dans le sens trigonométrique.

L'alternance des jours et des nuits est une manifestation immédiate de ce mouvement. On définit le jour solaire comme la durée moyenne entre deux passages consécutifs du soleil au méridien d'un lieu, ce jour est divisé en 24 intervalles égaux appelés heures. La rotation de la terre s'effectue avec une période de [11] :

$$Tr = 23h\ 56mn\ 04s \approx 24s \tag{III-10}$$

La vitesse linéaire de rotation à l'équateur est :

$$Vr \approx 0,465km/s \tag{III-11}$$

Elle est variable en fonction de latitude f telle que :

$$Vr(f) = Vr(\cos(f)) \tag{III-12}$$

a .2.Mouvement de translation :

La terre est en rotation sur elle-même puis elle tourne autour du soleil en une période

$T_t = 365\text{jours } 5\text{h } 48\text{mn } 40\text{s} \approx 365,25 \text{ jours}$. Elle décrit une orbite elliptique dont le soleil occupe l'un des foyers. Cette orbite est située dans un plan appelé plan de l'écliptique où le soleil est presque au centre. Elle est légèrement aplatie, elle correspond à un cercle de rayon moyen de 150 millions de Kilomètres. La terre tourne autour du soleil avec une vitesse moyenne $V_t \approx 29,77\text{km/s}$ [vitesse maximale en hiver $30,27 \text{ Km/s}$ et minimale en été $29,77 \text{ Km/s}$. Ce mouvement s'effectue dans le sens trigonométrique direct et provoque le cycle des saisons [11].

Le plan équatorial, perpendiculaire à l'axe des pôles et passant par le centre de la terre, fait avec le plan de l'écliptique un angle constant appelé obliquité et noté δ_0 qui est égal à $23^\circ 45'$ [11].

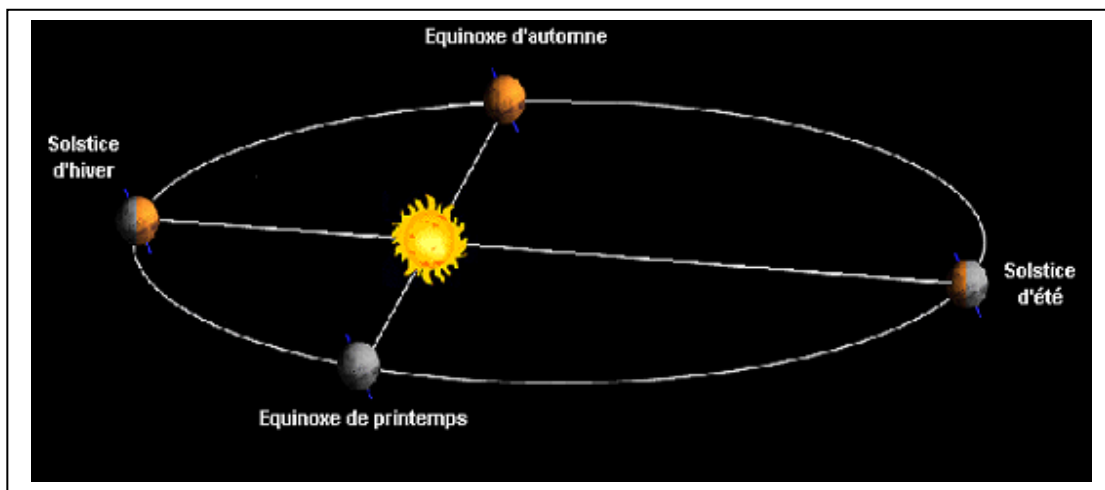


Figure (III-3): Les mouvements de la terre [12]

b. Distance Terre – Soleil :

La variation de la distance terre-soleil en fonction de la date est donnée par la formule suivante [12]:

$$d_{TS}(N) = 1 - 0.017 \cos \left[\left(\frac{360}{365} \right) \cdot (N - 2) \right] \tag{III-13}$$

Avec:

N : le numéro du jour de l'année compté à partir du 1er janvier, il varie de 1 à 365 ou 366

Selon l'année :

- Année civile : $N = (1, 365) \text{ jours}$
- Année bissextile : $N = (1, 366) \text{ jours}$
- d TS (min) = 0,983 UA vers le 2 janvier (Périgée).
- d TS (max) = 1,017 UA vers le 5 juillet (Apogée).

Avec :

$$1UA = 149\,597\,890 \pm 500 \text{ km} \approx 150 \text{ million km}$$

$$1UA = 500 \text{ secondes lumière}$$

$$1UA = 8.3 \text{ mn} - \text{lumière}$$

La Variation de la distance terre-soleil est illustrée par la figure (III-4).

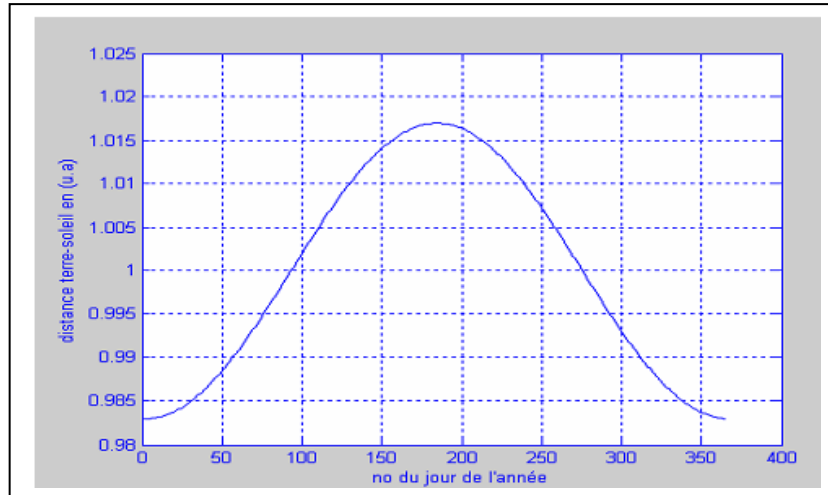


Figure (III-4): Variation de la distance terre –soleil en fonction du nombre du jour de l'année

[1]

III.5-Le spectre de rayonnement solaire :

Le rayonnement électromagnétique est composé de «grains» de lumière appelés photons. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde λ . Le spectre du rayonnement extraterrestre correspond environ à l'émission d'un corps noir porté à 5800 K. Une courbe standard, compilée selon les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom d'AM0. Sa distribution en énergie est répartie en [14]:

Ultraviolet UV : $0.20 < \lambda < 0.38 \text{ nm}$ 6.4%.

Visible : $0.38 < \lambda < 0.78 \text{ nm}$ 48.0%.

Infrarouge IR : $0.78 < \lambda < 10 \text{ nm}$ 45.6%.

III.6-Les différents types de rayonnement :

L'homme est exposé à une grande variété de sources d'énergie naturelles ou artificielles qui émettent un rayonnement sur plusieurs bandes du spectre électromagnétique.

Les rayonnements se déplacent dans le vide à grande vitesse. On peut les considérer comme des ondes ou des particules qui se déplacent en ligne droite.

Les rayonnements électromagnétiques se caractérisent par leur vitesse, leur fréquence et leur longueur d'onde [1].

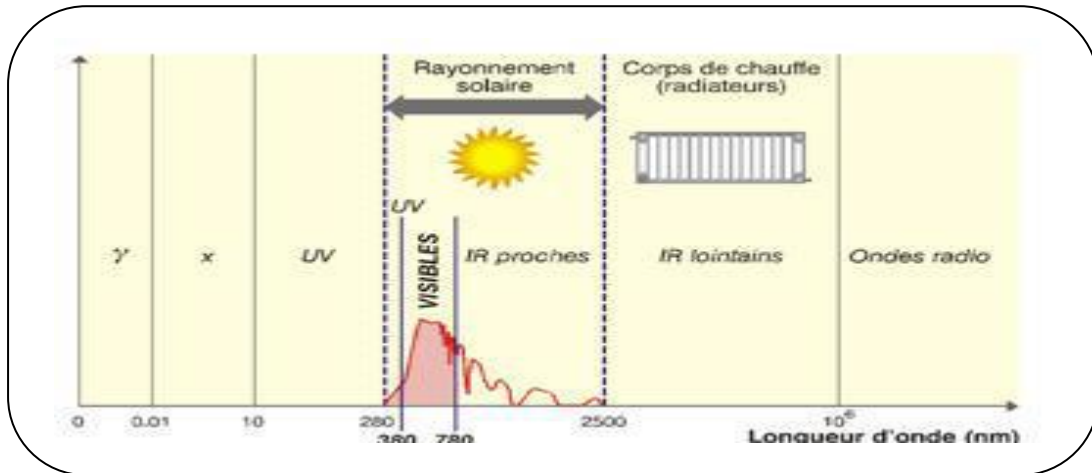


Figure (III.5) : donne une classification de ces rayonnements en fonction de leur longueur d'onde [1].

III.7-Rayonnement solaire [1] :

L'énergie reçue au niveau du sol est plus faible que $13\ 54\ \text{w/m}^2$ (la constante solaire) car l'atmosphère absorbe une partie du rayonnement solaire (environ 15%) et la réémet dans toutes les directions sous forme de rayonnement diffus. L'atmosphère réfléchit une autre partie du rayonnement solaire vers l'espace (environ 6%).

Le rayonnement global au niveau du sol se définit donc comme la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus figure (III.6) L'énergie reçue par une surface dépend en outre de la saison, de la latitude, des conditions météorologiques, du relief, de la pollution, de l'orientation de la surface considérée, etc.

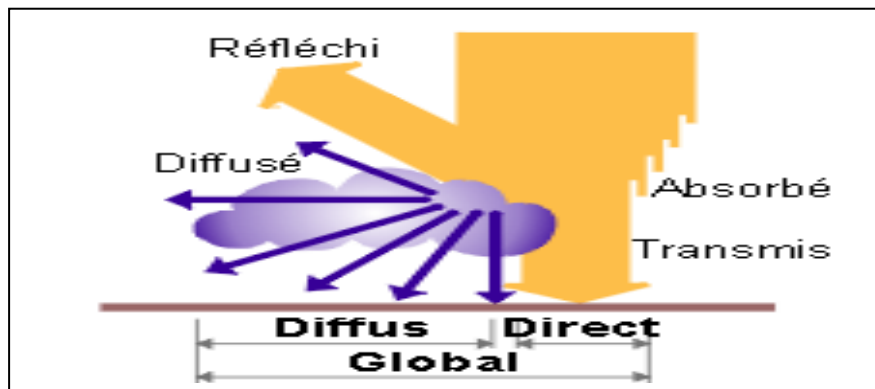


Figure (III.6) : Les composants du rayonnement solaire [1].

- Le rayonnement direct : est la lumière parvenant directement du soleil par ciel clair.
- Le rayonnement diffus : est le rayonnement émis par des obstacles (nuages, sol, bâtiments) et provient de toutes les directions. La part du rayonnement diffus n'est pas négligeable et peut atteindre 50% du rayonnement global (selon la situation géographique du lieu).

Le rayonnement global sur la terre et sa part de rayonnement diffus varie au cours de l'année.

- Le rayonnement global : qui est la somme du rayonnement direct et diffus. Nous exposons dans ce qui suit les expressions et les principales caractéristiques des deux composantes du rayonnement global.

III.8-Rayonnement solaire sur un plan horizontal :

- **Rayonnement direct :**

C'est un flux solaire sous forme de rayons parallèles provenant de disque soleil sans avoir été dispersé par l'atmosphère. Après des mesures pour des heures (i) nous avons l'équation statique pour le rayonnement direct [15] :

$$S_H(i) = 1367 \cdot C(j) \cdot \sin(h(i)) \cdot \exp\left(\frac{T_L}{0,9,9,41M(i)}\right) \quad (\text{III-14})$$

Avec :

S_H : Flux direct horizontal.

$C(j)$: La correction de la distance terre soleil.

$h(i)$: Hauteur du soleil.

T_L : Facteur de trouble.

$M(i)$: Nombre d'aire masse.

- **Rayonnement diffus :**

C'est la partie du rayonnement provenant du soleil, ayant subi multiples réflexions (dispersions), dans l'atmosphère. Pour un observateur le rayonnement diffus (D) par l'heure i est statistiquement donné par [15]:

$$D_H(i) = \frac{1367}{3} \times C(j) - \sin[h(i) - 2] \times \exp\left[-\log^2\left(\frac{T_L}{22 \times M(i) 22 \times M(i)^{-0,65}}\right)\right] \quad (\text{III-15})$$

- **Rayonnement réfléchi :**

C'est la partie de l'éclairement solaire réfléchi par le sol, ce rayonnement dépend directement de la nature du sol (nuage, sable...). Il se caractérise par un coefficient propre de la nature de lien appelé Albédo (ξ) [15] : $0 \leq \xi \leq 1$

- **Rayonnement global (Φ_{GH}) :**

Un plan reçoit de la part du sol un rayonnement global qui est le résultat de la superposition des trois compositions direct, diffus et réfléchi [15]:

$$\Phi_{GH} = S_H + D_H + R_H \quad (\text{III-16})$$

III.9-Rayonnement solaire sur un plan incliné :

Une surface inclinée rapport à l'horizontale avec l'angle β reçoit une puissance énergétique répartie entre le direct ; le diffus, et le réfléchi [16].

➤ Rayonnement direct :

Soit un lieu de latitude φ , le flux est défini par [16] :

$$R_b = \frac{S_B}{S_H} = \frac{\cos(\varphi-\beta).\cos(\delta).\cos(\omega)+\sin(\varphi-\beta).\sin(\delta)}{\cos(\varphi).\cos(\delta).\cos(\omega)+\sin(\varphi).\sin(\delta)} \quad (\text{III-17})$$

R_b : Rapport de flux direct.

S_B : Flux direct pour un plan d'inclinaison.

S_H : Flux direct horizontal.

ω : Déclinaison du soleil.

δ : Angle horaire du soleil.

Alors le flux direct pour le plan incliné B

$$S_B = S_b \cdot S_H \quad (\text{III-18})$$

$$S_B = \frac{\cos(\varphi-\beta).\cos(\delta).\cos(\omega)+\sin(\varphi-\beta).\sin(\delta)}{\cos(\varphi).\cos(\delta).\cos(\omega)+\sin(\varphi).\sin(\delta)} \cdot S_H \quad (\text{III-19})$$

➤ Rayonnement diffus :

Le flux à une inclinaison β et l'altitude φ capté par une surface orientée face au sud-est donné par le modèle suivant [16]:

Pour l'heure i : utilisons le modèle « WILLMOTT »

$$D_b = D_H + [F(i) \cdot \frac{1+\cos\beta}{2} + (F(i)) \cdot \frac{\cos\theta(i)}{\sin h(i)}] \quad (\text{III-20})$$

Avec

$$F(i) = 1 - K_T(i) \cdot \left[1 - \frac{S_H}{\phi_H} \right] \quad (\text{III-21})$$

$$K_T(i) = \frac{\theta_{\phi_H}(i)}{\theta(i)} \quad (\text{III-22})$$

$K_T(i)$: Coefficient de sérénité.

$\Phi(i)$: Angle d'incidence du rayon direct par rapport au plan incliné.

➤ **Rayonnement réfléchi :**

La fraction du flux réfléchi par le sol sur la surface inclinée est proportionnelle au flux global horizontal

$$R_B = \phi_{GH} \left[\xi \cdot \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \right] \quad (\text{III-23})$$

Avec :

Φ : Flux global horizontal.

ξ : Albédo du sol.

➤ **Rayonnement global incliné :**

Il est la superposition des flux direct, réfléchi et refus dont il est la somme des trois composantes:

$$\phi_{GB} = S_B + D_B + R_B \quad (\text{III-24})$$

On peut calculer le flux solaire global par la relation suivante pour un plan incliné d'angle β

R : Rapport du flux global [16].

$$R = \frac{\phi_{GB}}{\phi_{GH}} = \left(1 - \frac{D_H}{\phi_{GH}} \right) \cdot R_b + \frac{D_H}{\phi_{GH}} \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \xi \cdot \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (\text{III-25})$$

Avec :

R_b : Rapport du flux direct

On connaissant le flux global et les composantes du flux pour un plan horizontal on peut déterminer le flux global incliné reçu par un plan [16] :

$$\phi_G = R \cdot \phi_{GH} \quad (\text{III-26})$$

III.10-Coordonnées du capteur :

Un capteur quelconque R est défini par deux angles (γ , α) en coordonnées horizontales [17]

III.10.1-La hauteur de la normale du capteur γ [17] :

$$\gamma \text{ varie entre } -90^\circ \text{ et } +90^\circ \left\{ \begin{array}{l} \gamma < 0 \text{ plan tourné vers bas} \\ \gamma = +90 \text{ plan horizontal tourné vers le Haut} \\ \gamma = -90 \text{ plan horizontal tourné vers} \\ \gamma = 0 \text{ plan vertical} \end{array} \right.$$

III.10.2-Azimut du capteur α :

C'est l'angle que fait la projection de la normale sur le plan horizontal et la direction du sud [17].

$$\alpha \text{ varie entre } -180^\circ \text{ et } +80^\circ \left\{ \begin{array}{l} \alpha > 0 \text{ vers le Haut} \\ \alpha < 0 \text{ vers l'est} \\ \alpha = +90 \text{ EST orienté vers EST} \\ \alpha = -90 \text{ ouest orienté vers l'ouest} \\ \alpha = 0 \text{ Nord orienté vers Nord} \end{array} \right.$$

III.11-Angle d'incidence sur un capteur plan :

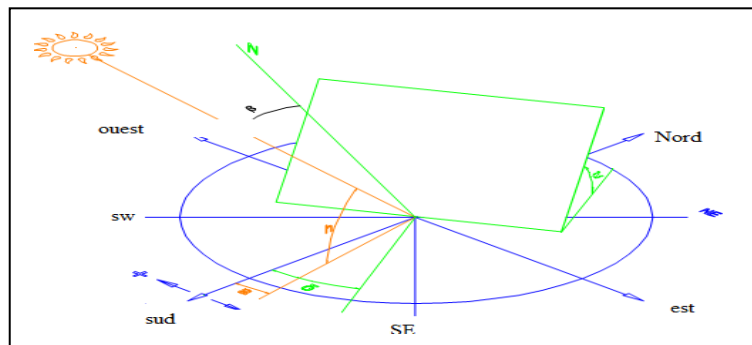


Figure (III-7): positionnement du panneau par rapport au solaire [17]

L'angle d'incidence β (en $^\circ$) est l'angle formé par le rayon solaire incident et la normale au plan récepteur comme indiqué sur la figure (III-7). Cet angle permet de déterminer la composante utile du rayonnement solaire direct : Le calcul de l'angle d'incidence β sur une surface ($i ; \gamma$) de panneaux peut être effectué à l'aide de la formule trigonométrique générale suivante :

$$\cos\beta = | \cosh . \sin i . \cos a - \gamma + \sinh . \cos i | \tag{III-27}$$

Dans le cas des l'orientations fixes et semi - fixes ci-dessus :

a) $i = \Phi$ et $\gamma = 0$:

$$\cos\beta = | \cosh . \sin \Phi . \cos a + \sinh . \cos \Phi | \tag{III-28}$$

b) $(\Phi - 11, 73; 0)$ et $(\Phi + 11, 73; 0)$:

$$\cos\beta = | \cosh \times \sin(\Phi - 11.73) \times \cos a + \sinh \times \cos(\Phi - 11.73) | \tag{III-29}$$

Dès le 21 mars et :

$$\cos\beta = | \cosh \times \sin(\Phi + 11.73) \times \cos a + \sinh \times \cos(\Phi + 11.73^\circ) | \tag{III-30}$$

Dès le 23 septembre.

III.12-Potentiel solaire :

Part sa situation privilégiée, l'Algérie dispose du plus grand gisement solaire du bassin méditerranéen. La durée moyenne d'ensoleillement du territoire algérien dépasse les 2000 heures annuelles, pour atteindre près de 3500 heures d'ensoleillement dans le désert du Sahara. Le total d'énergie reçue est estimé à 169 400 TWh/an, soit 5000 fois la consommation d'électricité annuelle du pays [18].

Tableau (III-1) : potentiel solaire dans l'Algérie [19,21]

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

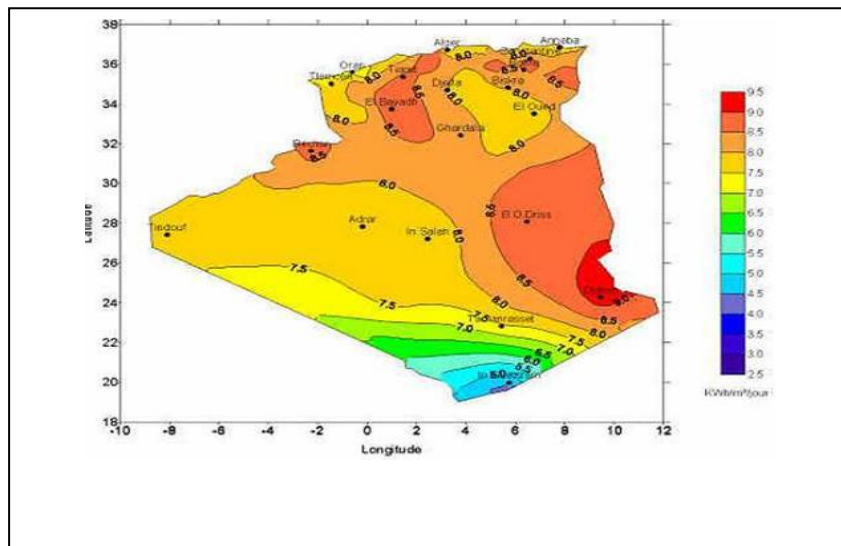


Figure (III-8) : Carte de l'irradiation en Algérie (mois de juillet) [19]

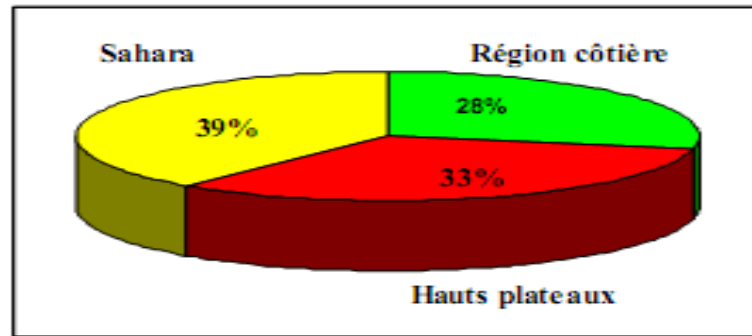


Figure (III-9) : Durée moyenne d'ensoleillement en Algérie [20]

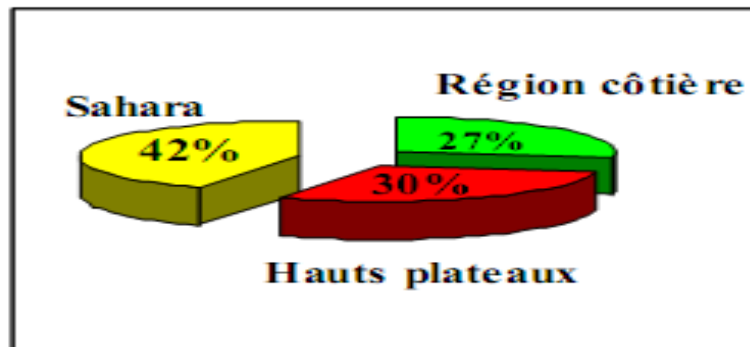


Figure (III-10) : Energie moyenne reçue en Algérie [20]

III.13-Conversion de l'énergie solaire :

L'énergie solaire est transmise à la terre à travers l'espace sous forme de photons et de rayonnement électromagnétique. Cette énergie peut être captée et transformée en chaleur ou en électricité grâce à des capteurs adaptés. Comparée aux différentes formes d'énergies classiques existantes, l'énergie solaire possède les avantages suivants :

- Après avoir recouvert les coûts initiaux de l'installation, l'énergie solaire est pratiquement gratuite.
- L'utilisation de l'énergie solaire remplace l'énergie fossile non propre;
- L'utilisation de l'énergie solaire permet de diminuer de façon significative les émissions des gaz à effet de serre;

L'énergie du soleil peut être utilisée de différentes façons en employant trois grandes Technologies soient, l'énergie solaire passive, l'énergie solaire active et l'énergie Photovoltaïque [22].

III.13.1-L'énergie solaire passive :

Elle remplace avantageusement les énergies conventionnelles utilisées pour chauffer ou refroidir les bâtiments. L'énergie solaire passive, capable de fonctionner seule sans apport

d'énergie extérieure, elle utilise l'architecture des bâtiments, l'orientation des murs, toits et fenêtres pour capter les rayons du soleil [22].

III.13.2-L'énergie photovoltaïque :

Par l'utilisation de panneaux photovoltaïques, une partie du rayonnement solaire est directement transformée en électricité. Ces panneaux solaires sont composés de cellules photovoltaïques constituées principalement de silicium. Le principe de l'obtention du courant par les cellules photovoltaïques se nomme effet photoélectrique, qui consiste à l'émission d'électrons par un matériau soumis à l'action de la lumière.

Cette production d'énergie électrique peut alors être stockée dans des batteries ou convertie à l'aide d'un onduleur pour être distribuée dans le réseau électrique [22].

III.13.3-L'énergie solaire active :

À l'aide de capteurs solaires, le capteur solaire actif transforme les rayons solaires en énergie thermique. Il emploie une source d'électricité supplémentaire pour actionner des pompes ou des ventilateurs qui distribuent l'énergie solaire à l'intérieur du bâtiment. Celle-ci est acheminée vers un autre endroit, ou elle sera utilisée immédiatement ou stockée en vue d'un usage ultérieur. Le transfert de chaleur s'effectue au moyen d'un fluide caloporteur, qui peut être de l'eau, de l'antigel ou de l'air.

On utilise les systèmes solaires actifs principalement pour le chauffage de l'air et de l'eau. Il existe d'autres applications telles que la climatisation, le séchage de produit, la détoxification d'eau contaminée et la production d'énergie électrique d'origine thermique. Les systèmes solaires actifs ont plusieurs applications. Essentiellement, on distingue deux grandes catégories. Le système de chauffage solaire de l'eau, et le système de chauffage solaire de l'air qui est le thème de cette étude [22].

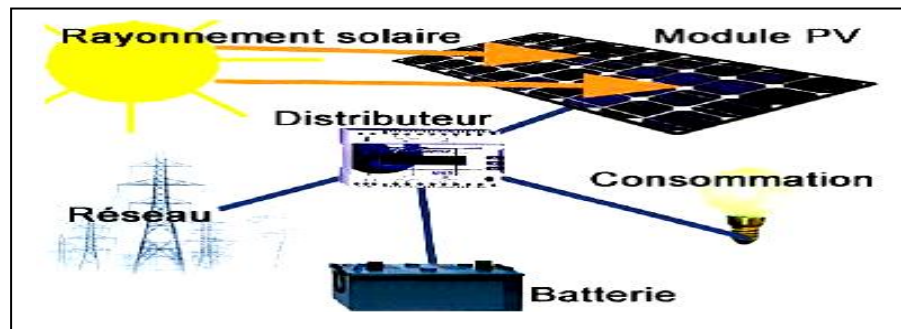
III.14-Energie solaire photovoltaïque :

III.14.1-Définition :

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) provient de la conversion directe de l'énergie provenant de photons, compris dans le rayonnement lumineux (solaire ou autre) en énergie électrique. Elle utilise pour ce faire des modules photovoltaïques composés de cellules ou de photopiles fabriqués avec des matériaux sensibles aux longueurs d'ondes du visible qui réalisent cette transformation d'énergie [23].

L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique statique courant-tension $I(V)$ non linéaire et

présentant un point de puissance maximale (PPM). Cette caractéristique dépend du niveau d'éclairement et de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de l'ensemble [24].



Figure(III.11) : Système Photovoltaïque. [25]

III.14.2-Avantages et inconvénients de la technologie photovoltaïque :

III.14.2.1-Avantages:

- Haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du Milliwatt au Mégawatt.
- Coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- Technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant (électricité propre), silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.
- Fonctionnent de façon rentable dans les régions éloignées et dans de nombreuses applications résidentielles et commerciales.
- Flexibilités et peuvent être élargis à n'importe quel moment pour répondre à vos besoins en matière d'électricité.
- Temps de réalisation d'une centrale PV minimum.
- Longue durée de vie.
- Elimination des frais des risques de transport associé des énergies fossiles [26].

III.14.2.2-Inconvénients :

- Fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des Investissements d'un coût élevé.
- Rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % avec une limite théorique pour une cellule de 28%.
- Générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- Tributaries des conditions météorologiques.
- Beaucoup d'appareils vendus dans le marché fonctionnent au 220 à 230V alternatif. Or, l'énergie issue du générateur PV est unidirectionnelle et de faible voltage (< 30V), elle doit donc être transformée par l'intermédiaire d'un onduleur.
- Stockage de l'énergie électrique dans des accumulateurs qui sont les plus souvent des batteries au Plomb. Sachant que les batteries ne doivent pas se décharger à plus de 60% (70% maximum) de leur capacité maximale. En outre, les batteries ont une faible durée de vie (3 à 5ans), ce qui entraîne un surcoût au fonctionnement [26].

III.15-Energie reçue par un capteur photovoltaïque :

Le rayonnement solaire global (G) reçue par un capteur incliné de β par rapport à un plan horizontal est composée de deux rayonnements, direct (S) et diffus (D). Ses rayonnements varient aléatoirement en fonction de la hauteur du soleil, l'angle d'incidence, des intempéries de l'état de visibilité de l'atmosphère .le calcul de ces rayonnement est très compliqué, on utilise des méthodes approchées [27].

a. Estimation de l'énergie instantanée (ciel clair) :

Les puissances du rayonnement direct E_S diffus E_D et global E_G reçues par un capteur (α, γ) incliné de β par rapport au plan horizontal sont données par les relations suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} E_S = \cos(i) e^{\frac{-1}{\beta \sin(h+2)}} \\ \frac{1 + \cos \beta}{\cos \theta} D_H + \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) a * G_H \\ E_G = E_S + E_D \end{array} \right. \quad \text{(III-31)}$$

Avec

$$\left\{ \begin{array}{l} E_D = A' (\sin(h))^{0.4} \\ E_G = A'' (\sin(h))^{B''} \end{array} \right. \quad \text{(III-32)}$$

$$[ES] = [ED] = [EG] = W/m^2$$

DH : éclairement diffus reçu par une surface horizontale.

GH : éclairement global reçu par une surface horizontale.

a* : l'albédo du sol (coefficient de réflexion du sol).

$$a^* = \begin{cases} 0,9 \text{ à } 0,8 & \text{neige} \\ 0,8 \text{ à } 0,4 & \text{sol clair} \\ 0,4 \text{ à } 0,2 & \text{verdure} \end{cases}$$

b. Estimation de l'énergie instantanée (ciel couvert) :

Le ciel couvert est un ciel gris totalement rempli de couches nuageuses, plus ou moins denses optiquement, mais au travers desquelles il n'est pas possible de distinguer le disque solaire, dans ces conditions le rayonnement direct est inexistant et le rayonnement global ne se compose que de rayonnement diffus.

Si la couverture nuageuse est homogène on peut considérer que le rayonnement diffus du ciel est isotrope de même que le rayonnement diffuse du sol. Le rayonnement global par le ciel couvert est [28] :

$$E_G' = E_D' = (1 + K \sin^2 \theta) E_D \quad (\text{III-33})$$

Avec :

K = 0.6 pour le ciel bleu foncée.

K = 0.3 pour le ciel bleu clair.

K = 0.15 pour le ciel bleu laiteux.

c. Estimation de l'énergie journalière incidente :

L'énergie journalière reçue par un capteur plan quelconque dépend en générale de la latitude des couches atmosphériques et des conditions météorologique est donnée par [28] :

$$\begin{cases} E_{jS} = \frac{1}{K} \Delta T \sum_K E_S \\ E_{jD} = \frac{1}{K} \Delta T \sum_K E_D \\ E_{jG} = \frac{1}{K} \Delta T \sum_K E_G \end{cases} \quad (\text{III-34})$$

E : l'énergie instantanée (directe, diffus, globale) incidente sur le capteur.

K : le nombre d'intervalle entre le lever et le coucher sur le capteur.

ΔT : la différence entre le temps du lever et du coucher sur le capteur.

E_j : l'énergie journalière (directe, diffuse ou globale) incidente sur le capteur.

d. Estimation de l'énergie annuelle incidente :

L'énergie annuelle reçue par un capteur d'orientation quelconque est déterminée par un programme de simulation en faisant la somme des énergies journalières [28] :

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{as} = \sum_1^N E_{js} \\ E_{aD} = \sum_1^N E_j D \\ E_{aG} = \sum_1^N E_{jG} \end{array} \right. \quad (\text{III-35})$$

E_a : l'énergie annuelle (directe, diffuse ou globale) incidente sur le capteur.

III.16-Électricité solaire par effet photovoltaïque :

III.16.1-Principe de fonctionnement :

Découvert par le physicien français A. BECQUEREL dès 1839, l'effet photovoltaïque permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires (photon) en électricité (Volt), par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p.

Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p. La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p [24].

Donc ce principe réside en une collision des photons incidents (flux lumineux) avec les électrons libres et les électrons de valence en leur communiquant une énergie ($h\nu$).

- ❖ Si cette énergie est supérieure ou égale à l'énergie de gap de ce semi-conducteur ($E_g = E_C - E_V$), l'électron passe de la bande de valence à la bande de conduction en laissant un trou derrière lui, d'où l'apparition des paires électron-trou dans différents points de la jonction. Donc toute particule minoritaire près de la jonction a une probabilité très forte pour la traverser et la jonction s'oppose uniquement le passage des porteurs majoritaires (Voir Figure III.12).

- ❖ Si les photons ont une énergie très supérieure à E_g , ils passent de la bande de valence à un niveau instable de la bande de conduction. L'excès d'énergie sera transmis sous forme de photons réseau cristallin puis perdue en chaleur et l'électron prendra un niveau stable dans la bande de conduction.
- ❖ Si les photons ont une énergie inférieure à E_g , ils ne seront pas absorbés et leurs énergies ne contribuent pas à la conversion photovoltaïque [29].

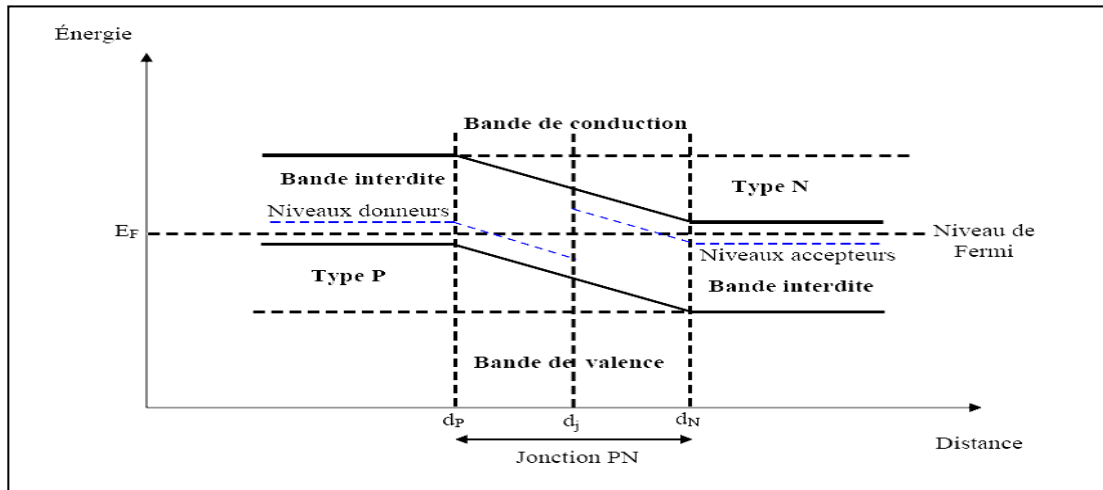


Figure (III.12) : Diagrammes de bandes d'énergie au voisinage de la jonction [29].

III.16.2-Cellules photovoltaïques :

La cellule photovoltaïque est un moyen de conversion de la lumière en énergie électrique par le processus « effet photovoltaïque ». Elle est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore) créant ainsi une jonction P-N avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction P-N de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches.

Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule. A travers une charge continue, on peut en plus récolter des porteurs. La tension maximale de la cellule est d'environ 0,6V pour un courant nul. Cette tension est nommée tension de circuit ouvert (V_{OC}), (Voir Figure III.18). Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, il est appelé courant de court-circuit (I_{CC}) et dépend fortement du niveau d'éclairement [25].

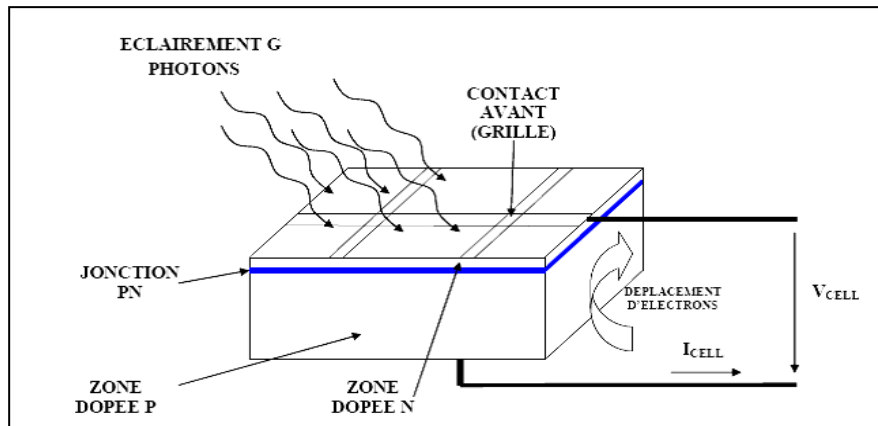


Figure (III.13) : Coupe transversale d'une cellule PV typique. [25]

III.16.3-Fonctionnement des cellules photovoltaïques :

La cellule photovoltaïque est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique. Le régime photovoltaïque est un régime où aucun potentiel n'est appliqué, mais où un courant circule à travers une charge.

Le système développe donc une puissance électrique. Le principe de fonctionnement de la cellule fait appel aux propriétés du rayonnement et celles des semi-conducteurs.

La conversion de photons en électrons dans un matériau pouvant produire un courant électrique nécessite :

- ❖ Absorption des photons par le matériau (absorption optique) et la génération des porteurs de charges.
- ❖ Collecte des porteurs excités avant qu'ils ne reprennent leur énergie initiale (relaxation).
- ❖ Une cellule photovoltaïque produit une tension de 0,5v en circuit ouvert. L'intensité du Courant fourni par cette cellule dépend des conditions environnantes et en fonction de la charge [29].

III.16.4-Différents types des cellules photovoltaïques :

Il existe différents types de cellules solaires ou cellules photovoltaïques. Chaque type de cellule est caractérisé par un rendement et un coût qui lui sont propres. Cependant, quel que soit le type, le rendement reste assez faible : entre 8 et 23 % de l'énergie que les cellules reçoivent. Actuellement, il existe trois principaux types de cellules [28].

III.16.4.1-Cellules monocristallines :

Les cellules monocristallines sont les photopiles de la première génération, elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal (Voir Figure III.19). Son procédé de fabrication est long et exigeant en énergie; plus onéreux, il est cependant plus efficace que le silicium poly cristallin. Du silicium à l'état brut est fondu pour créer un barreau. Lorsque le refroidissement du silicium est lent et maîtrisé, on obtient un monocristal. Un Wafer (tranche de silicium) est alors découpé dans le barreau de silicium [24].

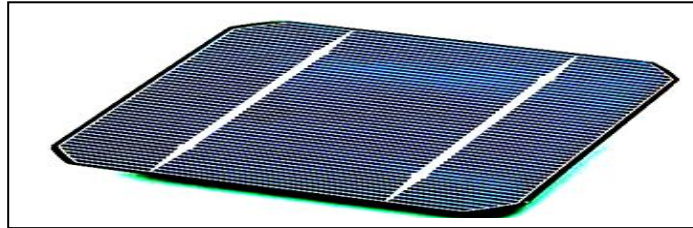
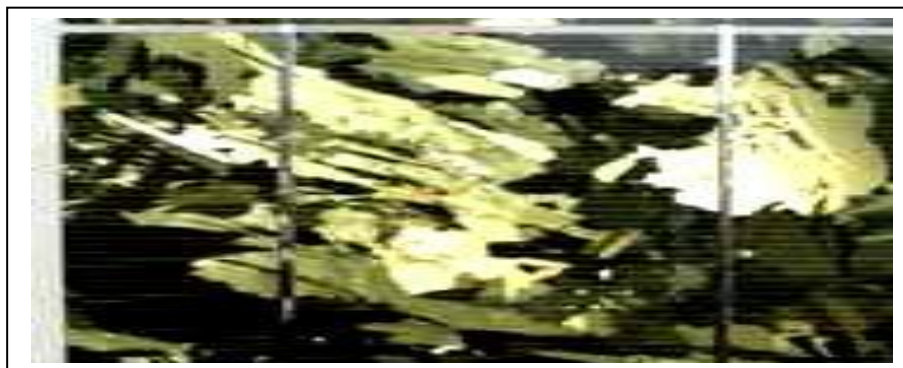


Figure (III.14): Cellule photovoltaïque (monocristalline). [24]

III.16.4.2-Cellules poly cristalline :

Les cellules poly-cristallines sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vus de près, on peut voir les orientations différentes des cristaux, (Voir Figure III.20). Elles ont un rendement de 11 à 15%, mais leur coût de production est moins élevé que les cellules monocristallines. Ces cellules, grâce à leur potentiel de gain de productivité, se sont aujourd'hui imposées.

L'avantage de ces cellules par rapport au silicium monocristallin est qu'elles produisent peu de déchets de coupe et qu'elles nécessitent 2 à 3 fois moins d'énergie pour leur fabrication. Le wafer est scié dans un barreau de silicium dont le refroidissement forcé a créé une structure Poly-cristalline. Durée de vie estimée : 30 ans [24].



Figure(III.15) : Cellule PV poly cristalline [30].

III.16.4.3-Cellules amorphes :

Les modules photovoltaïques amorphes ont un coût de production bien plus bas, mais malheureusement leur rendement n'est que 6 à 8% actuellement. Cette technologie permet d'utiliser des couches très minces de silicium qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide.

Le rendement de ces panneaux est moins bon que celui des technologies Polycristallines ou monocristallines. Cependant, le silicium amorphe permet de produire des panneaux de grandes surfaces à bas coût en utilisant peu de matière première [24].

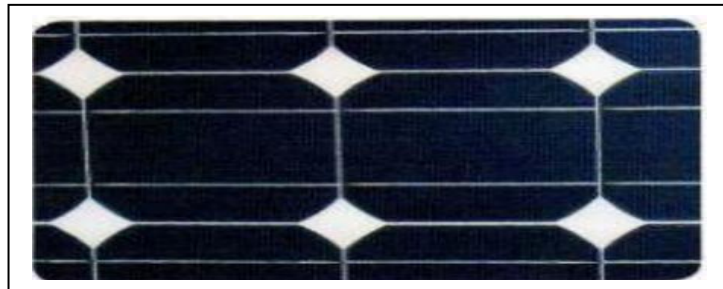
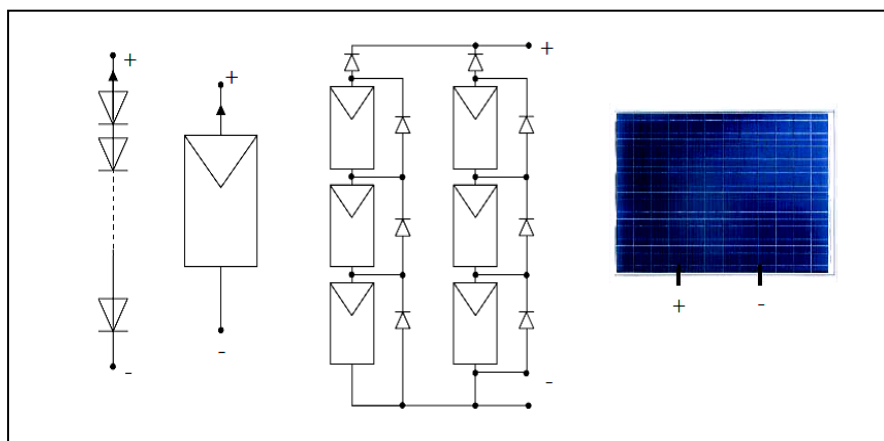


Figure (III-16): Cellule au Silicium amorphe (couche mince) [24].

III.16.5-Modules (ou panneaux) :

Typiquement une cellule photovoltaïque produit moins de 2 watts sous approximativement 0,5 Volt. Alors Pour produire plus de puissance les cellules sont assemblées pour former un module Une association série de plusieurs cellules donne un module et une association série et/ou parallèle de plusieurs modules permet de réaliser un panneau photovoltaïque (Voir Figure III.17) [28].



Figure(III.17) : Cellules, module et panneau photovoltaïques. [28]

Un module photovoltaïque se compose généralement d'un circuit de 36 cellules en série, protégées de l'humidité par un capsulage de verre et de plastique. L'ensemble est ensuite muni d'un cadre et d'une boîte de jonction électrique [28].

Le passage d'un module à un panneau se fait par l'ajout de diodes de protection, une en série pour éviter les courants inverses et une en parallèle, dite diode by-pass, qui n'intervient qu'en cas de déséquilibre d'un ensemble de cellules pour limiter la tension inverse aux bornes de cet ensemble et minimiser la perte de production associée [28].

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. La puissance crête, obtenue sous un éclairage maximal sera proportionnelle à la surface du module. La rigidité de la face avant (vitre) et l'étanchéité sous vide offerte par la face arrière soudée sous vide confèrent à l'ensemble sa durabilité [31].

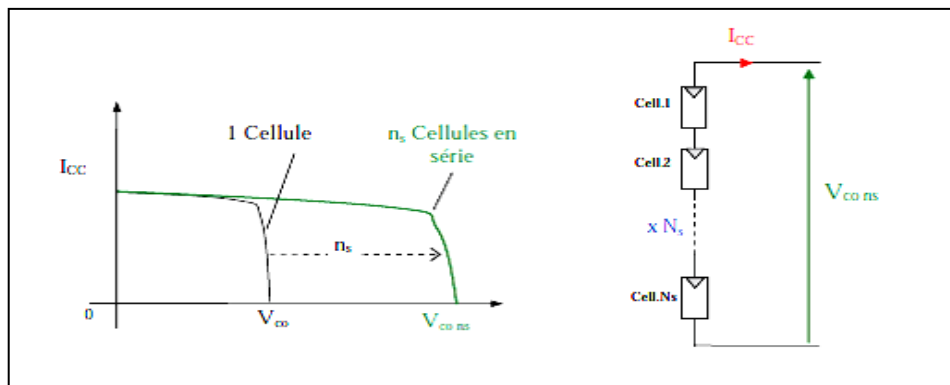
III.16.6-Générateur photovoltaïque :

Dans des conditions d'ensoleillement standard ($1000\text{W}/\text{m}^2$; 25°C ; AM1.5), la puissance maximale délivrée par une cellule silicium de 150 cm^2 est d'environ 2.3 Wc sous une tension de 0.5V . Une cellule photovoltaïque élémentaire constitue donc un générateur électrique de faible puissance insuffisante en tant que telle pour la plupart des applications domestiques ou industrielles. Les générateurs photovoltaïques sont, de ce fait réalisés par association, en série et/ou en parallèle, d'un grand nombre de cellules élémentaires [8].

$$V_{co(n_s)} = n_s \cdot V_{co} \quad \text{Avec :} \quad I_{cc} = I_{cc(n_s)} \quad (\text{III.36})$$

Une association de n_s cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV). Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, (Voir Figure III.18). L'équation (III.36) résume les caractéristiques électriques d'une association série de n_s cellules.

Ce système d'association est généralement le plus communément utilisé pour les modules photovoltaïques du commerce. Comme la surface des cellules devient de plus en plus importante, le courant produit par une seule cellule augmente régulièrement au fur et à mesure de l'évolution technologique alors que sa tension reste toujours très faible. L'association série permet ainsi d'augmenter la tension de l'ensemble et donc d'accroître la puissance de l'ensemble. Les panneaux commerciaux constitués de cellules de première génération sont habituellement réalisés en associant 36 cellules en série ($V_{\text{cons}}=0,6 \times 36=21,6\text{V}$) afin d'obtenir une tension optimale du panneau V_{opt} proche de celle d'une tension de batterie de 12V .



Figure(III.18) : Caractéristiques résultantes d'un groupement de ns cellules en série. [9]

D'autre part, une association parallèle de n_p cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultant du groupement est obtenue par addition des courants.

L'équation (III.37) résume à son tour les caractéristiques électriques d'une association parallèle de n_p cellules.

$$I_{sc(np)} = n_p \cdot I_{sc} \quad \text{Avec : } V_{co(np)} = V_{co} \tag{III.37}$$

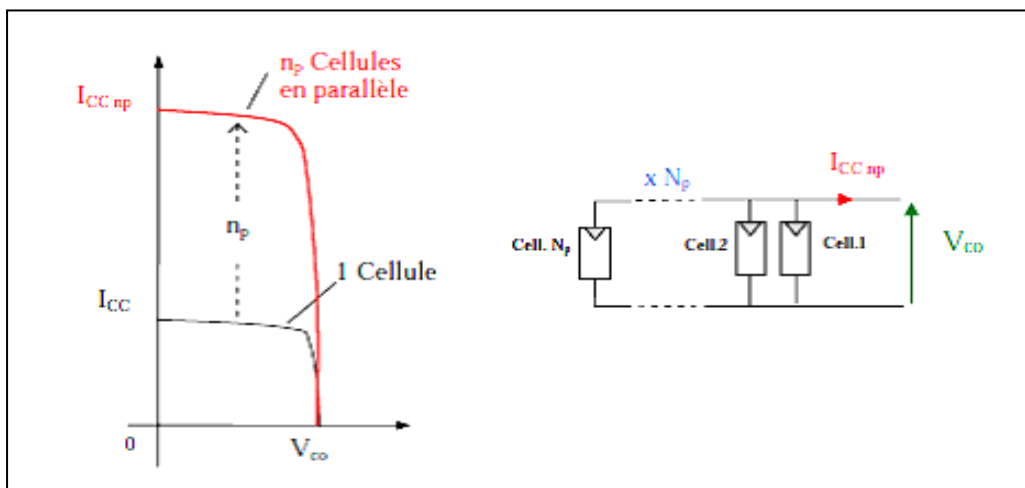


Figure (III.19) : Caractéristiques résultant d'un groupement de n_p cellules en parallèle. [9]

Les deux types de regroupement sont en effet possibles et souvent utilisés afin d'obtenir en sortie des valeurs de tension et intensité souhaités.

III.17- Caractéristiques d'un module [20] :

Voici la description des paramètres d'un module :

La puissance crête PC : puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards (25°C et un éclairement de 1000W/m²).

La caractéristique I (V) : courbe représentant le courant I débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.

Tension à vide V_{co} : tension aux bornes du module en absence de tout courant, pour un éclairage « plein soleil ».

Courant de court circuit I_{cc} : courant débité par un module en court circuit pour un éclairage « plein soleil ».

Point de fonctionnement optimum (U_m, I_m) : lorsque la puissance de crête est maximum en « plein soleil », $P_m = U_m \cdot I_m$.

Rendement maximal : 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 de radiation incidente.

III.18-Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents composants du système de pompage photovoltaïque afin de faciliter l'accès à la modélisation du système. La modélisation de chaque composant du système photovoltaïque complet a été élaborée à partir de modèles cités dans la littérature (champ PV, convertisseurs, stockage batteries); une telle modélisation est une étape essentielle qui permet d'introduire un certain nombre de modèles pour évaluer la caractéristique de chaque élément de l'installation ainsi que les paramètres constitutifs.

Références Bibliographiques :

- [1] J, Bernard. Energie solaire calculs et optimisation, Ellipse Edition Marketing. (2004).
- [2] C, Fröhlich. 1978: World radiometric reference. World Meteorological Organization, Commission for instruments and methods of observation, report WMO 490, p 108-112.
- [3]. Charles Chauliagnet: L'énergie solaire dans le bâtiment, Editions Eyrolle 1981. P22, 32 et p147-148.
- [4] O.DERUELLE, « Mise au point d'un système de spectroscopie pour mesurer des sections efficaces neutroniques applicables à un possible développement du nucléaire comme source d'énergie », Thèse de Doctorat en sciences, Université de Paris XI ; pp.9-12, 2002.
- [5] S.PETIBON, « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, 2009.
- [6] C.P.de BRICHAUMBOT et C.VAUGE, « Le Gisement solaire », Edition tech. & doc, Paris, 1982.

- [7] J. BERNARD, « Energie solaire Calculs et optimisation », Edition ellipses, 2004.
- [8] M. GEYER, and W.B.STINE, « Power From the Sun », Journées de Thermiques, Lyle Center, 2001
- [9] L. BROMAN, J.A. DUFFIE, and E. LINDBERG, « A Concentrated Course in Solar Thermal Process Engineering », 2ed, Inc., ISES Solar World Congress, 1991.
- [10] B. BENYOUCEF, « les énergies renouvelables », Cours de Magister, 2008.
- [11] Pierre Henri Communay: Héliothermiques; Le gisement solaire Méthodes et calculs. Groupe de Recherche et d'Édition-2002.
- [12] Yves Jannot. Thermique solaire. Paris (2007).
- [13] N. Benbouza, « Etude du rayonnement solaire dans la région de Batna », Mémoire de Magister, Université de Batna 2008.
- [14] Michel Daguenet: les séchoirs solaires : théorie et pratique, Unisco, paris; 1985.
- [15] M. Dahbi « Etude et optimisation d'une installation Hybride PV-Eolienne Autonome », Mémoire de magister, option physique énergétique 2007.
- [16] Bouziane khadidja, « Etude D'une Installation Photovoltaïque De Production D'hydrogène Par Electrolyse De L'eau », Mémoire de magister, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2011.
- [17] M. Derri, M. Bouzi, H. Elomari, O. Zebraoui et I. Lagrat, « Modélisation et commande floue d'un système photovoltaïque », 16èmes Journées Internationales de Thermique (JITH 2013) Marrakech (Maroc), du 13 au 15 Novembre, 2013.
- [18] F. Benyarou, « conception assistée par ordinateur des systèmes photovoltaïque modélisation, dimensionnement et simulation ». Thèse de doctorat, Université de Tlemcen, 2004.
- [19] Livre Blanc, GIE Enjeu_Energie_Positive, « Intégration photovoltaïque ».
http://www.enjeu-energie-positive.com/telechargements_GIE/catalogue2011/images/livre_blanc_photovoltaique.pdf
- [20] Said Bentouba, Aek.Slimani, Med.Seghir.Boucherit , Messaoud Hamouda, « L' énergie renouvelable en Algérie et l impact sur l'environnement », 10ème Séminaire International sur la Physique Energétique, Journal of Scientific Research N° 0 vol. 1, 2010.
- [21] Soltane Belakehal, « Conception & Conception des Machines à Aimants Permanents dédiées aux énergies renouvelables », thèse doctorat, université de Constantine, Département d'Electrotechnique, 2010.
- [22] A, Mefti; M, Y, bouroubi; H, Mimouni. Evaluation du potentiel énergétique solaire, Bulletin des Energies Renouvelables, N°2, p 12, décembre. (2002).

- [23] M. HADJ BELKACEMI, «Modélisation et étude expérimentation d'un capteur solaire non vitré et perforé », Mémoire de Master, Université de Tlemcen, juillet 2011
- [24] B. FLECHE, D. DELAGNES, « Energie solaire photovoltaïque », STI ELT Approche générale, Juin 2007.
- [25] C. ZIDANI, F. BENYAROU et B. BENYOUCEF, « Simulations de la position apparente du soleil et estimation des énergies solaires incidents sur un capteur plan photovoltaïque pour la ville de Tlemcen (Algérie) », Revue énergies renouvelables, Vol.6, pp.69-76, 2003.
- [26] F. LASNIER, T.G. ANGEL, « Photovoltaic Engineering Handbook », IOP Publishing Ltd. 1980. ISBN 0-85274-311-4.
- [27] S. Mejdoub; « simulation et optimisation des paramètres photo solaire » thèse de magister, université de Tlemcen ,2001.
- [28] Hassini Belghitri Houda, « Modélisation, simulation et optimisation d'un système hybride Eolien-Photovoltaïque», mémoire de magister, Département de Physique, université Abou-Bakr Belkaid de Tlemcen, 2010.
- [29] B. FELLAH, « Système hybride photovoltaïque-éolien, de production d'électricité. Application aux sites de Tlemcen et de Bouzaréah », Mémoire De Magister, Université de Tlemcen, 2012.
- [30] R. Maouedj, « Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah », Mémoire De Magister, Université de Tlemcen, 2005.s
- [31] B. Flèche et D. Delagnes, « Production D'énergie Electrique : Energie Solaire Photovoltaïque », juin 2007.

IV.1-Introduction :

Pour un développement durable, le recours à l'utilisation des systèmes énergétiques à sources d'énergies renouvelables est devenu indispensable. Les solutions technologiques nouvelles proposées par les systèmes énergétiques hybrides, même si elles sont très complexes comparativement aux solutions courantes mono source, présentent par contre un intérêt évident considérable par leur flexibilité incomparable, leur souplesse de fonctionnement et leur prix de revient vraiment attractif. Ces installations hybrides vont connaître, à moyen terme un intérêt certain grâce à leur flexibilité vis-à-vis des sources d'énergie primaire.

L'objectif de ce chapitre est de présenter les différentes étapes pour la réalisation, l'installation et l'expérimentation du système hybride PV-éolien-batteries.

VI.2-Sélection du site d'installation:

Le choix du site d'installation de l'éolienne est important. Il est en effet déterminant pour l'efficacité du matériel et la production de la génératrice. Car, scientifiquement, la puissance générée est proportionnelle au cube de la vitesse du vent. Ainsi si la vitesse du vent augmente de 10%, la production de la génératrice s'élèvera elle de 37%.

Par ailleurs, quelque soit le site choisi, plus la génératrice sera placée en hauteur, plus la force du vent sera forte, et donc la production sera importante [1-3].

a. Emplacement :

Avant de l'installation de l'aérogénérateur il faut [1-3]:

- Placez votre éolienne dans un couloir de vent repéré par sa direction favorite et sa vitesse moyenne. Un bon couloir de vent s'identifie par un souffle régulier et sans turbulence (évitant tout arbre ou immeuble).
- Installez votre turbine le plus haut possible. En effet les vents sont de plus en plus forts et réguliers avec l'altitude. La hauteur minimum du mât est de 7m au-dessus du niveau du sol sans obstacle. Un mât autoporteur occupe moins de surface au sol qu'un mât haubané mais coûte plus cher. Une conception à pivot permet une installation facile et l'entretien au sol, et élimine la nécessité de grimper.
- Les obstacles (arbres, bâtiments, etc.) à la circulation du vent produisent des sillages qui peuvent se prolonger loin derrière et au dessus de cet obstacle. Ces sillages sont des zones où la vitesse de vent est diminuée et où existe des turbulences susceptibles d'endommager le matériel.

- Installez votre éolienne au plus près de ses batteries de façon à réduire les pertes énergétiques dues à la longueur des fils électriques.

Remarque:

Plus la vitesse de vent augmente, plus la puissance produite par l'aérogénérateur Whisper 100 est importante. Ainsi, la puissance de sortie pour un vent de 5m/s est presque deux fois supérieure à celle d'un vent de 4m/s (la puissance sortie de l'éolienne, est en fonction du cube de la vitesse du vent).

- Moins il y a de turbulences de vent, moins l'éolienne devra supporter de pression. Sa puissance de sortie est donc plus forte. Ainsi il est préférable de choisir un site où la vitesse de vent est plus faible mais régulière, qu'un autre où la vitesse de vent est importante mais avec de grandes turbulences.

- Pour éviter ce sillage, il faut placer la génératrice à une hauteur double de celle de l'obstacle situé à moins de 50m; ou à une hauteur de 7m de plus que l'obstacle le plus haut situé dans un rayon de 100m.

VI.3-Aérogénérateur Whisper 100 :

VI.3.1-Les caractéristiques de l'aérogénérateur Whisper 100 :

Tableau (VI- 1): Les caractéristiques de l'aérogénérateur Whisper 100 [2,3].

Modèle Whisper 100 avec contrôleur Whisper	
Diamètre de rotor	2,10 m
Poids	21 kg
Montage	Tube N° 40 Ø 63,5 mm
Vitesse de vent au démarrage	12,1 km / h (3,4 m / s)
Tension	12, 24, 36, 48 V _{DC} reconfiguration
Puissance de crête	900 W à 45 km / h (12,5m / s)
Régulateur de charge	Multi tension avec banc de dissipation
Pales (3)	Polypropylène / carbone
Kilowattheure / mois	100 kWh / mois à 19,3 km/ h (5,4 m / s)
Vitesse de vent maximale	193 km / h (55m / s)
La hauteur du mât	10 m

VI.3.2-Description générale de l'aérogénérateur (vue simplifiée de la Whisper 100) :

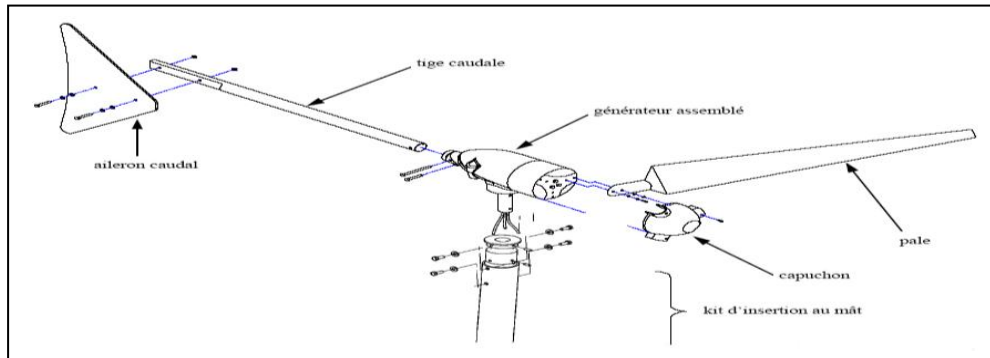


Figure (VI- 1): Présentation simplifiée des composantes de l'aérogénérateur [2,3].

VI.3.3-Kit d'insert du mât :

Pour tube de 2,5 pouces " Schedule 40" (\varnothing ext. 73 mm, ép. 5,1mm)

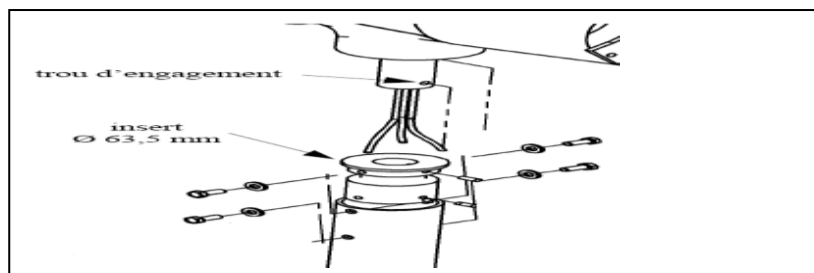


Figure. (VI- 2): Kit d'insert du mât [2,3].

VI .3.4-Installation de la queue:

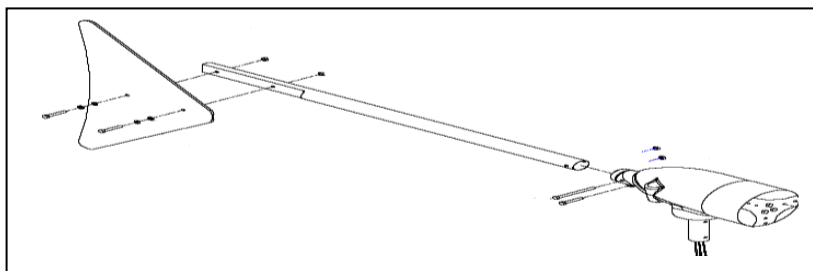


Figure. (VI- 3): Schéma de description générale de l'aérogénérateur [2,3].

VI.3.5-Installation des pales et du capuchon :

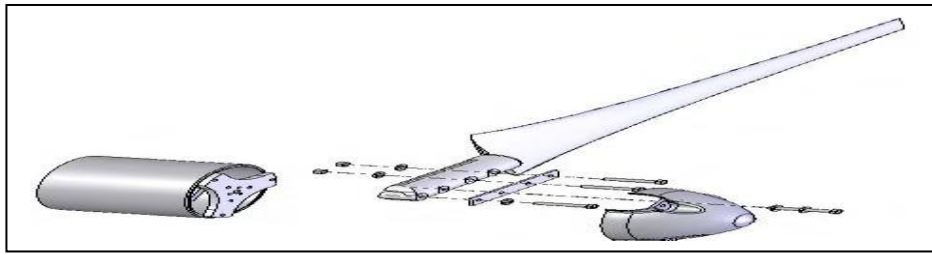


Figure. (VI- 4): Schéma de description de l'installation des pales et du capuchon [2,3].

VI .3.6-Assemblage et levage des mâts :

Il existe deux catégories de mâts, les mâts autoportants (aussi appelés supports autoportants) et les mâts haubanés (voir schéma 5). Les mâts autoportants, ils possèdent une fondation profonde, massive, destinée à les empêcher de basculer vers le sol. Les mâts haubanés, à l'inverse, sont dotés de plusieurs ancrages répartis à bonne distance de la base du mât et reliés à des câbles. Les mâts autoportants sont plus coûteux que les mâts haubanés, mais ils occupent moins d'espace [1].

Les mats en treillis haubanés utilisés pour les petites éoliennes peuvent être assemblés section par section à l'aide d'un mât de levage monté sur le mât. Il est également possible de l'assembler au sol avant de le monter à la verticale à l'aide d'une grue. Le choix de la méthode dépend de la disponibilité d'une grue et de la possibilité de l'acheminer sur le site. Dans les deux cas, les haubans doivent d'abord être coupés à la bonne longueur et attachés aux anneaux soudés sur le mât [1].

Après la hauteur, le critère le plus important pour choisir un mât est sa capacité à supporter les forces qui s'exercent sur lui par les forts vents. Les mâts sont évalués en fonction de la poussée axiale qu'ils peuvent supporter sans tanguer.

Le mât utilisé dans notre réalisation a spécialement été conçu pour l'aérogénérateur Whisper 100. La tour est profilée en acier résistant et maintenue par un haubanage de câbles ce qui simplifie l'installation quelque soit le lieu. Le mât est constitué de deux tronçons qui sont assemblés sur place par soudure. Les dimensions adaptées sont montrées dans les figures 6 et 7. Par ailleurs, le Whisper 100 est conçue pour résister à une force maximum de 500 N dirigée horizontalement, donc ce mât est capable de résister à cette force [2,3].

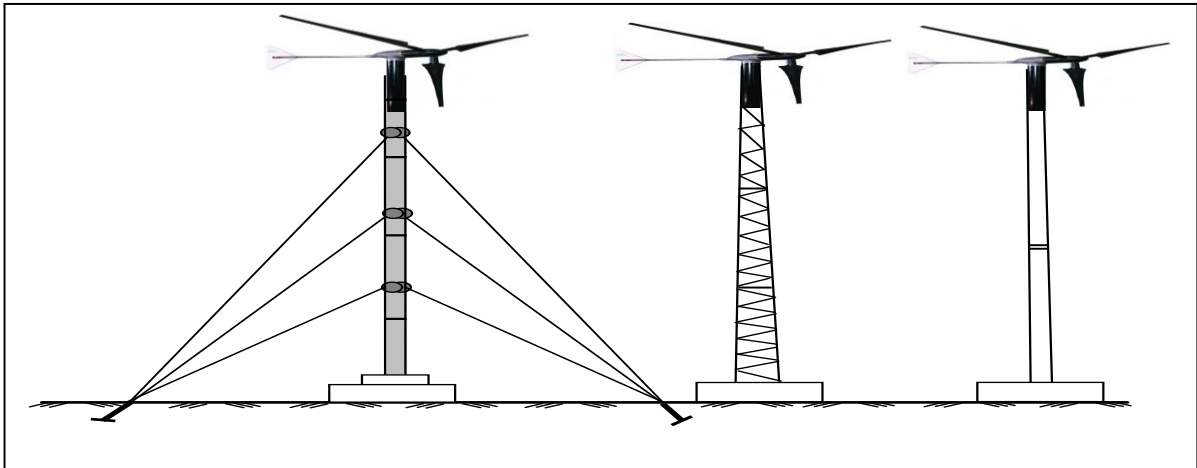


Figure. (VI- 5): les types des mâts. Pour les petites éoliennes, les mâts haubanés (à gauche) sont les plus économiques. Les mâts en treillis autoportant (au centre) et les mâts tubulaires en porte-à-faux (à droite) sont plus coûteux, mais restent des options possibles.

VI.3.7-Fondation, tours et Encrages:

L'importance des fondations est évidemment en rapport avec la puissance des machines et la nature du terrain. Le type d'ancrage ou de pilier utilisé dépend du modèle de mât et de site.

Les encrages doivent supporter les charges statiques et dynamiques qui s'exercent sur l'éolienne, dans toutes les conditions météorologiques et durant toute la vie du système, sans déformation visible du sol ou de surface d'installation. La résistance à l'arrachement des ancrages dépend de la zone d'ancrage, de sa profondeur, de la composition du sol avoisinant et de sa teneur en humidité.

La résistance du sol du fluage est variable. Elle résulte de sa résistance au cisaillement, c'est-à-dire de la résistance des particules du sol, qui empêche de glisser les unes sur les autres.

La résistance au cisaillement dépend du type de sol et de son taux d'humidité. Elle est maximale dans la roche et minimale dans les sols vaseux ou marécageux.

La résistance à l'arrachement d'un ancrage diminue avec l'augmentation du taux d'humidité. Le fluage peut poser problème dans les sols saturés car les particules deviennent fluides et ont tendance à circuler autour de l'ancrage. L'eau accroît également le frottement de l'ancrage. La résistance à l'arrachement peut être réduite de moitié si le sol est humide. Dans la mesure de possible, les ancrages doivent être placés au dessous de niveau de saturation périodique des pluies abondantes, mais au dessus de la nappe phréatique.

VI.3.8-Utilisation du béton:

La méthode la plus courante pour ancrer un mât ou construire un pilier consiste à creuser un trou et à le remplir en partie ou en totalité de béton armé.

Les différents types de béton sont classés en fonction de leur résistance à la compression. La classification du béton s'appuie sur sa résistance minimale après 28 jours de séchage. La résistance est fonction du rapport du ciment et de la température durant le séchage. Plus le rapport eau-ciment est faible (plus la proportion de ciment est élevée) plus le béton sera résistant. La résistance augmente également avec le temps de séchage.

VI.3.9-Fixation de la base du mât:

La fixation du pied est une étape très importante dans l'installation de l'éolienne.

- Sélectionnez un sol plat et ferme.
- Déterminez le sens d'élévation de l'éolienne.
- Fixez à l'aide de béton le pied du mât et les plots d'ancrage suivants les schémas d'installation ci-dessus.

VI.3.10-Montage du contrôleur Whisper:

Le contrôleur de charge limite la tension dans les batteries, soit en déconnectant la turbine de la charge, soit en activant une charge de délestage lorsque la tension souhaitée dans la batterie est atteinte [2,3].

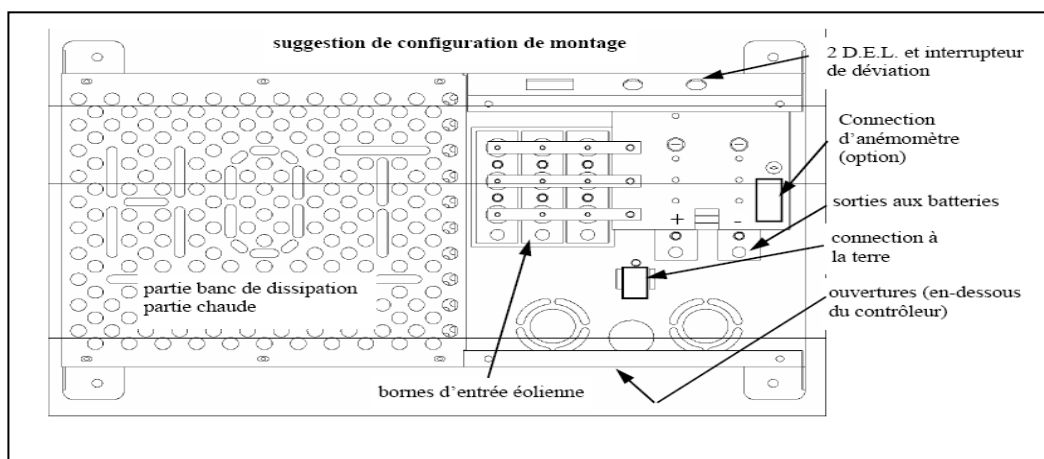


Figure. (VI- 6): Montage du contrôleur Whisper

VI.4-Le champ Photovoltaïque:

Le champ PV est composé de 750W (ET-P660250W silicium polycristallin 250W), Orientés à une position nord-sud, ces modules ont été inclinés du plan horizontal à la latitude du lieu [4-9].

VI.5-Batteries SP100 :

Nous avons utilisé des batteries de type (SP 12V-100Ah) dans le système [10].

Pour le bon fonctionnement du système de stockage, le SOC ne peut évoluer que dans une plage admissible [SOC_{min} : SOC_{max}] et la variation de charge/décharge ne doit pas dépasser une limite. Pour notre système le SOC_{min} et le SOC_{max} sont respectivement (20% of SOC) et (100% of SOC).

- **Configuration et emplacement des batteries:**

Dans les systèmes à énergies renouvelables, des batteries assurent la continuité de l'alimentation entre deux pics de production électrique, entre une nuit sans vent et une journée ensoleillée par exemple.

Les batteries augmentent sensiblement le coût et la complexité d'un système énergétique, elles sont des objets sensibles, Elles n'apprécient ni les surcharges, ni les charges insuffisantes pour éviter les dégradations irréversibles [2,3].

Il est également conseillé d'éloigner les batteries des onduleurs, des interrupteurs et des tableaux électriques, cette précaution prolongera la vie des composants électriques et éliminera le risque qu'une étincelle enflamme l'hydrogène émis par les batteries en période de chargement intensif [2,3].

Les batteries doivent être placées dans un endroit sec, dans un bâtiment inoccupé à température ambiante modérément stable, parce que ces performances sont optimales à ces conditions. Si les batteries sont dans un bâtiment occupé, un boîtier ventilé vers l'extérieur est requis. Pour l'installation des batteries il faut respectées les codes et les règlements suivants [2,3] :

- Déterminez le câblage en série/parallèle pour la tension et la capacité du système et construisez un support avec du bois robuste ou un autre matériau adapté.
- Ménagez 5 cm de tous côtés pour la ventilation.
- Gardez 60 cm verticaux d'espace libre pour l'accès aux terminaux et pour vérifier l'eau.
- Enduisez toute les connections de graisse ou d'un produit de protection contre la corrosion.

- Installez le contrôleur Whisper et le fusible de l'onduleur (si utilisé) à la borne positive des batteries.
- Pour minimiser la possibilité d'interférence électromagnétique, la distance maximum entre les batteries et le contrôleur Whisper ne doit pas dépasser 3 m.

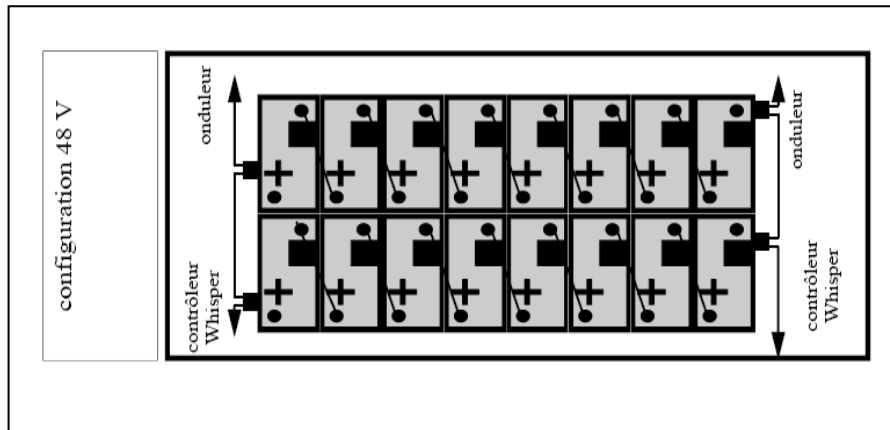


Figure. (VI- 7): Schéma pour la configuration des batteries 24 V

VI.6-Installation recommandée du fusible des batteries:

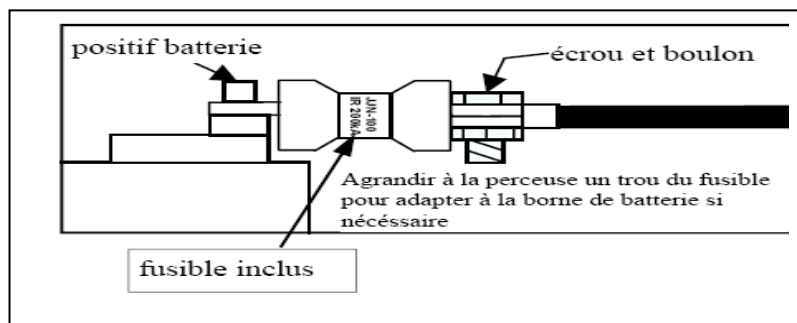


Figure. (VI- 8): Installation du fusible [2,3].

VI.7-Le régulateur de charge 24 V :

Le Steca Tarom est un régulateur de charge solaire spécialement conçu pour les applications de télécommunications ou les systèmes hybrides photovoltaïques [11].

VI.8-Convertisseur d'onde carrée modulée CP 300 :



Figure. (VI- 9): Convertisseur d'onde carrée modulée CP 300

Les convertisseurs d'onde carrée modulée CP 300 ont été conçus pour convertir le courant continu en courant alternatif 220V, 50Hz (autres tensions de fréquences disponibles sur demande), avec une puissance maximale en régime continu de 300W. La série CP intègre un circuit de réalimentation qui maintient la stabilité de la tension de sortie avec une marge de 6%, ce qui garantit en permanence le parfait fonctionnement des charges connectées, ainsi qu'un système de protection contre les surcharges et les courts-circuits. Dans le modèle CP 300, un temporisateur interne se déclenche qui garantit un fonctionnement normal du matériel pendant la période de surcharge détectée. En cas de court-circuit, le fonctionnement de l'étage de puissance s'arrête immédiatement [12,13].

Ce modèle est doté d'un système de protection pour éviter que la tension d'entrée soit inférieure à la valeur minimale autorisée, et d'un capteur permettant de détecter des variations de température interne supérieures aux valeurs admissibles.

Ce convertisseur dispose d'un système de démarrage automatique qui leur permet de rester déconnectés de l'étage de puissance lorsqu'il n'y a pas de consommation [12,13].

VI.9-Câblage du contrôleur Whisper:

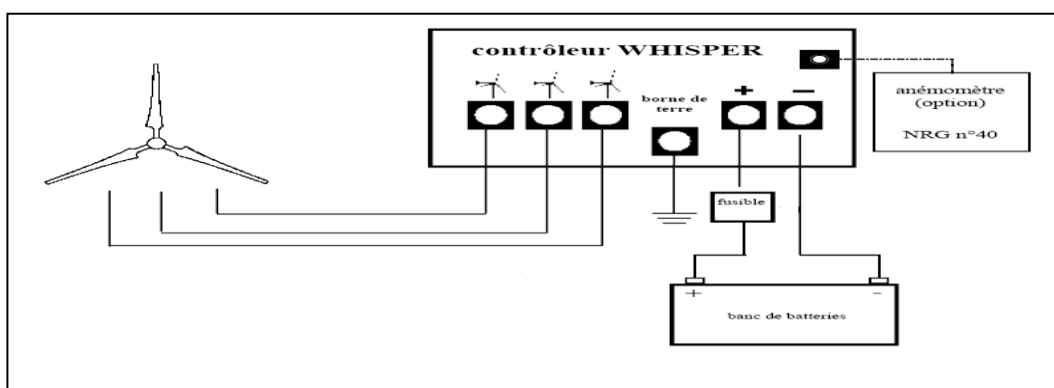


Figure. (VI- 10): Raccordement de l'aérogénérateur avec le contrôleur Whisper et les batteries

[2,3].

VI.10-Présentation des différentes étapes pour l'installation du système [14,15]:



Figure. (VI- 11): Schémas représente les différentes étapes pour le montage des pales avec l'aérogénérateur

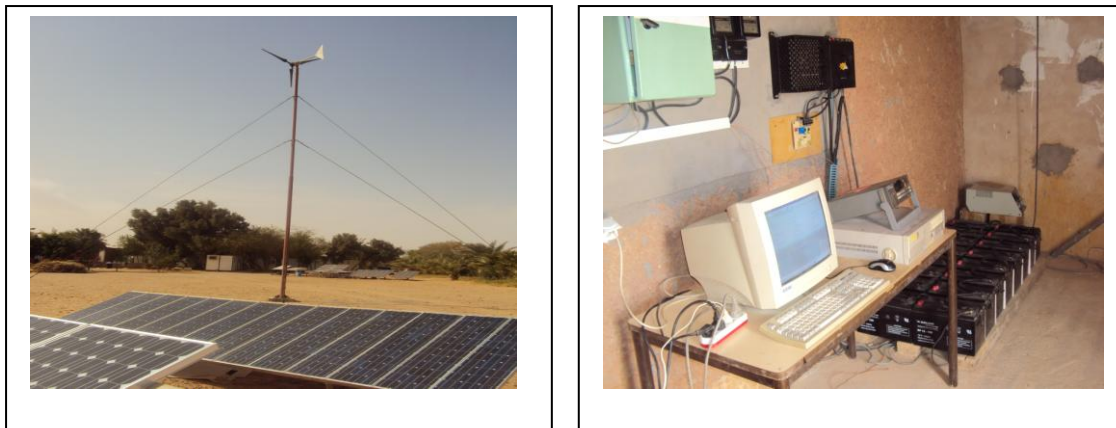


Figure. (VI- 12): Photo du champ PV et de l'aérogénérateur

Figure. (VI- 13): Photos du banc d'essai

Le système hybride PV-éolien, objet de notre étude, a été installé à l'URER/MS [14,15] à Adrar pour subir les tests préliminaires comme cela est montré sur la figure VI-13.

Le système étudié est constitué d'un l'aérogénérateur de type Whisper 100 de 900 W, d'un générateur photovoltaïque de puissance 750W (ET-P660250W silicium polycristallin 250W), un système de stockage est constitué par 16 batteries (SP 12V-100Ah) de type plomb-acide, de tension nominale de 12 V et de capacité nominale de 100Ah. Ces batteries sont chargées par le courant débiteur par chacun des systèmes, le contrôle de leur charge est assuré par un régulateur de charge.

Nous avons opté pour l'installation d'un champ photovoltaïque de six modules, orienté plein sud et incliné de 28 ° par rapport à l'horizontale (latitude du lieu).

Durant notre période des tests, les différents paramètres mesurés sont :

- L'éclairement solaire incident sur un plan incliné de 25 par un pyranometer CM 11 de type Kipp & Zonen.
- Mesure de la vitesse du vent à 10 m d'altitude.
- Mesure des températures : ambiante, du panneau solaire (à l'arrière des modules PV) et des batteries par des thermocouples J-.
- L'énergie produite par le champ PV et de l'aérogénérateur Whisper 100.
- Profil de consommation horaire et journalière.

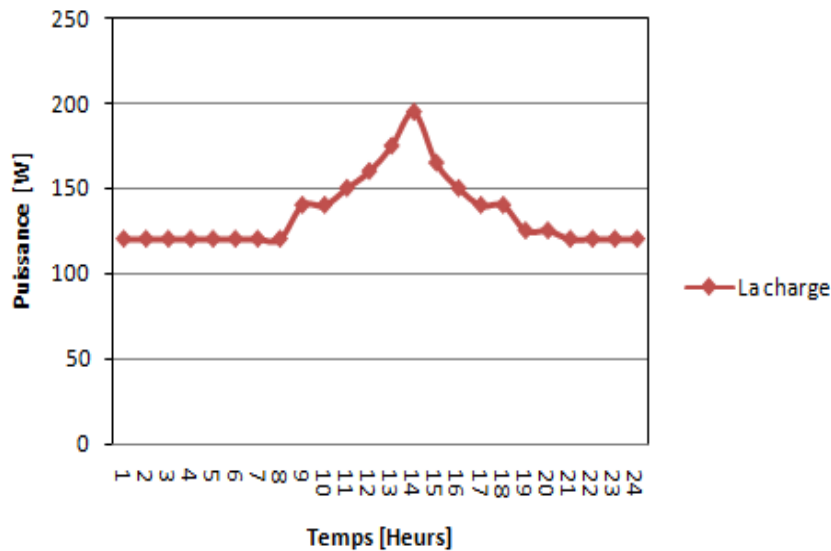


Figure. (VI- 14): Le profil journalier de la charge

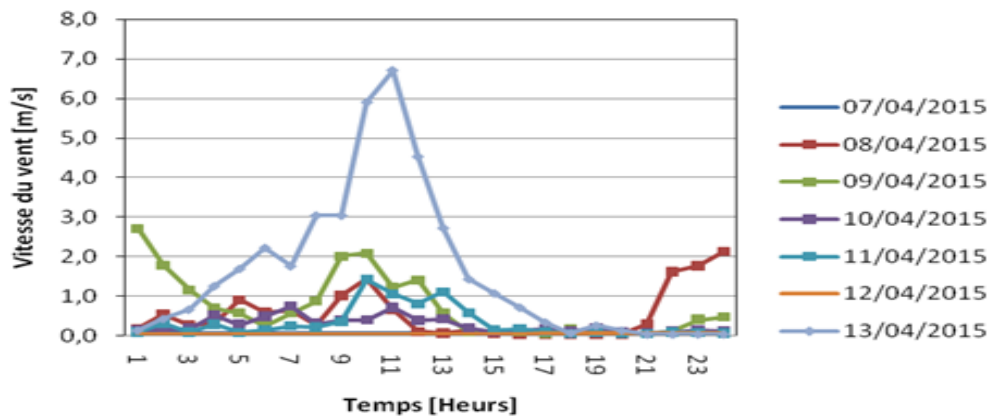


Figure. (VI- 15): Variation horaire de la vitesse du vent du 07 au 13 Avril 2015.

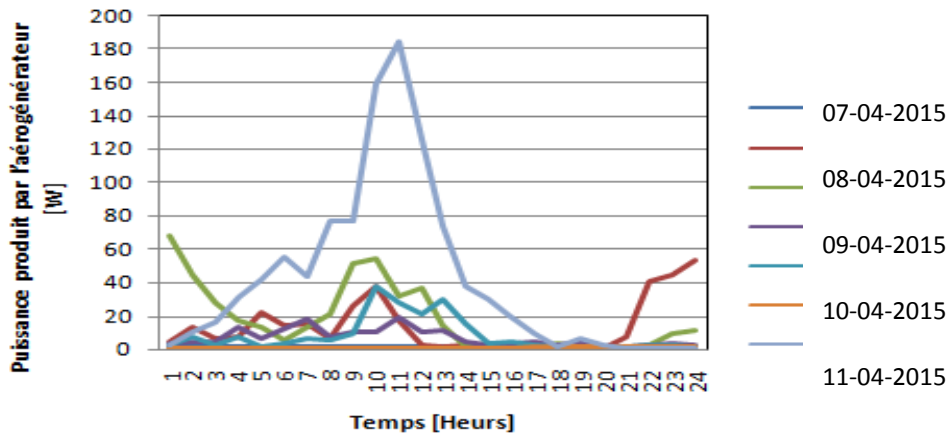


Figure (VI-16) : Variation horaire de la puissance produite par l'aérogénérateur du 07 au 13 Avril 2015.

La figure (VI-16) montre que le profile journalier de la puissance produite par l'aérogénérateur varie en fonction de la vitesse du vent.

La puissance atteint une valeur maximal de 184W/h le 13-04-2015

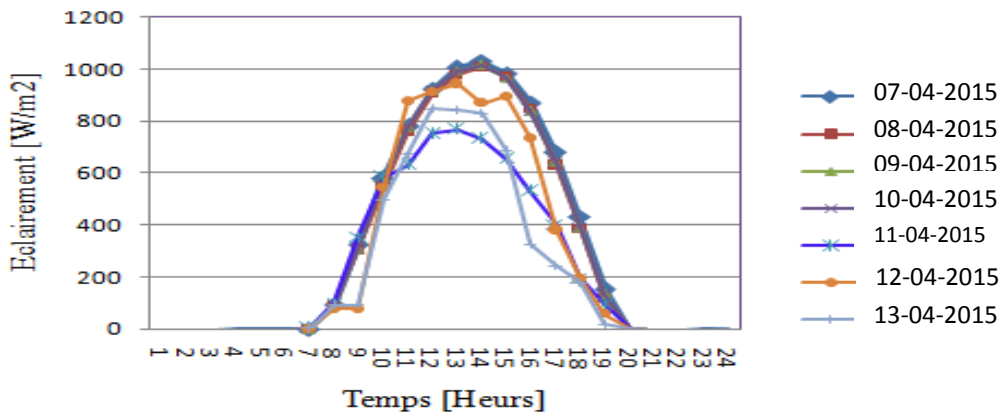


Figure (VI-17): Variation horaire de l'irradiation solaire du 07 au 13 Avril 2015.

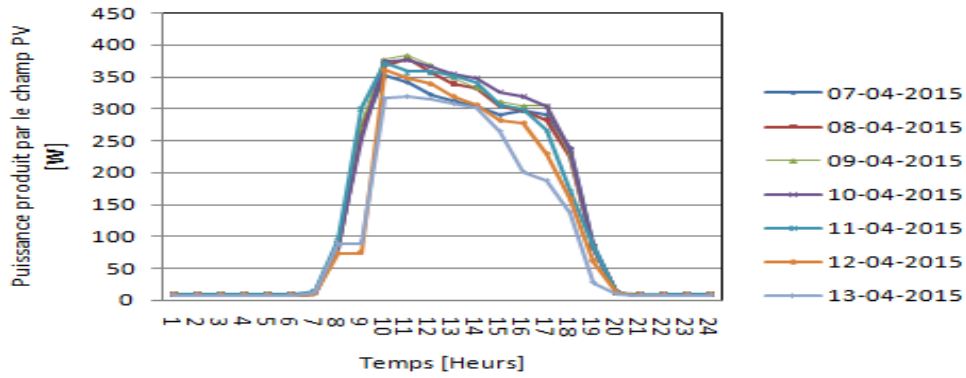


Figure (VI-18): Variation horaire de la puissance produite par le champ PV du 07 au 13 Avril 2015.

En analysant les résultats présentés dans la figure (VI-18) nous remarquons que la puissance produite par le champ PV prend des valeurs presque nulles entre 20:00H et 8:00H-24:00h, et elle atteint des valeurs maximales entre 12 :00H et 14 :00H

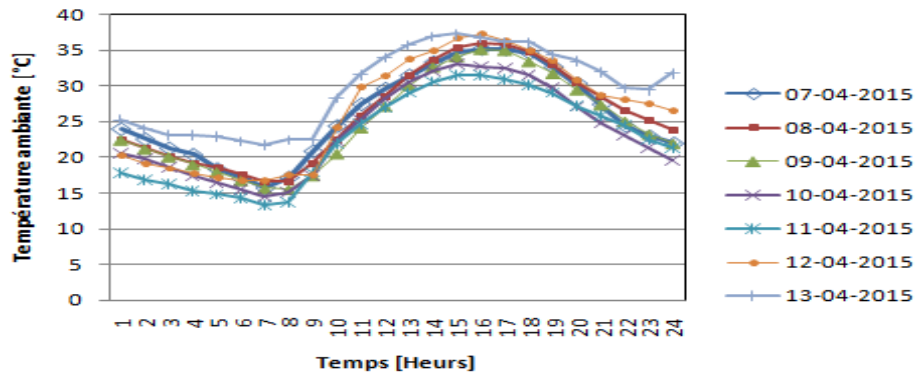


Figure (VI-19): Variation horaire de la température ambiante du 07 au 13 Avril 2015.

La figure (VI-19) représente la variation de la température ambiante en fonction du temps (h) nous remarquons que les valeurs de température diminuent pendant la nuit, elle atteint une valeur minimale égale à 14°C et commence à augmenter à partir de 8H du matin (lever du soleil) jusqu'à une valeur maximale (37°C) (midi).

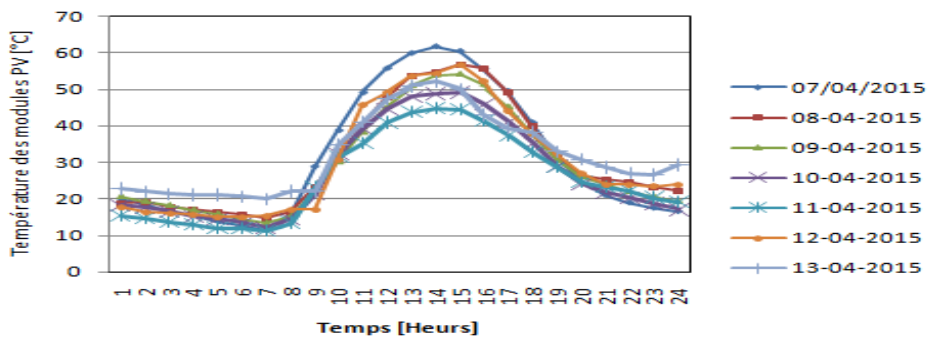


Figure (VI-20): Variation horaire de la température des modules PV du 07 au 13 Avril 2015.

Ce qui concerne la température des modules PV, nous remarquons d'après la figure (VI-20) les valeurs de température décroît jusqu'à une valeur minimal (11°C) et augmente jusqu'à une valeur maximal (60°C) (midi).

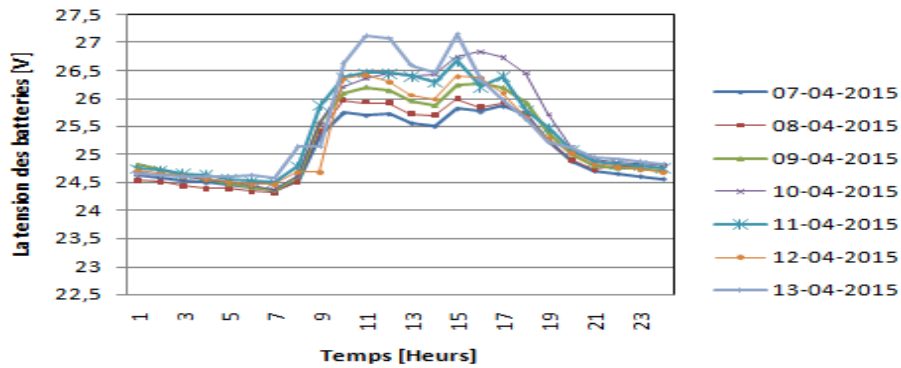


Figure (VI- 21) : Variation horaire de la tension des batteries du 07 au 13 Avril 2015.

En analysant la figure (VI-21), le profil journalier de la tension des batteries varie d'une manière différente tous les jours de l'expérience. la tension des batteries varie en fonction de la production du système et de la charge (la consommation). Elle atteint une valeur maximale de: 27V pendant la journée.

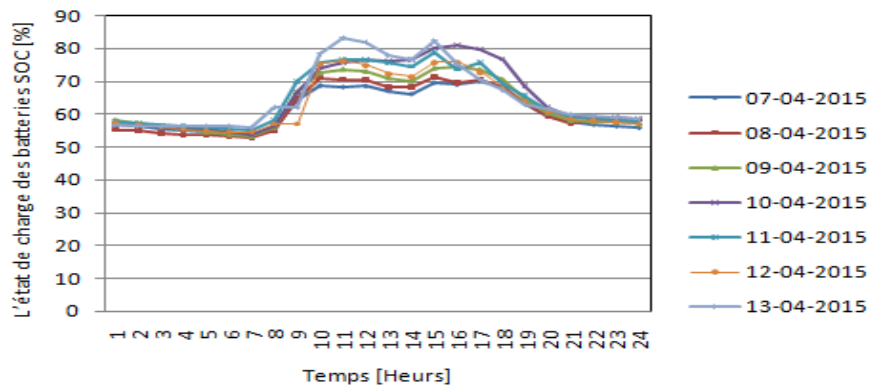


Figure (VI-22): Variation horaire de l'état de charge des batteries SOC (State of charge of the battery) du 07 au 13 Avril 2015.

On remarque que dans la fig. (VI-22) les valeurs moyennes du SOC (%) des batteries variées avec le temps entre un maximum de 83 % et un minimum de 56 %.

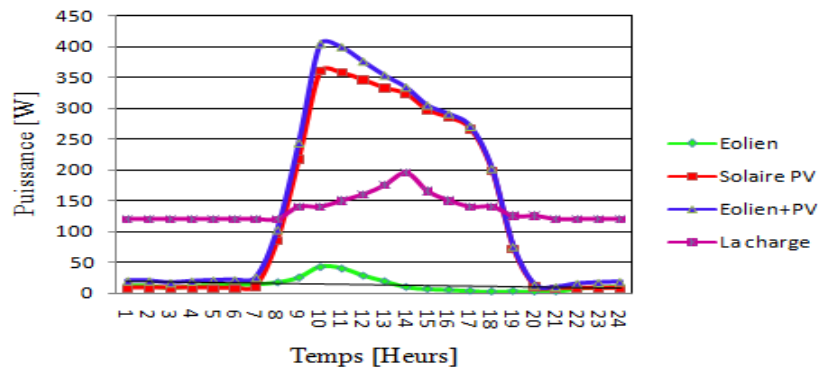


Figure (VI-23): Variation horaire de la charge et des puissances produites par chacun des systèmes : aérogénérateur, PV et le système hybride du 07 au 13 Avril 2015.

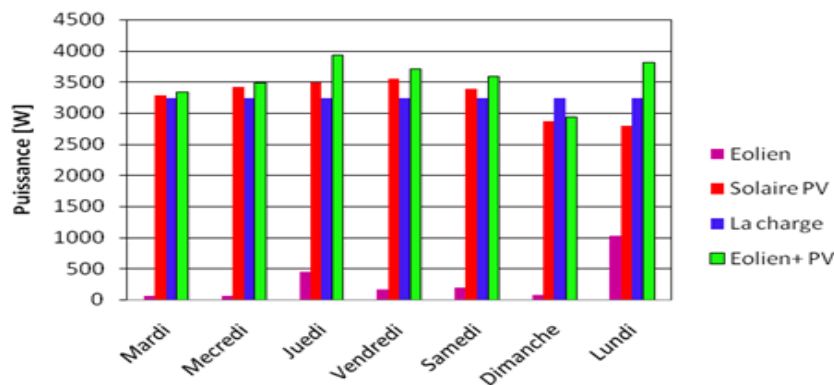


Figure (VI-24): Variation journalière de la charge et des puissances produites par chacun des sous systèmes : PV, l'aérogénérateur et le système hybride du 07 au 13 Avril 2015.

VI .11-Étude économique du système :

Pour évaluer le coût global du système, il est nécessaire d'avoir certaines données, les unes sont connues, les autres sont estimables :

- La durée de vie
- Le coût ou l'investissement initial
- Les coûts de maintenance annuels
- Les coûts de remplacements des différents sous- systèmes.

VI.11.1-cout des systèmes photovoltaïques :

a. Equipement et matériels solaires :

Sont les principaux composants du système hybride PV-éolien: c'est-à-dire les modules photovoltaïque, l'aérogénérateur, convertisseurs, les batteries les diverses accessoires utilisé dans l'installation (câbles, boîtiers, ...).

b. Etude technique et réalisation :

Pour tout projet de réalisation et d'installation d'un système hybride, il faudrait ajouter les frais dûs à l'étude technique, à la réalisation et l'installation du système sur le site prévu.

c. Travaux de génie civil :

Les frais relatifs aux travaux de génie civil (fondation et l'installation de l'aérogénérateur, socles pour les structures).

VI .12-estimation du cout global du système installe :

Les coûts estimatifs globaux annuels d'un système hybride PV-éolien est donné par le tableau suivant [16]:

Tableau (VI-2) : Analyse économique du système hybride PV-éolien

	Le coût ou l'investissement initial (\$)	Le coût de l'entretien (\$/An)	Durée de vie (Année)
Générateur photovoltaïque	989,09	19,78	25
Aérogénérateur 900 W	3272,30	9,82	20
Batteries	3640,39	7,28	12
Convertisseur	370,64		15
Total	8272,41	76,90	
Travaux de génie civil	211,66		25
Accessoires	317,49		25
Total investissement par An	589,31		

Le prix du kWh l'électricité produite par le système hybride PV-éolien est de 0,36\$/kWh,

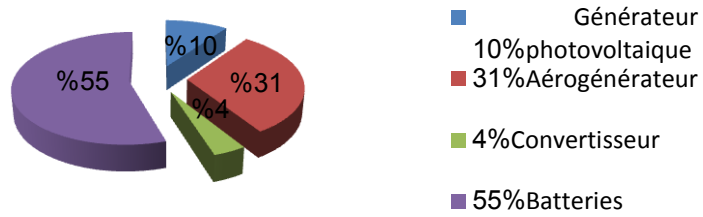


Figure (VI- 25) : Distribution des coûts des équipements du système hybride.

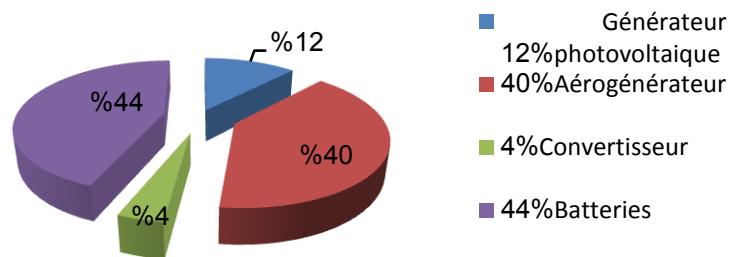


Figure (VI- 26): Distribution des coûts annuels.

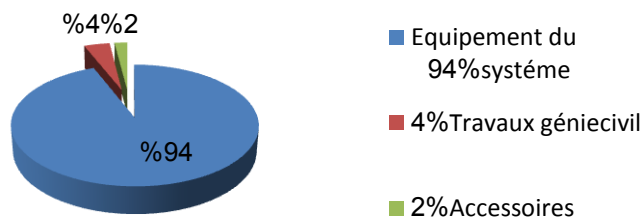


Figure (VI- 27): Distribution des coûts (équipement, travaux génie civile, accessoires).

VI.13-Conclusion :

Duran la période d'essai du système, nous pouvons noter que:

- ✎ L'augmentation de la température ambiante et donc la température des panneaux influx clairement sur le rendement du champ photovoltaïque.
- ✎ Le SOC (%) des batteries est dominé par la production du champ photovoltaïque.

- ✎ La production totale d'électricité répond à la charge (la demande d'électricité) à tout moment de la journée.
- ✎ Il existe une relation de complémentarité entre l'énergie solaire et l'énergie éolienne.
- ✎ La production d'électricité maximale du système coïncide avec des pics de demande d'électricité.
- ✎ Les valeurs moyennes horaires du SOC (%) des batteries variées entre un maximum de 83 % et un minimum de 56%.

Référence bibliographies :

- [1] Manuel de l'utilisateur Whisper 100, Installation, utilisation et entretien, 20 fév. 2006.
- [2] Whisper 100-200, Wind generator. 2006.
- [3] Paul Gipe. Le grand livre de l'éolien : Editions Le Moniteur. Paris. France.
- [4] K. Agroui. Etude du Comportement Thermique de Modules Photovoltaïques de Technologie Monoverre et Biverre au Silicium Cristallin. Revue Energie renouvelable: Valorisation (1999); 7-11.
- [5] SPI-LINE 1000 M.. Module Production Facility. Spire Corporation.
- [6] Y. Mesbahi, 'Algerian's Experience with Photovoltaic Module Production', 10Th European Photovoltaic Solar Energy Conference. Lisbon (Portugal), 8-12 April 1991.
- [7] K. Agroui, Y. Mesbahi et F. Moussa, 'Etude des Effets de l'Encapsulation sur les Propriétés Physico-chimiques du Copolymère EVA durant le Procédé de Fabrication du Module PV UDTS 50', Colloque National sur l'Elaboration et la Caractérisation des Matériaux, ELACAM'96, Mostaganem, 1-3 Juin 1996.
- [8] K Agroui, 'Module photovoltaïque UDTS 50 : Technologie de Fabrication et Performances Electriques', Rapport interne 1995.
- [9] M. Sadok, A. Mehdaoui (2008). Outdoor testing of photovoltaic arrays in the Saharan region, Renewable Energy, Vol 33, pp.2516-2524.
- [10] Sunlight creating energy, Manual Installation, Operation and Maintenance, Battery (SP 12V-100Ah).
- [11] Manuel de l'utilisateur et de montage Steca Tarom, pour des systèmes hybrides photovoltaïque/groupe électrogène/générateur éolien et pour des applications de télécommunications.
- [12] www.asif.org/files/6Convertidores.pdf
- [13] <http://www.servofluid.net/convertisseurs.html>

[14] R. Maouedj, A. Mammeri, M.D. Draou. Rapport du projet de recherche « Installation et expérimentation d'un système hybride photovoltaïque-éolien ». URER-MS. Adrar.

[15] R. Maouedj. Étude des performances d'un système hybride (photovoltaïque-éolien), pour la production de l'électricité. Application au site d'Adrar. Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen 2013

[16] R. Maouedj, A. Mammeri, M.D. Draou and B. Benyoucef; « Techno-economic analysis of a standalone hybrid photovoltaic-wind system. Application in electrification of a house in Adrar region ». International Conference on Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability, TMREES15, du 17 au 20 Avril 2015. Beirut. Liban.

Conclusion générale :

La ressource globale en énergie éolienne et photovoltaïque est très importante et peut contribuer de manière significative à la fourniture d'électricité dans la région d'Adrar.

Les travaux présentés dans ce mémoire concernent la production d'électricité à partir de ressources renouvelables mixtes (éolien- photovoltaïque) avec un système de stockage totalement autonome.

L'objectif était de maintenir un niveau de fiabilité élevé avec un coût minimal grâce à un dimensionnement optimal de système hybride (éolien–photovoltaïque) pour une charge donnée.

Un nombre optimal de batterie et de modules photovoltaïque a été calculé après avoir calculé la puissance horaire produite par l'aérogénérateur et par le générateur photovoltaïque pour une période d'analyse des sept jours au site d'Adrar.

Nous avons étudié le principe et l'influence de chaque composant constituant le système PV et l'aérogénérateur éolienne.

Après l'installation du système hybride composé d'une générateur photovoltaïque de 750W (ET-P660250W silicium polycristallin 250W), un aérogénérateur Whisper 900W, un convertisseur du type CP300, des batteries du type SP12V-100Ah, un contrôleur et un micro-ordinateur, nous avons fait des teste du système du 7 et 13 Avril 2015.

Duran la période d'essai du système, nous pouvons noter que:

- ✎ L'augmentation de la température ambiante et donc la température des panneaux influx clairement sur le rendement du champ photovoltaïque.
- ✎ Le SOC (%) des batteries est dominé par la production du champ photovoltaïque.
- ✎ La production totale d'électricité répond à la charge (la demande d'électricité) à tout moment de la journée.
- ✎ Il existe une relation de complémentarité entre l'énergie solaire et l'énergie éolienne.
- ✎ La production d'électricité maximale du système coïncide avec des pics de demande d'électricité.
- ✎ Les valeurs moyennes horaires du SOC (%) des batteries variées entre un maximum de 83 % et un minimum de 56%.

Résumé :

Notre avenir énergétique doit être basé sur des énergies non polluantes ayant des ressources importantes. Les énergies renouvelables sont les meilleurs candidats avec une production intermittente.

L'exploitation des ressources renouvelables connaît un grand essor dans les pays industrialisés et même dans quelques pays sous-développés. L'Algérie a fourni un grand effort pour l'électrification rurale et saharienne.

Dans ce contexte, l'interconnexion de plusieurs sources d'énergie renouvelable (éolien- photovoltaïque) dans un système d'énergie hybride (SHE) peut avoir un apport profitable sur la production d'énergie électrique en termes de coût et de disponibilité.

Nous présentons dans ce travail, les résultats des testes du système hybride (éolien- photovoltaïque) de production d'électricité, ce système est indépendant du réseau électrique conventionnel et l'énergie produite est stockée dans des batteries et l'éclairage public dans la région d'Adrar.

Mots clés : Système Photovoltaïque, Energies renouvelables, gisement solaire, aérogénérateur, champ photovoltaïque, batteries, modélisation énergétique.

ملخص :

يجب أن يستند مستقبلنا على الموارد الطاقة المتجددة فهي موارد غير ملوثة لبيئتنا. إن استعمال الموارد المتجددة لتوليد الطاقة عرف تطورا كبيرا في البلدان المصنعة وأيضا في بعض الدول السائرة في طريق النمو. لقد وفرت الجزائر جهدا كبيرا لتوفير الكهرباء في المناطق الريفية والصحراوية. وفي هذا السياق بالضبط، يعد ربط العديد لمصادر الطاقة المتجددة في نظام الطاقة الهجينة ذو تأثير إيجابي على إنتاج الطاقة الكهربائية من حيث التكلفة والتوافر. نقدم في هذا العمل نتائج اختبارات لنظام هجين (الرياح - كهر وضوئية) لتوليد الطاقة الكهربائية مستقل تماما عن الشبكة التقليدية، حيث تخزن الطاقة المنتجة في بطاريات كما اختبرنا هذا النظام لتوفير الإنارة العمومية في منطقة أدرار.

المفاتيح: النظام الكهروضوئي، الطاقات المتجددة، المكنن الشمسي، مولد هوائي، حقل كهر و ضوئي البطاريات، نمذجة الطاقة