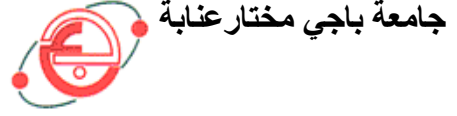


وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR ANNABA-UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA



FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIORAT
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

MEMOIRE

PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER

INTITULE

Etude d'un système Hybride (photovoltaïque – éolien)

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNIQUES

FILIERE : GENIE MECANIQUE

SPECIALITE : ÉNERGETIQUE ET ENVIRONNEMENT

PRESENTE PAR : FERRAH BILLEL

DIRECTEUR DU MEMOIRE : Pr. H. MZAD

DEVANT LE JURY

PRESIDENT :

EXAMINATEURS :

Année : 2014/2015

Remerciements

*Avant tout, Je remercie **ALLAH** le Tout-puissant de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail dans des meilleures conditions.*

*Je remercie vivement en premier lieu mon encadreur Monsieur : **H. MZAD**, qui par sa compétence, ses encouragements, ses critiques constructives et son soutien moral a su m'informer, me conseiller, et me rendre de plus en plus autonome pour bien réaliser ce travail.*

*Mes remerciements vont également à **HASSANI MOHAMMED** et aux enseignants du département génie mécanique.*

D édicaces

Je dédie ce modeste travail à

Mes chère parents symbole de tendresse profonde et permanente, de sacrifice et d'amour éternel, que dieu les protègent pour moi et leur accordent une bonne santé et une longue vie.

Mes chères sœurs

A salah & amine

Mes enseignants depuis mon enfance

Mes amis (es) et mes collègues de l'UBMA

A tout ceux qui m'ont aidé à réaliser de près ou de loin ce mémoire

A ceux qui me sont chère et ceux que j'ai aimé du fond du mon coeur

Billel.

Sommaire

Liste des figures.

Liste des tableaux.

Nomenclature.

Résumé

1. Introduction générale.....1

Chapitre I : Généralités sur le solaire et l'éolien

I.1. Introduction.....	4
I.2. Evaluation des énergies renouvelables en Algérie.....	4
I.3.Énergie solaire.....	5
I.3.1 Généralités sur le soleil.....	5
I.3.2. Définition.....	5
I.4. Position du soleil.....	8
I.4.1. Coordonnées géographiques terrestres.....	8
I.4.2. Déclinaison δ	9
I.4.3 Angle horaire du soleil (H).....	10
I.4.4 Equation du temps ET.....	10
I.4.5. Durée du jour.....	11
I.4.6. Durée d'ensoleillement DIs d'un capteur (α, γ).....	11
I.5. Énergie solaire photovoltaïque.....	13
I.5.1. Définition.....	13
I.5.2. Historique.....	14
I.5.3. Électricité solaire par effet photovoltaïque.....	14
I.5.3.1. Principe de fonctionnement.....	14
I.5.3.2. Cellules photovoltaïque.....	16
I.5.3.3. Fonctionnement des cellules photovoltaïques.....	17
I.5.4. Différents types des cellules photovoltaïques.....	18
I.5.4.1 Cellules monocristallines.....	18
I.5.4.2. Cellules poly cristallines.....	19
I.5.4.3. Cellules amorphes.....	19
I.5.5. Modules (ou panneaux).....	21
I.5.6. Générateur photovoltaïque.....	22
I.5.7. Conversion de l'énergie solaire photovoltaïque.....	24
I.5.8. Avantages et inconvénients de la technologie photovoltaïque.....	25
I.6.Énergie éolienne.....	27
I.6.1. Introduction.....	27
I.6.2 Historique.....	27
I.7. Définition de l'énergie éolienne.....	28
I.8. Architecture d'une éolienne.....	29
I.8.1. Rotor.....	29
I.8.2. Nacelle.....	30
I.8.3. Tour.....	31
I.9. Fonctionnement d'une éolienne.....	31

I.10. Caractéristiques des éoliennes	32
I.10.1. Eolienne à axe horizontal.....	33
I.10.2. Eolienne à axe vertical.....	34
I.11. Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne	34
I.12. Notions théoriques sur l'éolien	35
I.12.1. Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique	35
I.12.2. Loi de Betz.....	36
I.12.3. Vitesse spécifique ou normalisée.....	38
I.12.4. Coefficient de puissance.....	38
I.12.5. Coefficient de couple.....	39
I.12.6. Distribution de Weibull.....	40
I.13. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	41
I.14. Conclusion	41

Chapitre II : Caractéristiques du système hybride photovoltaïque-éolien.

II.1. Introduction	42
II.2. Définition du système d'énergie hybride (S.E.H)	42
II.3. Présentation du système hybride photovoltaïque-éolien	46
II.4. Système de conversion d'énergie hybride	47
II.5. Principaux composants du Système d'énergie hybride photovoltaïque-éolien	47
II.6. Descriptions des composants du système hybride photovoltaïque-éolien	48
II.6.1. Générateurs photovoltaïques.....	48
II.6.2. Modèle d'une cellule solaire photovoltaïque.....	48
II.6.3. Caractéristique électrique d'une cellule photovoltaïque.....	49
II.6.4. Paramètres externes d'une cellule photovoltaïque.....	50
II.6.5. Influence des résistances série.....	51
II.6.5.1 Influence de la résistance série R_S	51
II.6.5.2 Influence de la résistance parallèle.....	52
II.6.6. Influence de l'éclairement.....	53
II.6.7. Influence de la température.....	54
II.7. Générateur éolien	55
II.7.1. Introduction.....	55
II.7.2. Types d'aérogénérateur dans les systèmes éoliens.....	56
II.7.3. Différentes classes d'un système éolien.....	60
II.8. Systèmes de stockage	60
II.9. Convertisseurs	61
II.10. Charges	61
II.11. Conclusion	62

Chapitre III : Etude et dimensionnement optimal du système hybride photovoltaïque et éolien

III.1. Introduction	63
III.2. Définition du dimensionnement	63
III.3. Paramètres à déterminer lors de la conception	64
III.4. Analyse du potentiel énergétique solaire et éolien disponible	64

III.4.1. Gisement solaire en Algérie.....	64
III.4.1.1. Données géographiques du lieu.....	65
III.4.1.2. Données relatives à la température ambiante.....	65
III.4.2. Potentiel éolien.....	66
III.4.2.1. Données météorologiques du lieu.....	68
III.5. Méthodes de dimensionnement d'un système hybride.....	71
III.5.1 Méthodologie adoptée	71
III.5.2. Détermination du profil de charge et Besoins électriques	71
III.5.3. Choix de l'éolienne.....	73
III.5.4. Dimensionnement du générateur photovoltaïque.....	73
III.5.4.1 Détermination du nombre de modules.....	74
III.5.4.2 Détermination du nombre de modules en série/parallèle.....	74
III.5.5 Dimensionnement des batteries de stockage.....	74
III.5.6 Dimensionnement du convertisseur CC/AC (onduleur).....	76
III.5.7 Dimensionnement du régulateur.....	77
III.6 .Méthode d'optimisation des systèmes hybrides.....	78
III.6.1.Méthode des moyennes mensuelles annuelles.....	79
III.6.2.Résultats de simulation.....	80
III.7. Interprétation des résultats.....	83
III.8. Conclusion.....	83
Conclusions générales.	
Références bibliographiques.	
Annexes.	

Liste de figures

Figures	N°
Carte du monde de l'irradiation moyenne annuelle sur un plan horizontal.	1
Les deux types d'énergie solaire.	2
Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM.	3
Spectres solaires relevés dans plusieurs conditions selon la convention AM.	4
Définition des coordonnées terrestres d'un lieu donné.	5
Système Photovoltaïque.	6
effet Photovoltaïque	7
Diagrammes de bandes d'énergie au voisinage de la jonction.	8
Coupe transversale d'une cellule PV typique.	9
Cellule photovoltaïque (monocristalline).	10
Cellule PV poly cristalline.	11
Cellules, module et panneau photovoltaïques.	12
Caractéristiques résultantes d'un groupement de ns cellules en série.	13
Caractéristiques résultant d'un groupement de np cellules en parallèle.	14
Installation photovoltaïque autonome.	15
Installation photovoltaïque couplée au réseau.	16
Capacité mondiale totale installée en (Mw).	17
Composants d'une éolienne.	18
Éléments d'une nacelle.	19
Principe de fonctionnement d'une éolienne.	20
Eoliennes à axes horizontal.	21
Eolienne à axe horizontal.	22
Eoliennes à axes vertical.	23
Diagramme de la puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent.	24
Colonne d'air animée d'une vitesse V.	25
Théorie de Betz : Schéma de principe.	26
Vitesse de vent (V) et vitesse tangentielle de l'aubage Ωr	27
Système d'énergie hybride photovoltaïque-éolien.	28
Position du parafoudre dans le système d'énergie hybride.	29
Schéma synoptique du système hybride étudié	30
Schéma de principe du système hybride photovoltaïque-éolien.	31
Caractéristiques $I=f(V)$ sous obscurité et sous éclairement d'une cellule photovoltaïque.	32
Notion de facteur de forme FF pour une cellule photovoltaïque.	33
Influence de R_S sur la caractéristique $I=f(V)$.	34
Influence de R_P sur la caractéristique $I=f(V)$.	35
Influence de l'éclaircement sur la caractéristique $I=f(V)$.	36
Influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$	37
Schémas équivalent électrique d'une génératrice à courant continu à excitation séparée.	38
Moyenne annuelle de l'irradiation globale reçue sur une surface horizontale.	39
Profil de température ambiante annuelle.	40
Profil de température ambiante du jour type du mois de Janvier (Hiver) et Juillet (Eté).	41
Carte de vent de l'Algérie	42
représente l'évolution de la vitesse du vent en fonction de la hauteur au-dessus du sol,	44

obtenu par logiciel HOMER sur le lieu d'implantation (Batna – Algérie).	
Profil de la vitesse du vent en fonction de la hauteur au-dessus du sol.	45
Irradiations globales jour-moyennes mensuelles estimées sur une surface horizontale.	46
Irradiations globales journalières moyennes mensuelles sur un plan incliné	47
Energie disponible mensuelle du vent de site de Batna	48
Vitesse du vent et l'irradiation solaire pour une journée hivernale 'Décembre'	49
Vitesse du vent et l'irradiation solaire pour une journée estivale 'Juillet'	50
Energies produites photovoltaïque et éolienne moyennes mensuelles	51
Energies mensuelles annuelles produites par le système hybride (PV-éolien)	52
Coût du système hybride (PV-éolien)	53

Liste des tableaux

Tableau	N°
Répartition de la puissance installée	1
Comparatif des différentes technologies.	2
résume les coordonnées géographiques	3
Valeurs de l'irradiation globale journalière moyenne mensuelle estimées sur une surface horizontale	4
Valeurs de l'irradiation globale journalière moyenne mensuelle estimées sur une surface inclinée	5
La vitesse moyenne mensuelle et l'énergie disponible du vent	6
Estimation des besoins énergétiques journalier d'une journée Hivernale et estivale	7
Paramètres de la batterie choisie	8
Paramètres de l'onduleur choisi	9
Paramètres du régulateur choisi	10
Production énergétique mensuelle et tailles du système hybride	11
Dimensionnement selon la moyenne mensuelle annuelle	12

Nomenclature

Grandeur	Signification
λ_o	Longueur d'onde
h	Constante de Planck
C	Vitesse de la lumière
ϕ	Latitude du lieu
λ	Longitude du lieu
δ	Déclinaison du soleil
H	L'angle horaire du soleil
E_g	L'énergie de gap de semi-conducteur
E_C	L'énergie de la bande de conduction
E_V	L'énergie de la bande de valence
E_c	L'énergie cinétique du vent
m	Masse d'air qui traverse l'éolienne
P_{aer}	Puissance aérodynamique de l'éolienne
F	Force de l'air sur l'éolienne
V_1	Vitesse d'air en amont de l'éolienne
V_2	Vitesse d'air en aval l'éolienne
C_p	Coefficient de puissance de l'éolienne
λ_n	Vitesse spécifique ou normalisée
R_t	Rayon de la surface balayée
C_m	Coefficient de couple de l'éolienne
P_m	Puissance mécanique disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur
T_t	Couple de la turbine éolienne
C	Facteur d'échelle de Weibull
K	Facteur de forme de Weibull --
$I(V)$	Courant d'ivrsur une charge par une cellule PV éclairé
I_{ph}	Photo-courant de cellule
I_d	Courant de jonction I_d (courant traversant la diode)
I_r	Courant d'ivrsur la résistance shunt
I_{cc}	Courant de court-circuit d'une cellule photovoltaïque
I	Courant de cellule
V	Tension de cellule
T	Température de la jonction
q	Charge de l'électron ($1,6 \cdot 10^{-19}C$)
I_0	Courant de saturation inverse de la diode
v	Tension de seuil de diode ($1,1V$)
n	Facteur d'idéalité de la photopile
R_S	Résistance série de la cellule
R_{sh}	Résistance parallèle ou Shunt de la cellule
V_C	Tension en circuit ouvert
E	Force électromotrice F.E.M
ϕ	Flux par pôle
U	Tension extraite de la génératrice

R_a	Résistance de l'induit
L	L'inductance de l'induit
I	Courant extrait de la génératrice
P_{em}	Puissance électromagnétique
R_t	Rayon de la turbine
Ω_t	Vitesse angulaire de la turbine
V, V_x	Vitesse du vent
β	Angle de calage des pales
T_t	Couple développé par la turbine
ρ	Masse volumique de l'air
G_i	L'irradiation solaire sur plan incliné
T_a	Température ambiante moyenne journalière
T_c	Température cellule moyenne journalière
NOCT	Température nominale de fonctionnement de la cellule
θ_i	Angle d'incidence
E_s	Ensoleillement dans le plan des modules
T_j	Température de jonction de la cellule
I_G	Courant fourni par le groupe de modules
V_G	Tension aux bornes du groupe de modules
K	Constante de Boltzmann
E_0	Tension à vide de la batterie chargée
R_b	Résistance interne de la batterie
I_b	Courant de décharge de la batterie
V_{bat}	la tension de la batterie (V).
N_{bs}	Le nombre de batteries qui doit être connecté en série.
N_{bp}	Le nombre de batteries qui doit être connecté en parallèle.
E_{pv}	L'énergie produite par le générateur photovoltaïque .
$E_{\text{éol}}$	L'énergie produite par le générateur éolien
A_{pv}	Surface des modules photovoltaïques
$A_{\text{éol}}$	Surface de l'éolienne
EL	La charge moyenne demandée (Wh).
η_{bat}	Le rendement de la batterie (%).
σ	le taux d'autodécharge des batteries.

Résumé

L'exploitation des ressources renouvelables connaît un grand essor dans les pays industrialisés et même dans quelques pays sous-développés.

Le système hybride de production d'électricité (éolien - photovoltaïque) totalement autonome est la solution idéale pour ce genre de problème.

Nous présentons dans ce papier, une méthode de dimensionnement optimal du générateur photovoltaïque et du banc de batteries dans un système hybride de production d'électricité (éolien - photovoltaïque) totalement autonome.

Pour une charge et une probabilité de perte d'énergie données sous le critère d'un prix minimum du système, un nombre optimal de batteries et de modules photovoltaïques a été calculé.

Mots clés: Système Photovoltaïque –Système éolien - Système hybride photovoltaïque- éolien –Système de Stockage –Dimensionnement-Optimisation.

INTRODUCTION GENERALE

Depuis le début du siècle, la consommation énergétique mondiale est en très forte croissance dans toutes les régions du monde. Il semble que tendanciellement, les consommations d'énergie vont continuer à augmenter, sous l'effet de la croissance économique d'une part, et de l'augmentation de la consommation d'électricité par habitant d'autre part, quels que soient les cas de figures envisagés.

Pour cela les énergies renouvelables apparaissent à nos jours et à long terme comme la solution adéquate qui couvre ce besoin énergétique en diminuant l'inconvénient majeur émis par les énergies fossiles et fissiles: le gaz à effet de serre.

Elles sont devenues une forme d'énergie indispensable par leur souplesse, la simplicité d'utilisation et la multiplicité des domaines d'activités où elles sont appelées à jouer un rôle. Ces modes de production ainsi que les moyens de distribution associés sont amenés à subir de profonds changements au cours des prochaines décennies.

Disponibles en quantité supérieure aux besoins énergétiques actuels de l'humanité, les ressources d'énergie renouvelable représentent par ailleurs une chance pour plus de deux milliards de personnes, habitant des régions isolées, d'accéder à l'électricité. Ces atouts, alliés à des filières de plus en plus performantes, favorisent le développement des énergies renouvelables.

En ce qui concerne notre pays, l'enjeu du développement des énergies renouvelables est encore plus important. En effet, ces énergies permettront de plus en plus de couvrir la croissance nécessaire et légitime des services énergétiques de base dans les domaines du développement rural, de l'habitat, de la santé, de l'éducation puis à long terme, de l'industrie.

Ainsi de sa situation géographique, l'Algérie favorise le développement et l'épanouissement de l'utilisation des énergies solaire et éolienne. En effet vu l'importance de l'intensité du rayonnement solaire reçu (169.440 Twh/an), le plus important de tout le bassin méditerranéen, et représente 5.000 fois la consommation Algérienne en électricité et 60 fois la

consommation de l'Europe des 15 (estimée à 3.000 Twh/an), notre pays couvre certains de ses besoins en énergie solaire.

Tandis que l'énergie éolienne qui représente un potentiel important à la région sud Adrar très précisément, donne une autre extension pour notre pays pour se diversifier au point de production d'électricité d'origine renouvelables dans les décennies à venir.

Cependant, la production d'électricité à partir seulement d'une des deux sources d'énergie citées ci-dessus, est un objectif très souvent limité par le prix de revient final du kwh électrique produit, en raison de l'intériorité du vent et de la discontinuité dans le temps du rayonnement solaire qui posent le problème du stockage d'énergie. Or cet aspect de ces énergies est encore aujourd'hui un de ceux qui ralentissent le plus leur développement, car ce stockage, d'autant plus important que les régimes de vent soient irréguliers ou que les temps d'ensoleillement soient faibles, constitue souvent une grande part (environ 20%).

Considérant leurs caractéristiques saisonnières respectives, ces deux énergies ne se concurrencent pas mais au contraire peuvent se valoriser mutuellement. C'est pourquoi on propose ici un système hybride composé de ces deux sources d'énergie, qui consiste en l'exploitation optimale de la complémentarité entre elles.

Ainsi cette complémentarité d'énergie est accompagnée par un système de stockage assuré par des batteries au plomb, pour cela le dimensionnement de stockage optimale basé sur la partie de modélisation des composants constituant ce système et la charge de l'utilisation.

L'objectif de notre travail est de maintenir un meilleur rendement avec un coût minimal du système hybride photovoltaïque – éolien. Cela entraîne une étude des paramètres de dimensionnement de ce type d'application et leur simulation permettra de mettre en évidence les stratégies de contrôles disponibles et d'évaluer les techniques d'optimisations. Pour cette raison on présente une méthode de dimensionnement optimale de la taille du système hybride de production d'électricité.

Pour atteindre cet objectif, nous avons scindé notre mémoire en quatre chapitres :

- Le premier chapitre présente et expose les deux sources d'énergies renouvelables, qui sont l'énergie solaire et éolien, ainsi que le principe de fonctionnement des systèmes qui les entraînent.
- Le deuxième chapitre est consacré à une étude qui décrit et justifie les différentes composantes du système hybride photovoltaïque-éolien proposé.
- Le troisième chapitre est dédié à l'étude et dimensionnement du système hybride (Photovoltaïque et éolienne) en introduisant une analyse des charges et des caractéristiques du site: Batna.
- Conclusion

I.1. Introduction

On appelle énergie renouvelable un ensemble de sources d'énergie qui sont inépuisables à l'échelle humaine, largement disponibles, essentiellement gratuites et sont compatibles avec un certain respect environnemental. Elles peuvent être converties, selon les besoins, en électricité ou en chaleur. La cogénération d'électricité et de chaleur est possible dans le cas de la géothermie, de la biomasse et de l'énergie solaire.

- Le solaire est une utilisation directe des rayons du soleil pour produire chaleur ou électricité
- La biomasse regroupe l'ensemble des énergies provenant de la dégradation de la matière organique. C'est de l'énergie solaire transformée par les plantes chlorophylliennes qui sont utilisées soit directement (bois de chauffage) soit après de nouvelles transformations chimiques (biogaz, biocarburant).
- L'éolienne utilise l'énergie du vent de manière mécanique.
- La géothermie est l'utilisation directe des gradients des températures terrestres ou de sources chaudes.

Dans ce premier chapitre, nous allons décrire les différentes caractéristiques des deux énergies renouvelables étudiées dans ce mémoire : le solaire et l'éolien.

I.2. Evaluation des énergies renouvelables en Algérie

Le potentiel des énergies renouvelables en Algérie est le plus important d'Afrique du Nord. Le marché des énergies renouvelables est prometteur et leur promotion constitue l'un des axes de la politique énergétique et environnementale du pays. Parmi les objectifs affichés par les pouvoirs publics, le marché local doit atteindre 600 Mw en 2015, amenant la part de l'électricité produite par les énergies renouvelables à 6% de l'électricité totale produite.

Application	Puissance installée (Kw)	Pourcentage
Electrification	1353	58%
Télécommunication	498	21%
Pompage	288	12%
Eclairage public	48	2%
Autres	166	7%

Tableau 1 : Répartition de la puissance installée

I.3. Energie solaire

I.3.1 Généralités sur le soleil

Le soleil est une sphère avec une matière extrêmement chaude et gazeuse avec un diamètre de $1,39.10^9m$, et est à distance moyenne de $1,49.10^{11}m$ de la terre. Comme vu de la terre, le soleil tourne autour de son axe une fois toutes les quatre semaines, cependant il ne tourne pas comme un corps solide; une rotation est faite en 27 jours à l'équateur et en 30 jours aux régions polaires. Il est considéré comme un corps noir avec une température effective de $5800K$, et rayonne principalement dans le visible et le proche infra rouge (de $300nm$ à $1200nm$) avec un maximum aux environs de $500nm$.

Cette énergie est produite par les réactions de fusion dans le soleil et est filtrée par l'atmosphère. Le rayonnement solaire apporte sur terre une énergie de 2000 à $2500 Kwh/m^2$ par an, ce qui est supérieur à la totalité des ressources fossiles jamais découvertes (Fig.1).

La quantité d'énergie exploitable de ces ressources malheureusement "non renouvelables" ne représente que $0,5\%$ de ce que nous recevons chaque année par rayonnement solaire.

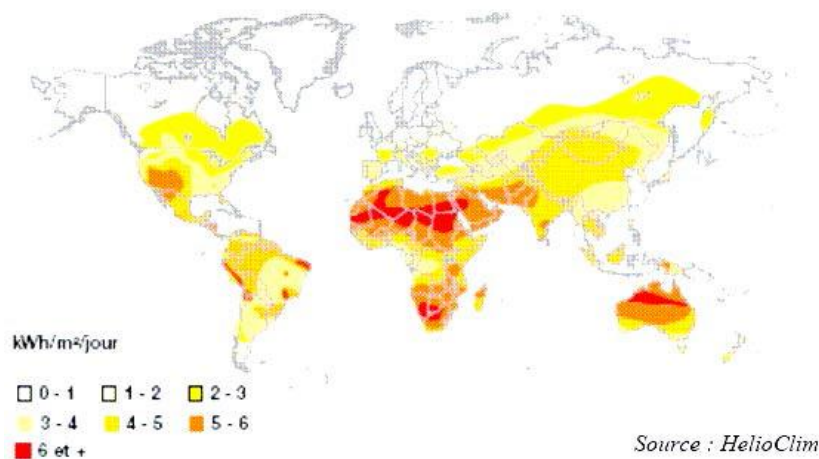


Figure 1 : Carte du monde de l'irradiation moyenne annuelle sur un plan horizontal.

I.3.2 Définition

L'énergie solaire est la ressource énergétique la plus abondante sur terre. Elle est à l'origine de la majorité des énergies renouvelables, mais elle est très atténuée.

Le rayonnement solaire peut être utilisé pour produire soit directement de l'électricité à l'aide de semi-conducteur photovoltaïque, soit de la chaleur solaire thermique pour le chauffage ou la production électrique (Fig.2).

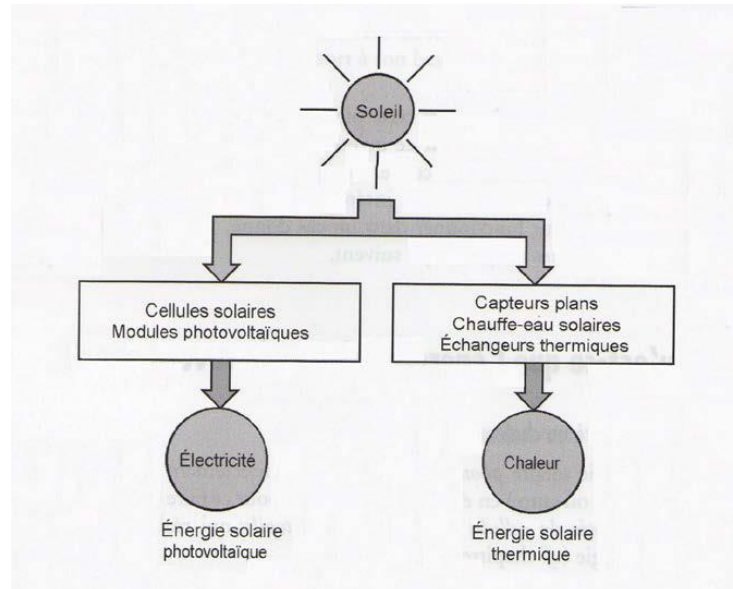


Figure 2 : Les deux types d'énergie solaire.

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet ($2,5 \mu\text{m}$) à l'infrarouge lointain ($3 \mu\text{m}$), et transportant chacun une énergie E_{ph} , qui répond elle-même à la relation suivante :

$$E_{ph} = h \frac{C}{\lambda_0} \quad (1)$$

Dans laquelle :

λ_0 : Longueur d'onde (m)

h : Constante de Planck

C : Vitesse de la lumière (m/s).

D'après l'équation (1), l'énergie transportée par un photon est inversement proportionnelle à sa longueur d'onde, c'est-à-dire plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande.

On utilise la notion AM pour Air Mass afin de caractériser le spectre solaire en termes d'énergie émise. L'énergie totale transportée par le rayonnement solaire sur une distance soleil-terre est de l'ordre de 1350 W/m^2 (AM0) dans l'espace hors atmosphère terrestre (Fig.3).

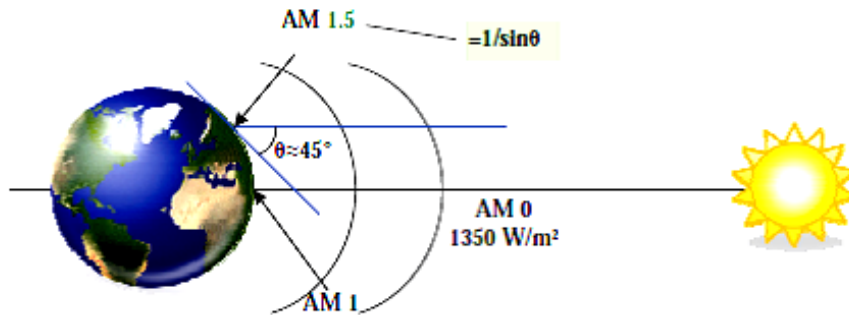


Figure 3: Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM.

Lorsque le rayonnement solaire traverse l'atmosphère, il subit une atténuation et une modification de son spectre, à la suite de phénomènes d'absorption et de diffusion dans les gaz, l'eau et les poussières. Ainsi, la couche d'ozone absorbe une partie du spectre lumineux provenant du soleil, et en particulier une partie des ultraviolets dangereux pour la santé. Le rayonnement solaire direct reçu au niveau du sol (à 90° d'inclinaison) atteint 1000 W/m^2 du fait de l'absorption dans l'atmosphère (AM1). Cette valeur change en fonction de l'inclinaison des rayons lumineux par rapport au sol. Plus l'angle de pénétration θ est faible, plus l'épaisseur atmosphérique que les rayons auront à traverser sera grande, d'où une perte d'énergie conséquente. Par exemple, l'énergie directe transportée par le rayonnement solaire atteignant le sol avec un angle de 48° avoisine les 833 W/m^2 (AM1.5).

Pour connaître le rayonnement global reçu au sol, il faut ajouter à ce dernier le rayonnement diffus. Le rayonnement diffus concerne tout le rayonnement dont la trajectoire entre le soleil et le point d'observation n'est pas géométriquement rectiligne et qui est dispersé ou réfléchi par l'atmosphère ou bien le sol. En considérant ceci, on obtient une référence du spectre global noté AM1.5 avec une puissance de 1000 W/m^2 , la Figure 4 correspondant à nos latitudes.

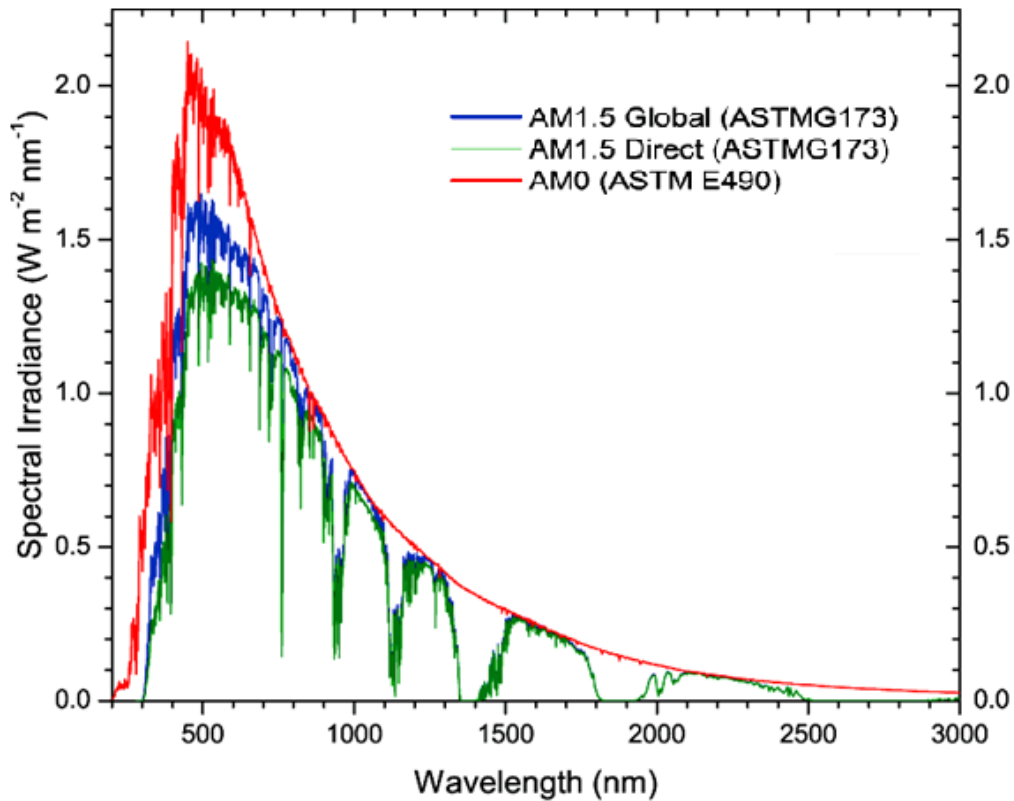


Figure 4 : Spectres solaires relevés dans plusieurs conditions selon la convention AM.
(Source NREL Solar Spectrum)

I.4. 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.

I.4.1. 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.

➤ **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.

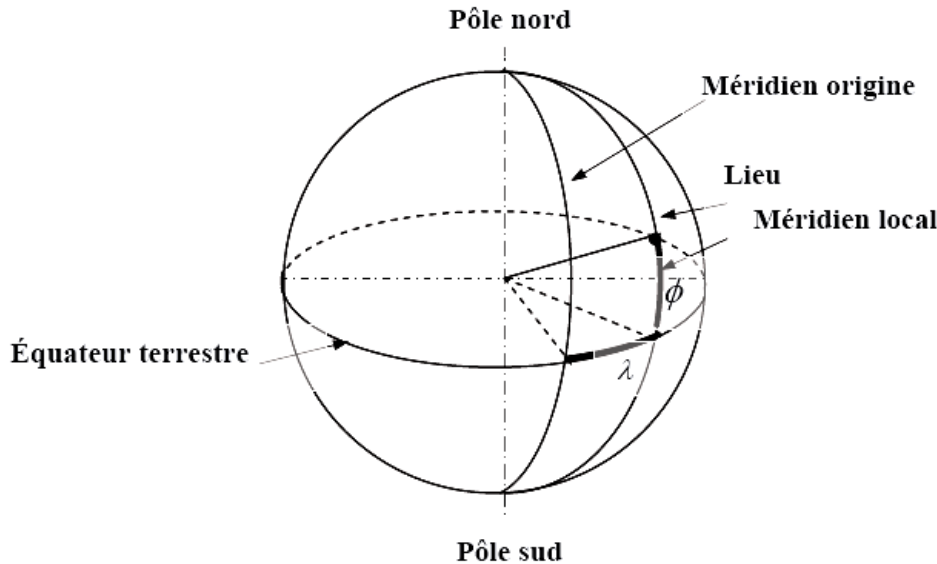


Figure 5 : Définition des coordonnées terrestres d'un lieu donné.

I.4.2. D 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).

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

$$\delta = 23.45 \sin \left(\left(\frac{360}{365} \right) (284 + n) \right) \quad (2)$$

Ou par une série de Fourier :

$$\delta = \left(\begin{array}{l} 0.006918 - 0.399912 \cos \beta + 0.070257 \sin \beta - 0.00678 \cos 2\beta + \\ 0.000907 \sin 2\beta - 0.002697 \cos 3\beta + 0.00148 \sin 3\beta \end{array} \right) \frac{180^\circ}{\lambda} \quad (3)$$

I.4.3 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, l'angle horaire du soleil varie à chaque instant de la journée selon la relation :

$$H = 15 \cdot (TSV - 12) \quad (4)$$

Avec :

$$\begin{cases} TSV = TL - DE + \left(\frac{E_t + 4\lambda}{60} \right) \\ E_t = 9.87 \cdot \sin 2N' - 7.35 \cos N' - 1.5 \sin N' \\ N' = \frac{360}{365} \cdot (N - 81) \\ DE = +1 \end{cases}$$

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

E_t : Correction de l'équation du temps

λ : Longitude du lieu.

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

On prend :

$$\begin{cases} H > 0 \text{ après midi} \\ H < 0 \text{ le matin} \\ H = 0 \text{ midi TSV} \end{cases}$$

I.4.4 Equation du temps ET

C'est l'écart entre le temps solaire moyen TSM et le temps solaire vrai TSV selon le jour de l'année considérée.

$$ET = TSV - TSM \quad (5)$$

Avec :

TSV : Temps Solaire Vrai c'est le temps repéré de façon que le soleil se trouve au zénith à midi

TSM : Temps Solaire Moyen c'est le temps qui " s'écoule " à vitesse constante de la Terre sur son orbite au cours de l'année (celui mesuré par les horloges).

La variation de ET durant l'année est donnée par la formule suivante :

$$ET = 0.258 \cos x - 7.416 \sin x - 3.648 \cos 2x - 9.228 \sin 2x \quad (6)$$

Avec :

$$x = \frac{360(N-1)}{365 \cdot 25} \quad (7)$$

Où l'angle x est défini en fonction du numéro du jour N . Le décompte commence à partir du 1er janvier où $N=1$.

I.4.5. Durée du jour

Le jour est le temps qui sépare le lever et le coucher du soleil. Deux instants particuliers de la journée qui donne une hauteur h du soleil nulle sont appelés: le lever et le coucher du soleil. La relation donnant la hauteur du soleil peut s'écrire :

$$\sin h = \cos \delta \cos H \cos \phi + \sin \delta \sin \phi \quad (8)$$

Avec :

δ : Déclinaison du soleil

H : l'angle horaire du soleil

Φ : l'attitude de lieu

Le coucher correspond à la valeur positive H_c et le lever à la valeur négative H_L .

$$\begin{cases} H_c = \arccos(-\operatorname{tg} \delta \operatorname{tg} \phi) \\ H_L = -H_c \end{cases}$$

$$D_j = \frac{H_c - H_L}{15} = \frac{2}{15} \cdot \operatorname{Arc} \cos T \quad (9)$$

Avec :

$$T = -\operatorname{tg} \delta \cdot \operatorname{tg} \phi$$

I.4.6. Durée d'insolation D_{Is} d'un capteur (α, γ)

La durée d'insolation (D_{Is}) est la durée effective d'insolation d'un capteur mesurée par héliographe et définie à partir d'un seuil minimum ($\approx 250 \text{ w/m}^2$).

Pour un plan (α, γ) , un lieu ϕ et un jour donné i est uniquement fonction de l'angle horaire H , on exprimera donc $\cos i$ en faisant bien apparaître la variable H .

$$\cos(i) = A \cdot \sin(H) + B \cdot \cos(H) + C \quad (10)$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} A = A' \cos(\delta) \\ A' = \sin(\alpha) \cos(\gamma) \\ B = B' \cos(\delta) \\ B' = \cos(\alpha) \cos(\gamma) \sin(\phi) + \sin(\gamma) \cos(\phi) \\ C = C' \sin(\delta) \\ C' = -\cos(\alpha) \cos(\gamma) \cos(\phi) + \sin(\gamma) \cos(\phi) \end{array} \right.$$

Le lever H_L , et le coucher H_C , du soleil sur un capteur sont définis pour:

$$\begin{aligned} i = \pm 90^\circ &\Rightarrow \cos(i) = 0 \\ &\Rightarrow A \cdot \sin(H) + B \cdot \cos(H) + C = 0 \end{aligned}$$

La résolution de cette équation nous donne deux solutions une pour le lever et l'autre pour le coucher :

$$\left\{ \begin{array}{l} H_L = \rho(\alpha) \arccos\left(\frac{B'}{D'}\right) - \arccos\left(\frac{-C'}{D'}\right) \operatorname{tg}(\delta) \\ H_C = \rho(\alpha) \arccos\left(\frac{B'}{D'}\right) + \arccos\left(\frac{-C'}{D'}\right) \operatorname{tg}(\delta) \end{array} \right.$$

Avec :

$$D' = \sqrt{A'^2 + B'^2}$$

$$\rho(\alpha) = \operatorname{Singe} \text{ de } \alpha$$

La durée d'ensoleillement d'un capteur est donnée par:

$$D_{ts} = \frac{H_2 - H_1}{15} \quad (11)$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} H_1 = H_L' \\ H_1 = H_L \\ H_2 = H_C \\ H_2 = H_C' \end{array} \right. \quad \text{Si} \quad \left\{ \begin{array}{l} H_L' \leq H_L \\ H_L' \geq H_L \\ H_C' \leq H_C \\ H_C' \geq H_C \end{array} \right.$$

I.5. Energie solaire photovoltaïque

I.5.1. 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. 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.

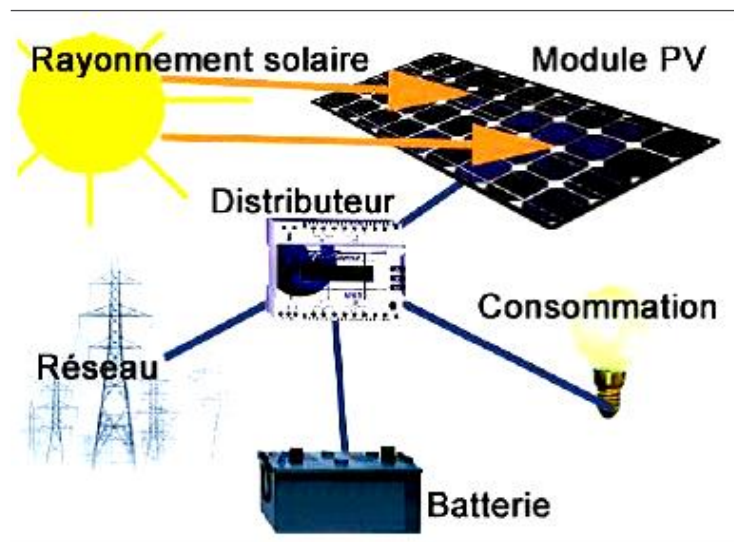


Figure 6 : Système Photovoltaïque.

I.5.2. Historique

L'histoire de l'électricité qui traite de la transformation directe de l'énergie solaire en énergie électrique, est apparue en 1930 avec les cellules à oxydes cuivreux puis au sélénium, mais ce n'est qu'en 1954, avec la réalisation de premières cellules photovoltaïques au sélénium dans les laboratoires de la compagnie Bell téléphonent, que l'on entrevoit la possibilité de fournir de l'énergie. Très rapidement utilisés pour l'alimentation des véhicules spatiaux, leur développement et de rapides progrès ont été motivés par la conquête de l'espace. Au cours des années 80, la technologie photovoltaïque terrestre a progressé régulièrement par la mise en place de plusieurs centrales de quelque mégawatt, et même devenue familière des consommateurs à travers de nombreux produits de faibles puissances y faisant appel : montres, calculatrices, balises radio et météorologique, pompes et réfrigérateurs solaires. Des événements tels que les courses de véhicules solaires offrant une image de haute technologie futuristes et écologiques y ont également contribué.

I.5.3. Électricité solaire par effet photovoltaïque

I.5.3.1. Principe de fonctionnement

L'effet photovoltaïque a été découvert par le physicien français 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.

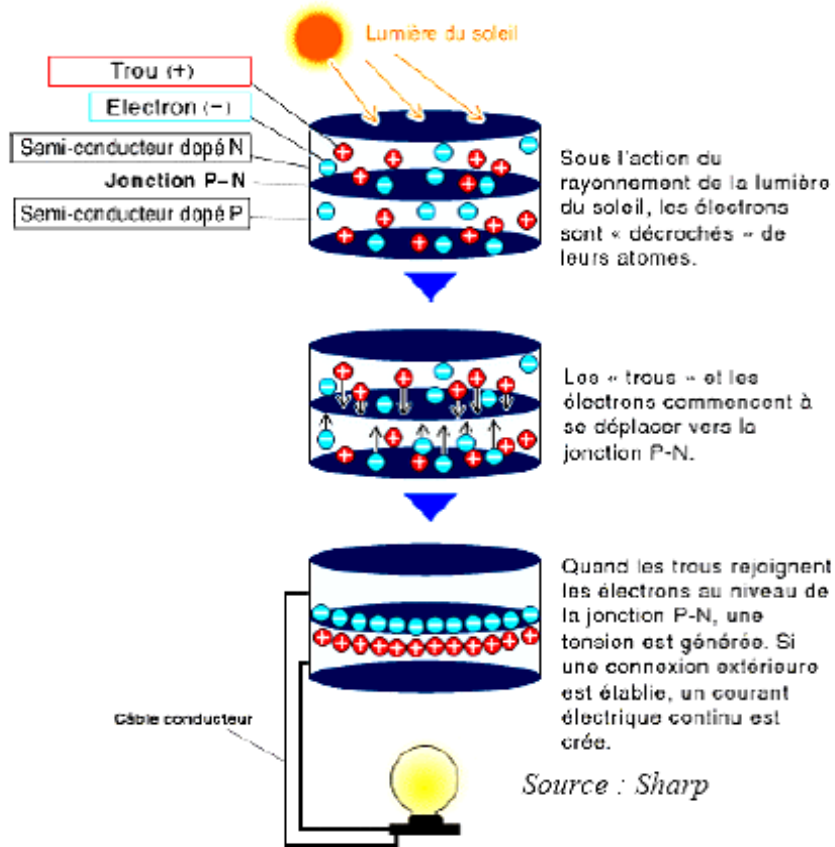


Figure 7 : effet Photovoltaïque

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 (Fig.8).
- ❖ 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.

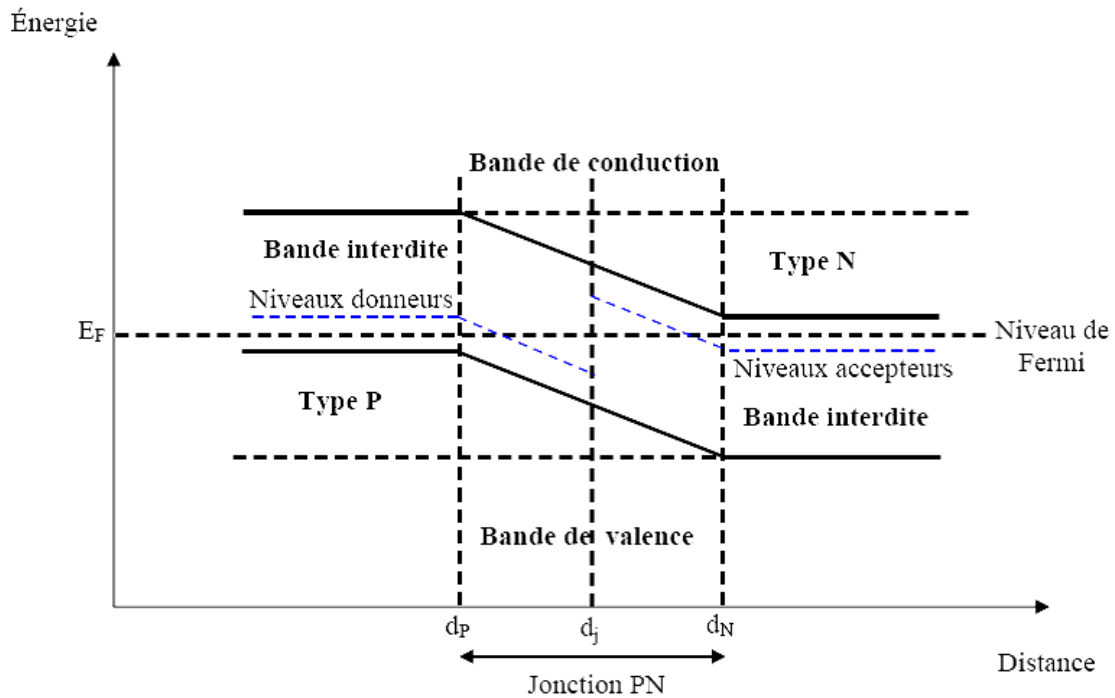


Figure 8 : Diagrammes de bandes d'énergie au voisinage de la jonction.

I.5.3.2. 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 9). 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.

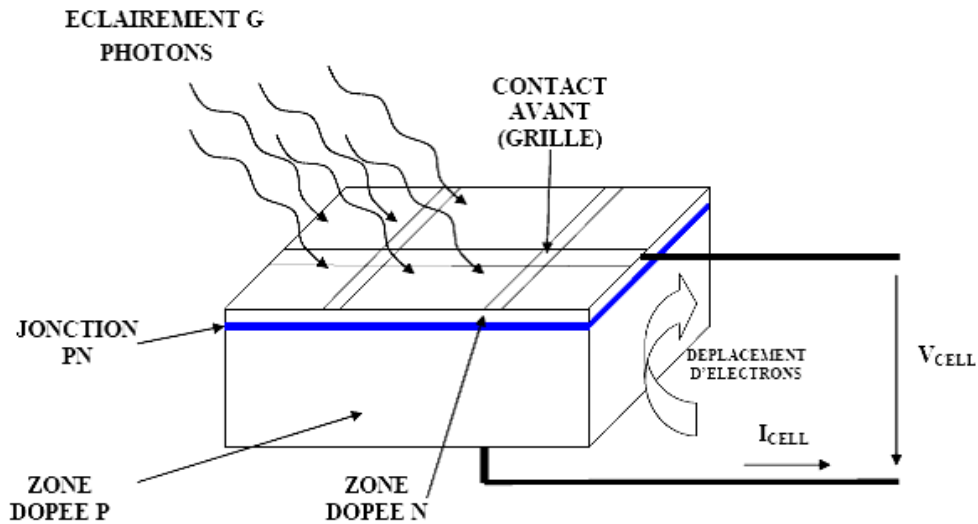


Figure 9 : Coupe transversale d'une cellule PV typique.

I.5.3.3. 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.

I.5.4. 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 :

I.5.4.1 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 (Fig.10).

Son procédé de fabrication est long et exigeant en énergie; plus on étend, 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. Après divers traitements (traitement de surface à l'acide, dopage et création de la jonction P-N, dépôt de couche antireflet, pose des collecteurs), le Wafer devient cellule.

Les cellules sont rondes ou presque carrées et, vues de près, elles ont une couleur uniforme. Elles ont un rendement de 15 à 22 %, mais la méthode de production est laborieuse.

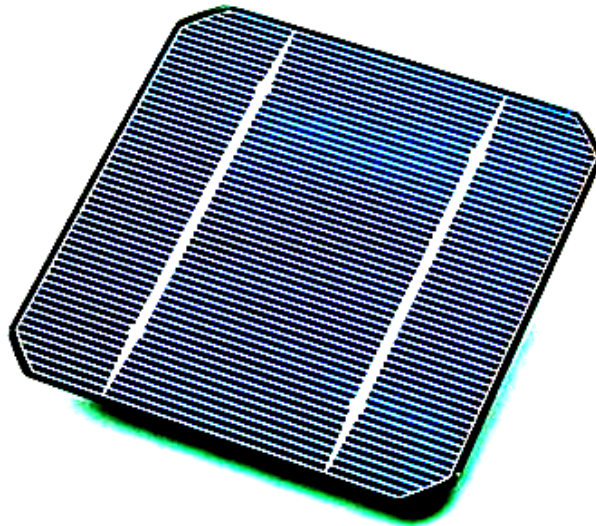


Figure 10: Cellule photovoltaïque (monocristalline).

I.5.4.2. Cellules poly cristallines

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 (tonalités différentes),(Fig.11).

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.



Figure 11 : Cellule PV poly cristalline. Source: Wikipédia.

I.5.4.3. 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 Poly-cristallines ou monocristallines.

Cependant, le silicium amorphe permet de produire des panneaux de grandes surfaces à bas coût en utilisant peu de matière première.

Matériau	Rendement	Longévité	Caractéristique	Principales Utilisations
Silicium monocristallin	12 à 18% (24,7% en laboratoire)	20 a 30 ans	* Très performant * Stabilité de production. * Méthode de production coûteuse et laborieuse.	Aérospatiale, modules pour toits, façades,...
Silicium polycristallin	11 à 15% (19,8% en laboratoire)	20 a 30 ans	* Adapté à la production à grande échelle. * Stabilité de production, Plus de 50% du marché mondial.	Modules pour toits, façades, générateurs...
Amorphe	5 à 8% (13% en laboratoire)		* Peut fonctionner sous la lumière fluorescente. * Fonctionnement si faible luminosité * Fonctionnement par temps couvert. * Fonctionnement si ombrage partiel * La puissance de sortie varie dans le temps. En début de vie, la puissance délivrée est de 15 à 20% supérieure à la valeur nominale et se stabilise après quelques mois.	Appareils électroniques (montres, calculatrices...), intégration dans le bâtiment

Tableau 2 : Comparatif des différentes technologies.

I.5.5. 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 (Fig.12).

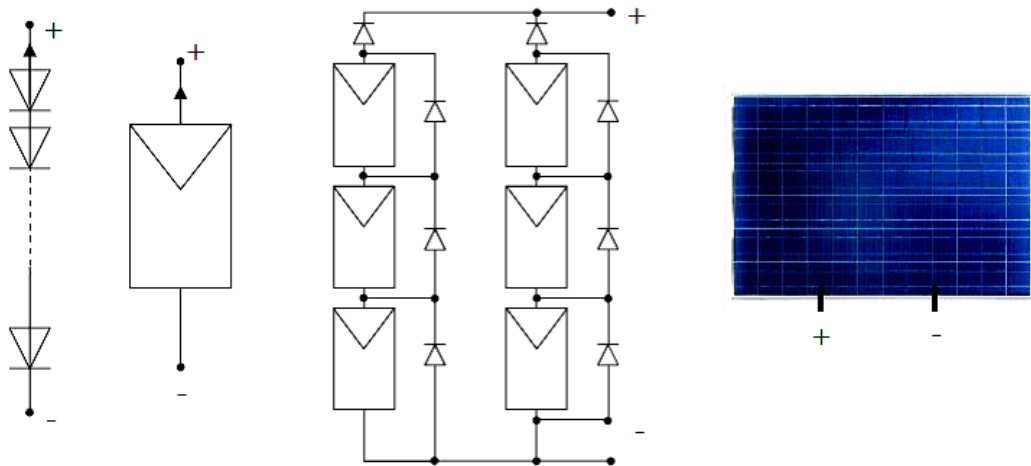


Figure 12 : Cellules, module et panneau photovoltaïques.

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.

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.

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.

I.5.6. Générateur photovoltaïque

Dans des conditions d'ensoleillement standard (1000W/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.

$$V_{CO(NS)} = n_s \cdot V_{CO} \quad \text{Avec} \quad I_{CC} = I_{CC}(n_s) \quad (12)$$

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 (Fig.13), l'équation (11) 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 ($V_{cons}=0,6 \times 36=21,6\text{V}$) afin d'obtenir une tension optimale du panneau V_{opt} proche de celle d'une tension de batterie de 12V .

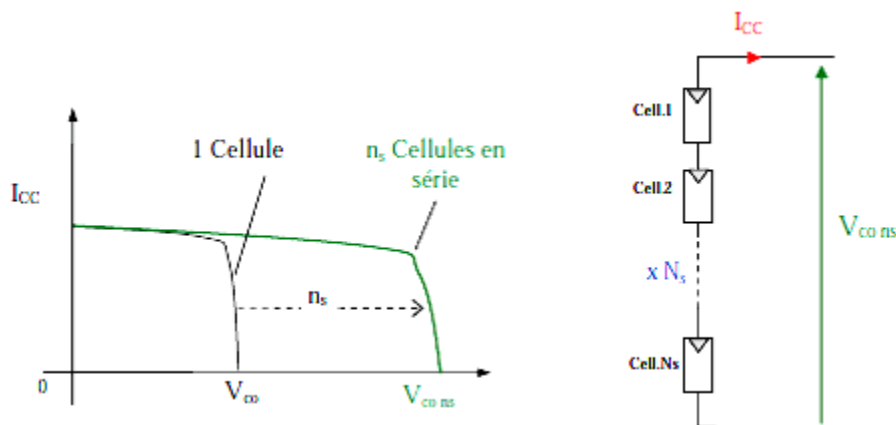


Figure 13 : Caractéristiques résultantes d'un groupement de n_s cellules en série.

D'autre part, une association parallèle de np 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 (Fig.14). L'équation (12) résume à son tour les caractéristiques électriques d'une association parallèle de np cellules.

$$I_{SC(Np)} = n_p \cdot I_{SC} \quad \text{Avec} \quad V_{CO(np)} = V_{CO} \quad (13)$$

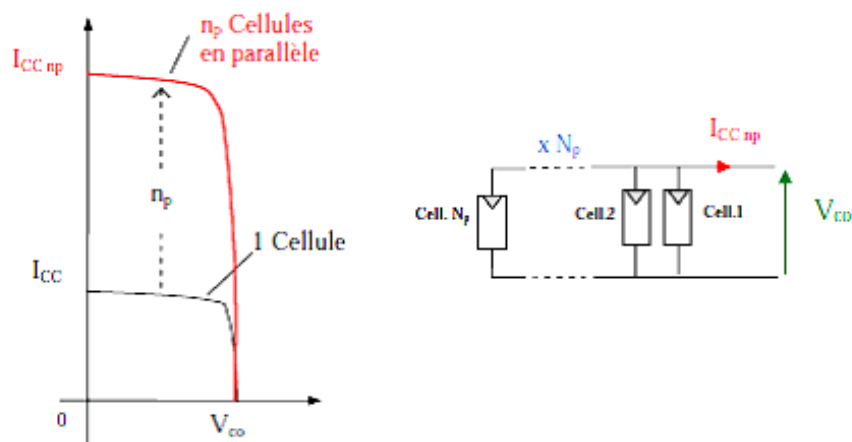


Figure 14 : Caractéristiques résultant d'un groupement de np cellules en parallèle.

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

Ainsi, pour n_s cellules en série, constituant des branches elles-mêmes n_p en parallèle, la puissance disponible en sortie du générateur PV est donnée par :

$$P_{PV} = n_s \cdot V_{PV} \cdot n_p \cdot V_{PV} \quad (14)$$

Si l'on désire avoir un générateur PV ayant un courant de sortie plus intense, on peut soit faire appel à des cellules PV de plus grande surface et de meilleur rendement, soit associer en parallèle plusieurs modules PV de caractéristiques similaires. Pour qu'un générateur PV ainsi constitué puisse fonctionner de façon optimale, il faut que les (n_s , n_p) cellules se comportent toutes de façon identique. Elles doivent pour cela être issues de la même technologie, du même lot de fabrication et qu'elles soient soumises aux mêmes conditions de fonctionnement (éclairage, température, vieillissement et inclinaison).

La puissance du générateur PV sera optimale si chaque cellule fonctionne à sa puissance maximale notée P_{max} . Cette puissance est le maximum d'une caractéristique $P(V)$ du générateur, et correspond au produit d'une tension optimale notée V_{opt} d'un courant optimal noté I_{opt} . Cette caractéristique dépend fortement de l'éclairement auquel est soumis le générateur et de sa température.

I.5.7. Conversion de l'énergie solaire photovoltaïque

➤ Chaîne de conversion électrique

Dans le cas d'installations autonomes, l'énergie produite par les panneaux solaires photovoltaïques est utilisée immédiatement (pompage, ventilation, etc....) ou stockée dans des batteries pour une utilisation différée (Fig.15). Le courant continu produit alimente directement des appareils prévus à cet effet ou est transformé en 230 Volts alternatif.

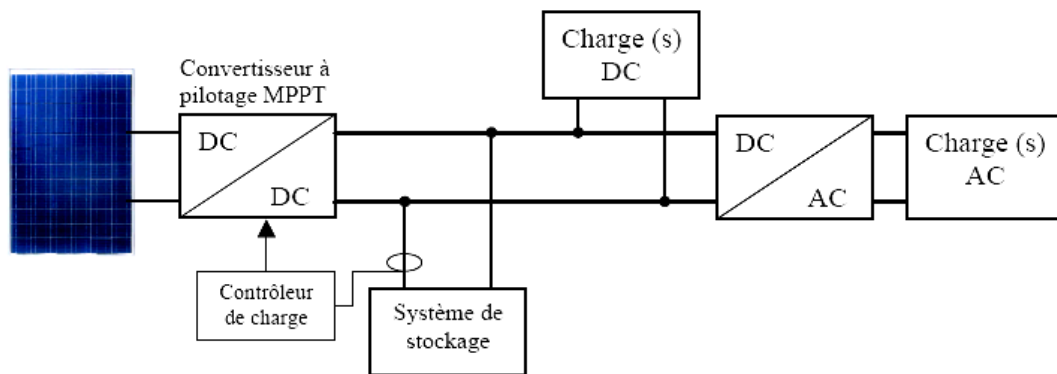


Figure 15: Installation photovoltaïque autonome.

Le système peut également être connecté au réseau. L'avantage du raccordement est de se dispenser du coûteux et problématique stockage de l'électricité. Dans ses versions les plus économiques l'onduleur ne peut fonctionner qu'en présence du réseau, une éventuelle panne de ce dernier rend inopérant le système de production d'origine renouvelable. Un onduleur réversible est nécessaire si on a une charge à courant continu (Fig.16). Si la consommation locale est supérieure à la production de la centrale, l'appoint est fourni par le réseau. Dans le cas contraire, l'énergie est fournie au réseau public et sert à alimenter les consommateurs voisins.

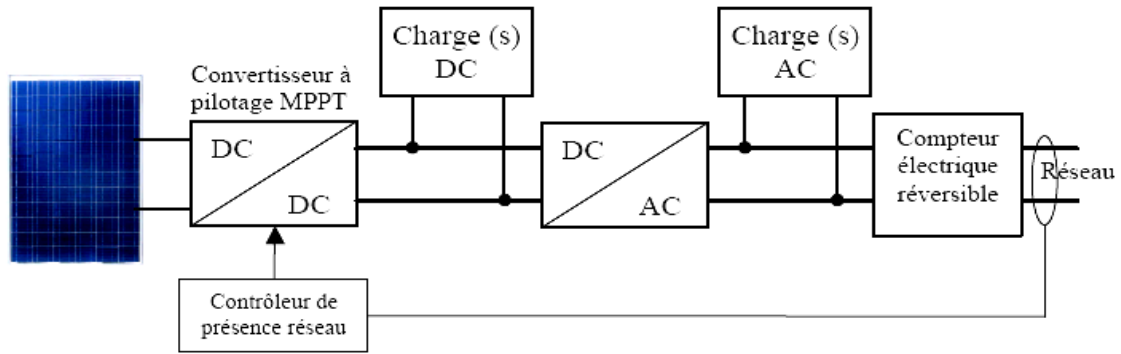


Figure 16 : Installation photovoltaïque couplée au réseau.

I.5.8. Avantages et inconvénients de la technologie photovoltaïque

- 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.
- Élimination des frais des risques de transport associés des énergies fossiles.

-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.
- Tributaire 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 5 ans), ce qui entraîne un surcoût au fonctionnement.

I.6.Énergie éolienne

I.6.1. Introduction

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Cette énergie est tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur comme une éolienne ou un moulin à vent (Fig.17).

Après avoir pendant longtemps oublié cette énergie pourtant exploitée depuis l'antiquité elle connaît depuis environ 30 ans un essor sans précédent qui est dû notamment aux premiers chocs pétroliers. A l'échelle mondiale, l'énergie éolienne depuis une dizaine d'années maintient une croissance de 30% par ans.



Figure 17 : Capacité mondiale totale installée en (MW).

I.6.2 Historique

Parmi toutes les énergies renouvelables, à part l'énergie du bois, c'est l'énergie du vent qui a été exploitée en premier par l'homme. Depuis l'antiquité, elle fut utilisée pour la propulsion des navires et ensuite les moulins à blé et les constructions permettant le pompage d'eau. Les premières utilisations connues de l'énergie éolienne remontent à 2 000 ans avant J.-C environ.

La Première description écrite de l'utilisation des moulins à vent en Inde date d'environ 400 ans avant J.-C. En Europe, ce n'est qu'au VII^{ème} siècle que l'on voit apparaître les premiers moulins à vent. Utilisés tout d'abord pour mouliner le grain, d'où leur nom de " moulins ", ils furent aussi utilisés aux Pays-Bas pour assécher des lacs ou des terrains inondés.

A l'arrivée de l'électricité donne l'idée au britannique Lord Kelvin en 1802 de songer pour la première fois à transformer l'énergie éolienne en énergie électrique. En effet il essaya d'associer une génératrice d'électricité à un moteur éolien, mais en fait il faudra attendre 1850 et l'avènement de la dynamo pour qu'on puisse voir ce que l'on appellera les « aérogénérateurs ». Cette nouvelle application de l'énergie éolienne a connu un certain succès, et l'on comptait en 1920 jusqu'à 300 constructeurs d'aérogénérateurs. « Malheureusement », à cette époque, le faible coût du pétrole avait mis le kilowatt fourni par l'énergie thermique à un niveau de compétitivité inaccessible à l'énergie éolienne.

Dés 1973, le processus inverse a, petit à petit, relancé les programmes d'études et de réalisation d'aérogénérateurs. Mais les budgets de recherche et de développement, ainsi que les aides gouvernementales fluctuent avec le prix du baril de pétrole, et les aides accordées aux autres énergies (photovoltaïque en particulier). Toutefois au cours des dernières années se dessine une nette tendance au développement de « fermes éoliennes » ou « parcs éoliens » raccordés aux réseaux de distribution avec les machines de 300KW à 1.5MW. Ces éoliennes servent aujourd'hui à produire du courant alternatif pour les réseaux électriques, au même titre qu'un réacteur nucléaire, un barrage hydro-électrique ou une centrale thermique au charbon. Cependant, les puissances générées et les impacts sur l'environnement ne sont pas les mêmes.

I.7. Définition de l'énergie éolienne

L'énergie en provenance du vent traverse la turbine éolienne qui est un élément d'interface entre le domaine de la mécanique des fluides et de la mécanique traditionnelle. L'intérêt d'une éolienne se justifie par la possibilité qu'elle apporte de récupérer l'énergie cinétique présente dans le vent et la transformée en énergie mécanique de rotation, Cette énergie mécanique peut être exploitée principalement de deux manières :

- Soit conservation de l'énergie mécanique : le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (navire à voile ou char à voile), pour pomper de l'eau (moulins de Majorque,

éoliennes de pompage pour abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin.

- Soit Transformation en énergie électrique : l'éolienne est accouplée à un générateur électrique pour fabriquer du courant continu ou alternatif, le générateur est relié à un réseau électrique ou bien il fonctionne de manière autonome avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène) et/ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie.

I.8. Architecture d'une éolienne

On peut considérer trois composants essentiels dans une éolienne, le rotor, la nacelle et la tour (Fig.18) :

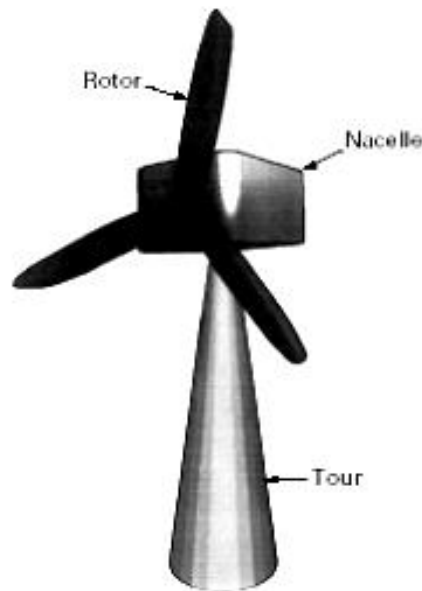


Figure 18 : Composants d'une éolienne.

I.8.1. Rotor

C'est le capteur d'énergie qui transforme l'énergie du vent en énergie mécanique. Le rotor est un ensemble constitué de pales et de l'arbre primaire, la liaison entre ces éléments étant assurée par le moyeu. Sur certaines machines, l'arbre primaire qui tourne à faible vitesse comporte un dispositif permettant de faire passer des conduites hydrauliques entre la nacelle (repère fixe) et le moyeu (repère tournant). Cette installation hydraulique est notamment utilisée pour la régulation du fonctionnement de la machine (pas des pales variables, freinage du rotor...).

I.8.2. Nacelle

Son rôle est d'abriter l'installation de génération de l'énergie électrique ainsi que ses périphériques. Différentes configurations peuvent être rencontrées suivant le type de la machine (Fig.19). Présente une coupe d'une nacelle avec ses différents composants :

- Multiplicateur de vitesse : il sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique. En effet, la faible vitesse de rotation de l'éolienne ne permettrait pas de générer du courant électrique dans de bonnes conditions avec les générateurs de courant classiques.
- L'arbre secondaire comporte généralement un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine.
- Générateur : différents types de génératrices peuvent être rencontrés.
- Contrôleur électronique chargé de surveiller le fonctionnement de l'éolienne. Il s'agit en fait d'un ordinateur qui peut gérer le démarrage de la machine lorsque la vitesse du vent est suffisante (de l'ordre de 5 m/s), gérer le pas des pales, le freinage de la machine, l'orientation de l'ensemble rotor, nacelle face au vent de manière à maximiser la récupération d'énergie et réduire les efforts instationnaires sur l'installation. Pour mener à bien ces différentes tâches, le contrôleur utilise les données fournies par un anémomètre (vitesse du vent) et une girouette (direction du vent), habituellement situés à l'arrière de la nacelle. Enfin, le contrôleur assure également la gestion des différentes pannes éventuelles pouvant survenir.
- Divers dispositifs de refroidissement (générateur, multiplicateur) par ventilateurs, radiateurs d'eau, ou d'huile.
- Dispositif d'orientation de la nacelle : Il permet la rotation de la nacelle à l'extrémité supérieure de la tour, autour de l'axe vertical. L'orientation est généralement assurée par des moteurs électriques, par l'intermédiaire d'une couronne dentée. De nombreuses éoliennes comportent un système de blocage mécanique de la position de la nacelle suivant une orientation donnée ; cela évite de solliciter constamment les moteurs et permet aussi de bloquer l'éolienne durant les opérations de maintenance.

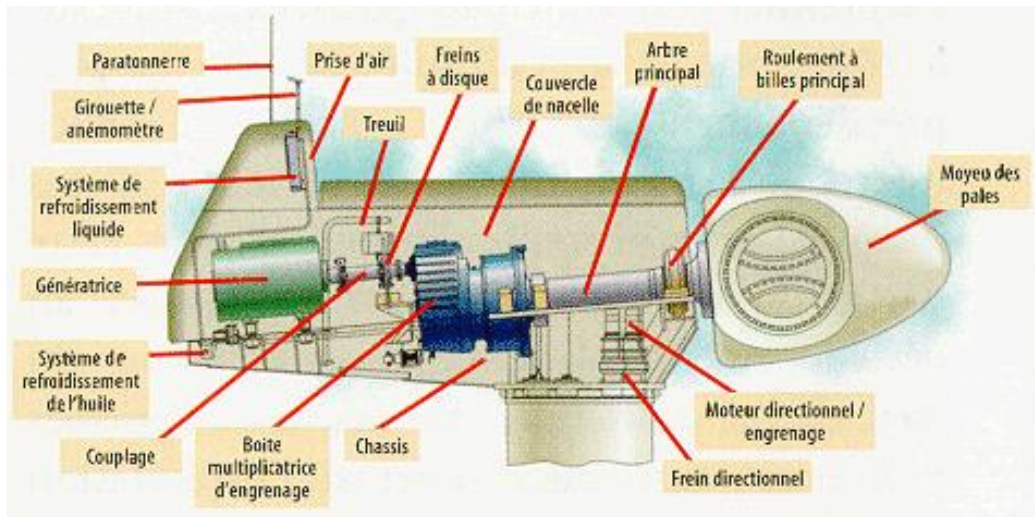


Figure 19: Eléments d'une nacelle.

I.8.3. Tour

Son rôle est d'une part de supporter l'ensemble rotor, 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 le captage de l'énergie. Certains constructeurs proposent ainsi différentes hauteurs de tour pour un même ensemble (rotor, nacelle), de manière à s'adapter au mieux aux différents sites d'implantation.

I.9. Fonctionnement d'une éolienne

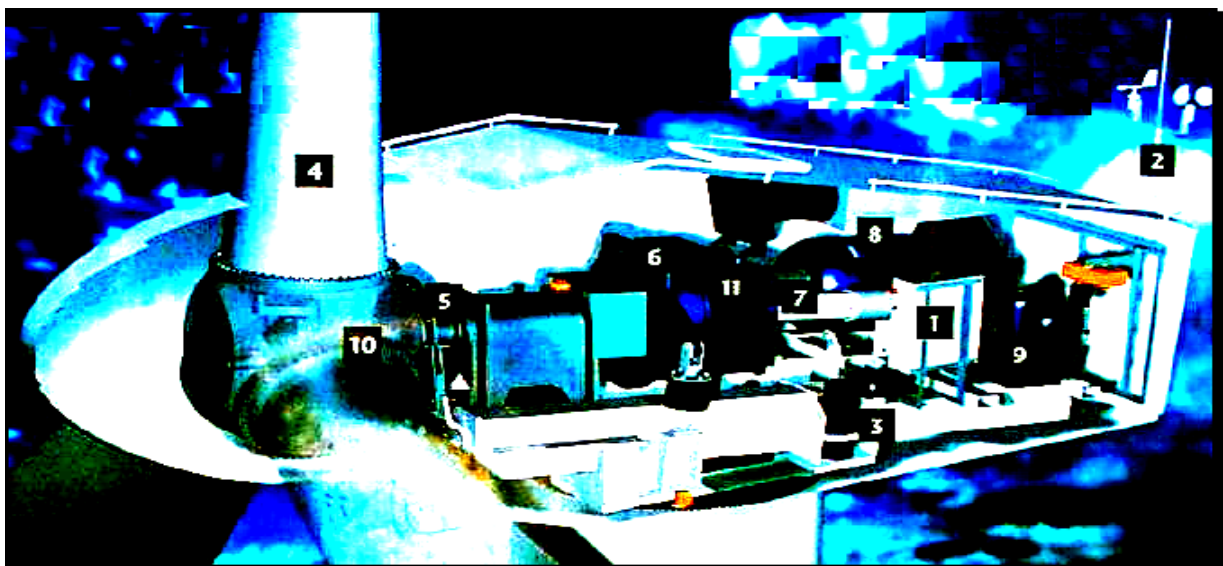


Figure 20 : Principe de fonctionnement d'une éolienne.

Quand le vent se lève, l'automate (1), grâce à sa girouette (2) située à l'arrière de la nacelle commande un moteur d'orientation (3) de placer l'éolienne face au vent. Les trois pales (4) sont mises en mouvement par la seule force du vent. Elles entraînent avec elles l'axe lent (5), le multiplicateur (6), l'arbre rapide (7), et la génératrice (8).

Lorsque le vent est suffisant (4 m/s soit 14.5 km/h), l'éolienne peut-être couplée au réseau électrique. Le rotor tourne alors à sa vitesse nominale aux environs de 30 tr/min et la génératrice à 1500 tr/min. Ces vitesses de rotation vont rester constantes tout au long de la période de production. La génératrice délivre alors un courant électrique alternatif à la tension de 690V et dont l'intensité varie en fonction de la vitesse du vent. Ainsi, lorsque la vitesse du vent croît, la portance s'exerçant sur le rotor augmente et la puissance délivrée par la génératrice s'accroît.

Quand le vent atteint 50 km/h, l'éolienne fournit sa puissance nominale. Cette puissance est alors maintenue constante en réduisant progressivement la portance des pales. L'unité hydraulique (9) régule la portance en modifiant l'angle de calage des pales qui pivotent sur leurs roulements (10).

Lorsque le vent dépasse 90 km/h, les pales sont mises en drapeau et leur portance devient quasiment nulle, l'éolienne ne produit pas d'électricité. Tant que la vitesse du vent reste supérieure à 90 km/h, le rotor tourne en roue libre et la génératrice est déconnectée du réseau. Dès que la vitesse du vent diminue, l'éolienne se remet en mode de production.

Toutes ces opérations sont automatiques et entièrement gérées par ordinateur. En cas d'arrêt d'urgence, un frein à disque (11) placé sur l'axe rapide permet de mettre la machine en sécurité.

I.10. Caractéristiques des éoliennes

On classe les éoliennes suivant la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est monté l'hélice. Il existe principalement deux types de turbines éoliennes :

- Eolienne à axe horizontal.
- Eolienne à axe vertical.

I.10.1. Eolienne à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent (Fig.21). Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien.



Figure 21 : Eoliennes à axes horizontal.

On peut distinguer des éoliennes dont l'hélice est en amont par rapport au vent, « hélice au vent » (Fig.22.a), et ceux dont l'hélice est en aval par rapport au vent, « hélice sous le vent » (Fig.22.b).

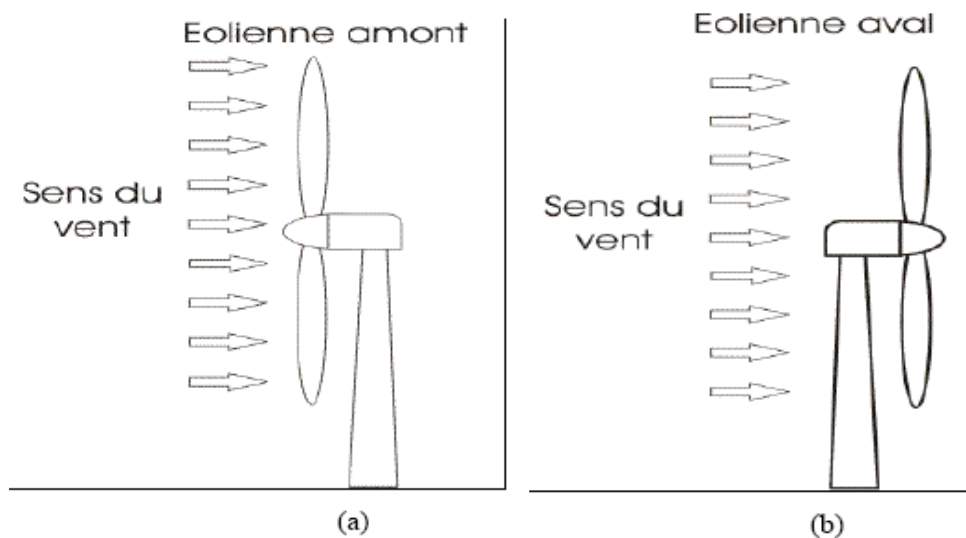


Figure 22 : Eolienne à axe horizontal.

I.10.2. Eolienne à axe vertical

Elles présentent certains avantages : machineries au sol, pas besoin d'orientation en fonction de la direction du vent, construction souvent simple. Elles tournent à faible vitesse et sont de ce fait peu bruyantes. Elles présentent par contre des difficultés pour leur guidage mécanique, le palier bas devant supporter le poids de l'ensemble de la turbine.

Il existe principalement trois technologies de ce type d'éoliennes (Fig.23) :

- Turbines Darrieus classiques,
- Turbines Darrieus à pales droites (type-H),
- Turbines Savonius.



Figure 23 : Eoliennes à axes vertical.

I.11. Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne

La régulation d'une source éolienne de secours est un facteur primordial pour son bon fonctionnement. Ce système permet d'assurer la sécurité de l'éolienne en cas de trop forte vitesse de l'avion au déploiement, mais aussi, de limiter sa puissance pour éviter une détérioration des composants mis en jeu. Cette source éolienne est dimensionnée pour développer sur son arbre une puissance nécessaire, dénommée puissance nominale P_n . Cette puissance P_n est obtenue à partir de la vitesse V_n (vitesse nominale) du vent relatif. Lorsque la vitesse du vent est supérieure à V_n la turbine éolienne doit modifier ses paramètres afin d'éviter sa destruction mécanique, en faisant de sorte que sa vitesse de rotation reste pratiquement constante. A côté de la vitesse nominale V_n du vent relatif, on spécifie aussi :

- Vitesse de démarrage V_D , à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie.
- Vitesse maximale du vent relatif V_M , pour laquelle la turbine ne convertit plus l'énergie éolienne, pour des raisons de sûreté de fonctionnement. Les vitesses V_n , V_D et V_M

définissent quatre zones sur le diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent (Fig.24).

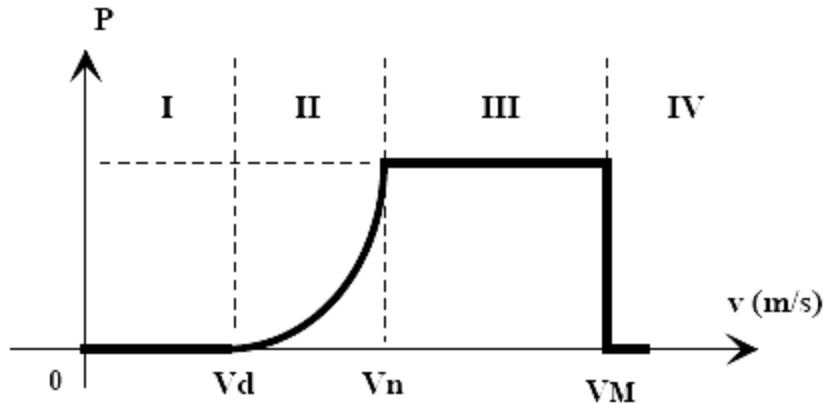


Figure 24 : Diagramme de la puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent.

- Zone I, où $P = 0$ (la turbine ne fonctionne pas).
- Zone II, dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent V .
- Zone III, où la vitesse de rotation est maintenue constante et où la puissance P fournie reste égale à P_n .
- Zone IV, dans laquelle le système de sûreté de fonctionnement arrête le transfert de l'énergie.

I.12. Notions théoriques sur l'éolien

I.12.1. Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. L'énergie cinétique d'une colonne d'air de longueur d , de section S , de masse volumique ρ , animée d'une vitesse v , (Fig.25) s'écrit :

$$dEc = \frac{1}{2} \rho S \cdot dx \cdot v^2 \quad (15)$$

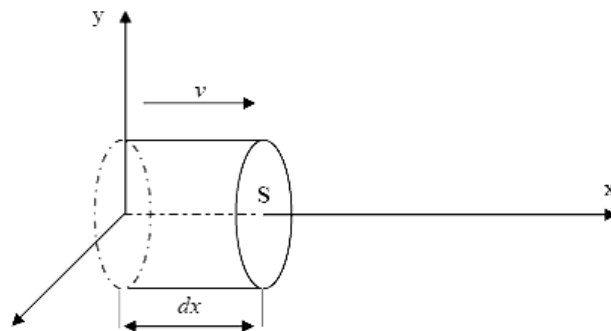


Figure 25 : Colonne d'air animée d'une vitesse V .

La puissance P_m extraite du volume d'air en mouvement est la dérivée de l'énergie cinétique par rapport au temps.

En supposant $dx = vdt$, on déduit l'expression de P_m :

$$P_m = \frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2} \rho S_0 V^3 \quad (16)$$

ρ : Densité volumique de l'air (Kg/m³)

V : vitesse du vent (m/s)

E_c : Energie cinétique du vent (Joules).

I.12.2 Loi de Betz

La théorie globale du moteur éolien à axe horizontal a été établie par Albert BETZ en 1929, qui suppose que le moteur éolien est placé dans un air animé à l'infini en amont d'une vitesse V_1 et à l'infini en aval d'une vitesse V_2 . La production d'énergie ne pouvant se faire que par la conversion de l'énergie cinétique du vent, la vitesse V_2 est nécessairement inférieure à V_1 . Il en résulte que la veine de fluides traverse le générateur éolien en s'élargissant.

Soit V' , la vitesse au travers de S , la section balayée par les pales de l'éolienne (Voire Fig.26), et M la masse d'air qui traverse l'éolienne, la variation de l'énergie cinétique ΔE_c est :

$$\Delta E_c = \frac{1}{2} \cdot M \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (17)$$

La puissance aérodynamique de l'éolienne P_{aer} s'écrit alors :

$$P_{aer} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V' \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (18)$$

Par ailleurs, la force de l'air (F) sur l'éolienne est donnée par:

$$F = \rho \cdot S \cdot V' \cdot (V_1 - V_2) \quad (19)$$

D'où :

$$P_{aer} = F \cdot V' = \rho \cdot S \cdot V' \cdot (V_1 - V_2) \quad (20)$$

En identifiant les équations (17) et (19), il vient :

$$V' = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (21)$$

Et donc :

$$Paer = \frac{1}{4} \rho \cdot S \cdot (V_1^2 - V_2^2) \cdot (V_1 + V_2) \quad (22)$$

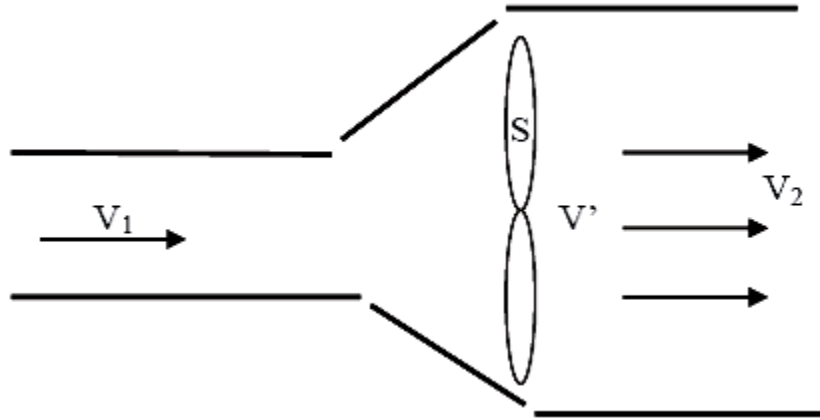


Figure 26 : Théorie de Betz : Schéma de principe.

La puissance de l'éolienne sera alors maximale quand sa dérivée $\frac{\partial Paer}{\partial V_2}$ est nulle,

soit pour $V_2 = \frac{V_1}{3}$, la puissance est maximale et vaut :

$$Paer = Paer_{Max} = C_{P_{max}} \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot V_1^3}{2} = \frac{16}{27} \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot V_1^3}{2} \quad (23)$$

On peut donc en déduire que même si la forme des pales permet d'obtenir $V_2 = \frac{V_1}{3}$, on ne récupère au mieux que 0.593 fois l'énergie cinétique de la masse d'air amont, on écrira alors :

$$Paer = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot V_1^3}{2} \quad (24)$$

Où C_p est le coefficient de puissance de l'éolienne (valeur maximale 0.593). Ce coefficient dépend de la vitesse du vent en amont V_1 , du nombre de pales, de leur rayon, de leur angle de calage et de leur vitesse de rotation.

I.12.3. Vitesse spécifique ou normalisée

On définit la vitesse spécifique ou normalisée λ comme étant le rapport de la vitesse linéaire en bout de pales de la turbine ΩR sur la vitesse instantanée de vent V (Fig.27) et donné par l'expression suivante:

$$\lambda = \frac{\Omega \cdot R_t}{V} \quad (25)$$

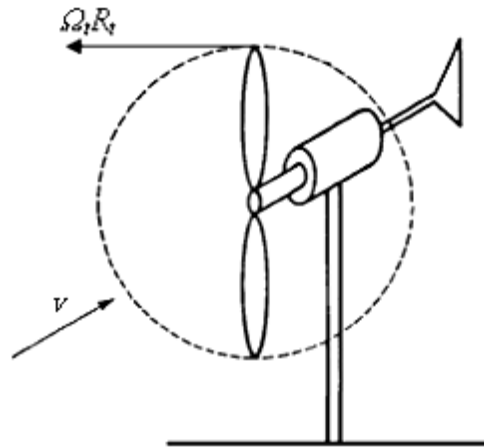


Figure 27 : Vitesse de vent (V) et vitesse tangentielle de l'aubage $\Omega t R_t$

R_t : Rayon de la surface balayée (m)

V : Vitesse de vent (m/s)

Ωt : Vitesse de rotation avant multiplicatrice (rad/s).

I.12.4. Coefficient de puissance

On définit le coefficient de puissance, le rapport entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible.

$$C_p = \frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left(1 + \frac{V_2}{V_1}\right) + \left(1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2\right)}{2} \quad (26)$$

Le coefficient C_p est variable, il est en fonction de la vitesse du vent, de la vitesse de rotation de la turbine Ωt , et les paramètres des pales de la turbine comme l'angle d'incidence et l'angle de calage. Il est souvent représenté en fonction de la vitesse spécifique λ . La valeur maximale théorique possible du coefficient de puissance, appelé limite de BETZ, est de $16/27$ soit 0.593.

Cette limite n'est en réalité jamais atteinte, et les meilleures machines à axe horizontal, bipale ou tripale, se situent à 60-65% de la limite de BETZ ; on ne récupère globalement que 40% de l'énergie due au vent. On déduit alors le rendement aérodynamique :

$$\eta = \frac{16}{27} C_{p \max} \quad (27)$$

$C_{p \max}$ étant la valeur maximale que peut prendre le coefficient de puissance C_p . Cette valeur est associée à une vitesse spécifique nominale λ_{opt} pour laquelle la turbine a été dimensionnée suivant une vitesse de vent nominale V_n et une vitesse de rotation nominale Ω_n .

I.12.5. Coefficient de couple

Le coefficient de couple C_m est assez proche du coefficient de puissance C_p . Il est fort utile afin d'estimer la valeur des couples pour différents points de fonctionnement, notamment à vitesse de rotation Ω_t nulle, ce qui correspond à une valeur de C_p nulle pour une valeur de C_m non nulle.

En combinant les équations (23) (24) (25), la puissance mécanique P_m disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur peut s'exprimer par :

$$P_m = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho \pi R^3 V_1^3 \quad (28)$$

Avec :

$$\lambda_t = \frac{\Omega_t \cdot R_t}{V}$$

D'où l'expression du couple est la suivante :

$$T_t = \frac{P_m}{\Omega_t} = \frac{R_t \cdot P_m}{\lambda V} = \frac{C_p}{\lambda} \cdot \frac{1}{2} \rho \pi R_t^3 V^2 \quad (29)$$

La valeur du coefficient de couple est déterminée par la formule suivante :

$$C_m = \frac{C_p}{\lambda} = \frac{2T_t}{\rho S_t R_t V^2} \quad (30)$$

T_t : Couple de la turbine éolienne (N.m).

I.12.6. Distribution de Weibull

Le modèle le plus utilisé pour traduire la variation des vitesses de vent est la loi de distribution de Weibull Sa densité de probabilité se présente sous la forme:

$$f(v) = \left(\frac{K}{C}\right) \left(\frac{V}{C}\right)^{K-1} \exp\left(-\left(\frac{V}{C}\right)^K\right) \quad (31)$$

En assimilant les fréquences aux probabilités, la densité de probabilité (V) représente la distribution en fréquences des vitesses mesurées.

K et C sont des paramètres appelés communément les paramètres de Weibull. Le paramètre K (facteur de forme) est sans dimension et caractérise la forme de la distribution de fréquence alors que C détermine la qualité du vent (facteur d'échelle). Ce dernier a la dimension d'une vitesse.

La détermination de ces paramètres permet la connaissance de la distribution des vents pour un site donné Le traitement peut se faire directement ou en passant par les fréquences par classes en considérant les moyennes.

La fonction de répartition est donnée par :

$$f(V \leq V_x) = \int_0^{V_x} f(V) dV = 1 - \exp\left(-\left(\frac{V_x}{C}\right)^K\right) \quad (32)$$

$$f(V \geq V_x) = \int_{V_x}^{\infty} f(V) dV = \exp\left(-\left(\frac{V_x}{C}\right)^K\right) \quad (33)$$

I.13. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

Avantages

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable contrairement aux énergies fossiles.
- L'énergie éolienne est une énergie propre. Elle n'a aucun impact néfaste sur l'environnement comme les autres sources d'énergie qui ont causé un changement radical du climat par la production énorme et directe du CO₂.
- L'énergie éolienne ne présente aucun risque et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs contrairement à l'énergie nucléaire.
- Mode d'exploitation des éoliennes et la possibilité de les arrêter à n'importe quel moment, leur donne l'avantage d'avoir un bon rendement, contrairement aux modes de fonctionnement continus de la plupart des centrales thermiques et nucléaires.

Inconvénients

- Nature stochastique du vent a une influence sur la qualité de la puissance électrique produite, ce qui représente une contrainte pour les gérants des réseaux.
- Coût de l'énergie éolienne reste plus élevé par rapport aux autres sources d'énergie classique surtout sur les sites moins ventés.
- Bruit : il a nettement diminué grâce aux progrès réalisés au niveau des Multiplicateurs.

I.14. Conclusion

Ce Chapitre présente d'une part les différentes notions qui entrent dans la conception des deux énergies : **solaire photovoltaïque et éolienne**. Et d'autre part, la présentation de tous les éléments constitutifs des deux systèmes photovoltaïques et éoliens, ainsi que leurs principes de fonctionnements, ce qui permet d'introduire à l'analyse du système hybride formé par ces deux systèmes au chapitre II.

II.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 générateurs 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. Cependant, ces solutions exigent au préalable un dimensionnement laborieux basé sur une connaissance approfondie du gisement en énergies renouvelables du site d'implantation à l'amont, une gestion rigoureuse de l'énergie électrique produite à l'aval et un savoir faire que seule l'expérience dans l'ingénierie des systèmes énergétiques pourra assurer.

Cette gestion rigoureuse de l'énergie s'appuie sur l'intelligence des dispositifs de régulation et de contrôle rendu possible grâce à des logiciels très performants. Ces installations hybrides vont connaître, à moyen terme un intérêt certain grâce à leur flexibilité vis-à-vis des sources d'énergie primaire.

Nous allons présentés dans ce chapitre les différentes caractéristiques du système hybride photovoltaïque-éolien, en ce basant sur les différentes définitions des constitutifs de ce système.

II.2. Définition du système d'énergie hybride (S.E.H)

Le système hybride de production de l'énergie dans sa vue la plus générale, est celui qui combine et exploite plusieurs sources disponibles facilement mobilisables. Il consiste en l'association de deux ou plusieurs technologies complémentaires de manière à accroître la fourniture d'énergie par une meilleure disponibilité. Les sources d'énergie comme le soleil et le vent ne délivrent pas une puissance constante, et leur combinaison peut permettre de parvenir à une production électrique plus continue. Dans bien de régions, les journées ensoleillées sont en général caractérisées par une activité éolienne faible alors que les vents forts sont observés plutôt lors de journées nuageuses ou la nuit (Fig.28).



Figure 28 : Système d'énergie hybride photovoltaïque-éolien.

A : Panneau Photovoltaïque

a : Parafoudre

B : Éolienne

m : Moniteur de batterie

R : Chargeur de batterie

S : Sectionneur

1 : Disjoncteur de protection

2 : Régulateur charge/décharge ;

3 : Disjoncteur CC

4 : Batterie ;

5 : Onduleur ;

6 : Coffret de branchement électrique

7 : Charge électrique.

a : Parafoudre :

- Le parafoudre ou « suppresseur de surtension » va protéger le système contre les surtensions d'origine atmosphérique comme la foudre, en dérivant le courant de surtension vers la mise à la terre. Il est habituellement placé après le panneau, dans la boîte de jonction, pour dissiper le surplus d'énergie et écarter les hausses de tension. Dans le cas hybride il sera aussi placé dans la boîte de jonction associée à l'éolienne (Fig.29).

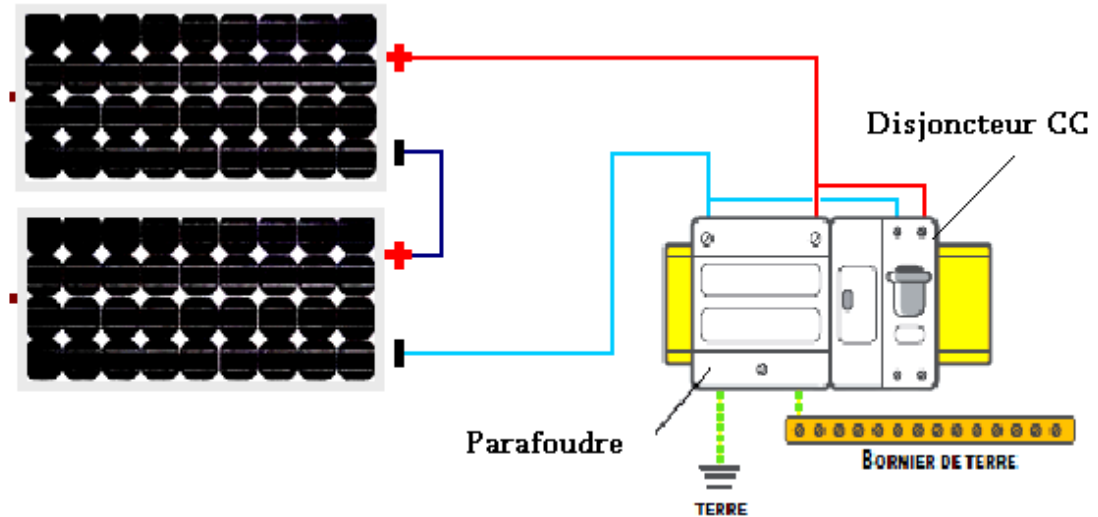


Figure 29 : Position du parafoudre dans le système d'énergie hybride.

m : Moniteur de batterie :

- Il affiche les valeurs de tension, de courant, et de capacité en ampère-heure de la batterie afin de vérifier et de contrôler son état.

R : Chargeur de batterie :

- Le rôle de cet appareil est de contrôler et réguler la charge de la batterie.

S : Sectionneur :

- C'est un interrupteur d'arrêt qui est placé après l'éolienne. Il a pour rôle d'isoler tout le système de l'éolienne, de façon à permettre l'entretien ou la réparation des équipements électriques. Il va assurer aussi la protection contre les surintensités dues à des défauts électriques.

1 : Disjoncteur de protection :

- C'est un disjoncteur à courant continu qui est installé entre le panneau photovoltaïque et le régulateur pour isoler et protéger le système lors de la maintenance du panneau ou quand survient un défaut électrique. Il doit pouvoir supporter le courant de court-circuit et la tension ouverte du panneau ou du champ PV.

2 : Régulateur charge/décharge :

- Il est installé entre la batterie et le panneau Photovoltaïque; Il sert à contrôler le courant qui rentre ou qui sort de la batterie afin d'éviter qu'elle ne soit endommagée par un excès de charge ou de décharge.

3 : Disjoncteur CC :

- C'est un disjoncteur à courant continu qui est installé entre la batterie et l'onduleur pour isoler et protéger le circuit batterie onduleur contre des défauts électriques. Il est indispensable lorsque l'onduleur n'est pas lui-même équipé d'une protection à basse tension. On peut cependant utiliser à la place du disjoncteur, un fusible branché sur le conducteur non mis à la terre. Tous ces dispositifs doivent être conformes aux normes et aux codes en vigueur pour les installations CC et CA.

5 : Onduleur :

- L'onduleur convertit le courant continu sortant de la batterie en courant alternatif nécessaire au fonctionnement de la majorité des appareils électriques domestiques. Faire attention dans le choix de l'onduleur car la forme d'onde qu'il reproduit peut ne pas convenir à certains appareils; aussi l'onduleur doit pouvoir absorber le pic de puissance lors de leur allumage. Privilégier un onduleur à rendement élevé et installer le aussi près que possible de la batterie pour diminuer les pertes électriques dans les fils conducteurs.

6 : Coffret de branchement électrique :

- Il contient le disjoncteur principal, les fusibles ou les disjoncteurs secondaires indispensables à la protection des appareils électriques de la maison. Les différents circuits électriques de la maison y sont rattachés pour être protégés (ex : le circuit de l'éclairage, celui des petits électroménagers et celui des gros électroménagers).

7 : Charge électrique :

- La charge électrique est la quantité d'énergie que consomme l'ensemble des appareils présents dans la maison (ex : éclairage, électroménager, électronique, etc.). Il est conseillé choisir des appareils « éco énergie » et de changer sa façon de consommer l'électricité. Par exemple, éteindre les appareils que l'on n'utilise pas. Bien souvent les dysfonctionnements rencontrés sont dû à un choix inadapté d'appareils électriques à consommation trop élevée.

II.3. Présentation du système hybride photovoltaïque-éolien

Dans notre cas précis, on s'intéresse aux systèmes de petites puissances qui regroupent deux parties à savoir l'éolienne et les panneaux solaires. Ces deux sources de production de l'énergie passent par un stockage électrochimique (Fig.30), et produisent du courant continu facilement convertible en courant alternatif, grâce à l'intégration d'un onduleur autonome dans le circuit. En couplant ces systèmes et en les associant à un dispositif de stockage de l'énergie, nous aurons alors les avantages suivants :

- Exploitation du système sans interruption;
- Possibilité de préserver le surplus d'énergie produite par ce système;
- Sécurité d'approvisionnement quelles que soient les conditions météorologiques.

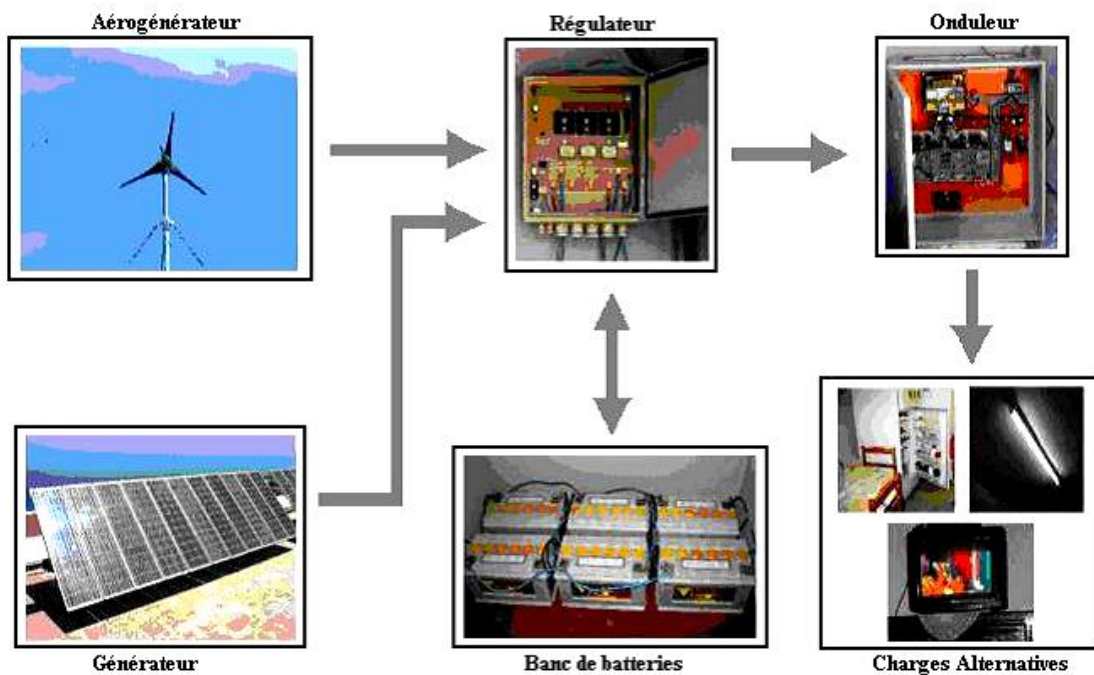


Figure 30 : Schéma synoptique du système hybride étudié

II.4. Système de conversion d'énergie hybride

Ce système est caractérisé par deux sources énergétiques (photovoltaïque et éolienne) : le générateur photovoltaïque (PV) est connecté à la charge par un convertisseur DC/DC commandé en MPPT (Maximal Power Point Tracking), et la turbine éolienne (WT) entraîne un générateur à aimants permanents (GSAP) qui lui-même est connecté à la charge par un convertisseur AC/DC commandé. Le couplage des deux systèmes est fait par l'intermédiaire d'un bus continu, comme l'indique la figure 31.

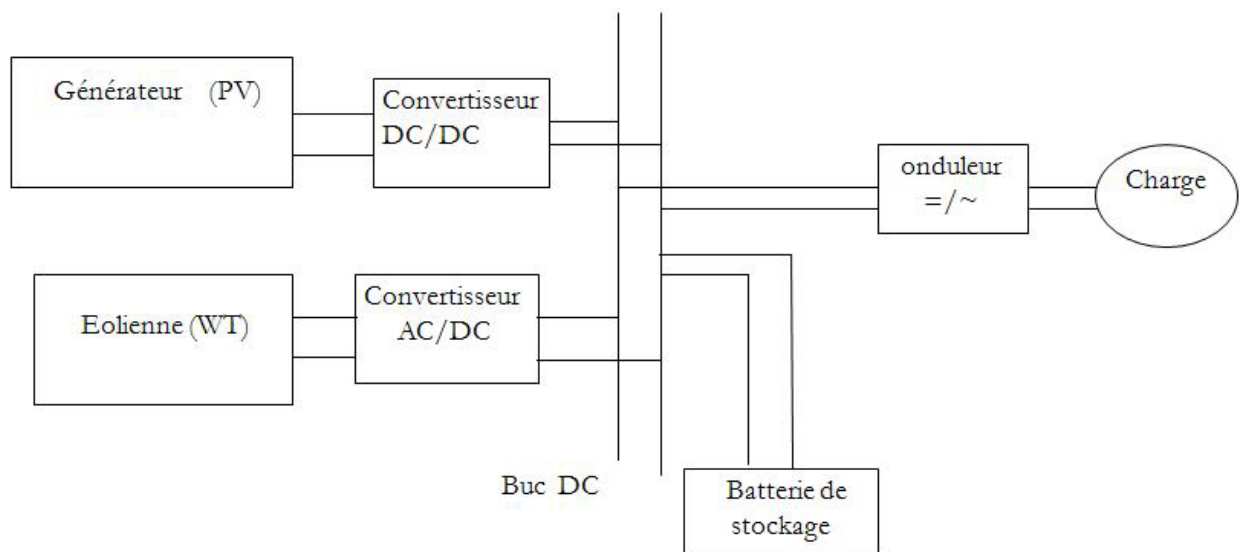


Figure 31 : Schéma de principe du système hybride photovoltaïque-éolien.

II.5. Principaux composants du Système d'énergie hybride photovoltaïque

– éolien

Les systèmes hybrides photovoltaïque-éolien comprennent généralement :

- un système générateur.
- un système de régulation.
- un système de stockage.
- des équipements de puissance.
- une charge.

Le système générateur est composé par les modules photovoltaïques et les aérogénérateurs.

Il est indispensable que les deux fonctionnent à la même tension nominale 12 ou 24 V et en courant continu. La régulation doit tenir compte du fait qu'il s'agit de deux courants de nature différents :

- Le photovoltaïque assez constant et d'un seuil bas .
- L'éolien, très variable.

Le système de régulation se chargera donc de faire fonctionner le système générateur en un point optimal pour la charge des batteries.

II.6. Descriptions des composantes du système hybride photovoltaïque-éolien

II.6.1. Générateurs photovoltaïques

Un générateur photovoltaïque est constitué à la base par des cellules photovoltaïques. Elles produisent de l'électricité du moment où elles sont exposées au rayonnement solaire. Elles ne polluent pas, n'ont aucune pièce mobile, ne nécessitent pratiquement aucun entretien et ne produisent aucun bruit. La cellule photovoltaïque est donc un moyen sûr et écologique de produire de l'énergie.

II.6.2. Modèle d'une cellule solaire photovoltaïque

Dans la littérature, une cellule photovoltaïque est souvent présentée comme un générateur de courant électrique dont le comportement est équivalent à une source de courant shuntée par une diode. Pour tenir compte des phénomènes physiques au niveau de la cellule, le modèle est complété par deux résistances série R_s et R_{sh} .(Fig.32) .

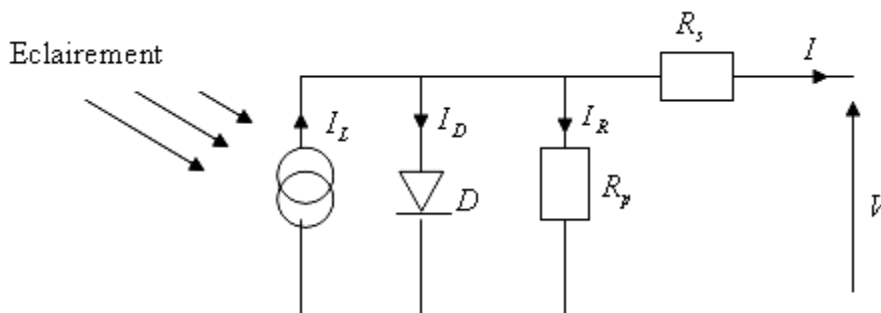


Figure 32 : Circuit équivalent de la cellule solaire.

La cellule comporte une résistance série R_s et une résistance en dérivation ou Shunt R_p .

Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique I-V de la photopile:

- La résistance série est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles ;
- La résistance shunt est une conséquence de l'état de surface le long de la périphérie de la cellule ; elle est réduite à la suite de pénétration des impuretés métalliques dans la jonction (surtout si elle est profonde), lors du dépôt de la grille métallique ou des prises de contacts sur la face diffusée de la cellule.

II.6.3. Caractéristique électrique d'une cellule photovoltaïque

Le courant délivré sur une charge par une cellule PV éclairée s'écrit :

$$I(V) = I_{PH}(V) - I_{OBS}(V) \quad (34)$$

Avec :

I_{PH} : Densité de courant photogénéré

I_{OBS} : Densité de courant d'obscurité.

Dans une cellule photovoltaïque, deux courants s'opposent : le courant photogénéré et un courant de diode appelé courant d'obscurité qui résulte de la polarisation du composant. La caractéristique d'une cellule sous obscurité est identique à la cellule d'une cellule sous éclairage (Fig.33).

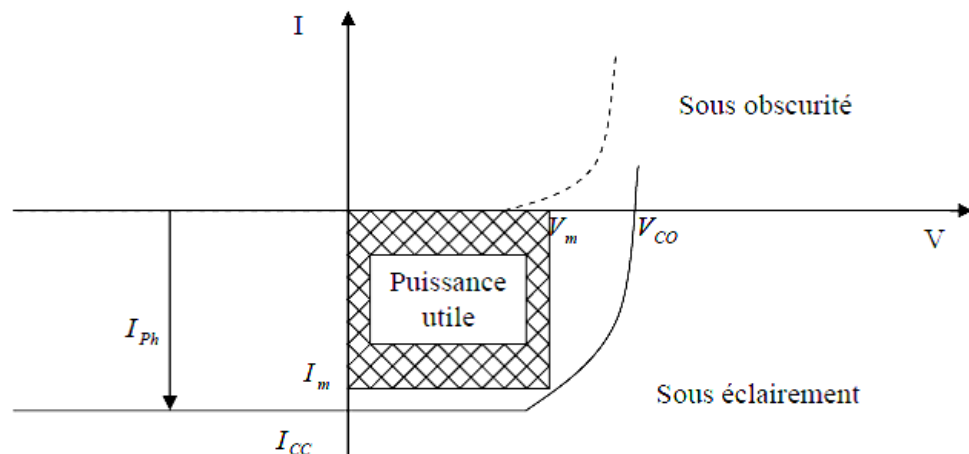


Figure 32 : Caractéristiques I=f(v) sous obscurité et sous éclairage d'une cellule photovoltaïque.

II.6.4. Paramètres externes d'une cellule photovoltaïque

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension, ou de l'équation caractéristique. Les plus usuels sont les suivantes :

- **Courant de court-circuit I_{CC}** : C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule est nulle. Dans le cas idéal (R_s est nulle et R_{sh} infinie), devant I_{ph} L'expression approchée du courant de court circuit est alors :

$$I_{CC} \cong \frac{I_{PH}}{\left(1 + \frac{R_S}{R_{SH}}\right)} \quad (35)$$

- **Tension en circuit ouvert V_{CO}** : C'est la tension pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (c'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque).

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieure à :

$$V_{CO} = V_T \ln\left(\frac{I_{PH}}{I_0} + 1\right) \quad (36)$$

- **Puissance optimale** : La puissance utile maximale s'obtient en optimisant le produit courant tension, soit :

$$\frac{I_M}{V_M} = -\left(\frac{dI}{dV}\right)_M$$

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

- **Facteur de forme FF**

Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée P_m (Fig.34), et la puissance formée par le rectangle $I_{CC} \cdot V_{CO}$ (puissance optimale) :

$$FF = \frac{P_{\max}}{P_{opt}} = \frac{I_M \cdot V_M}{I_{CC} \cdot V_{CO}} \quad (37)$$

Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également. Les meilleures cellules auront donc fait l'objet de compromis technologiques pour atteindre le plus possible les caractéristiques idéales.

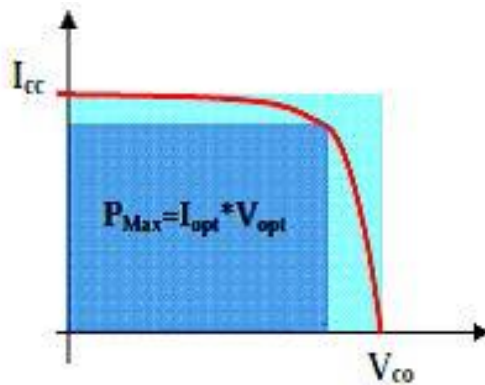


Figure 34 : Notion de facteur de forme FF pour une cellule photovoltaïque.

➤ **Rendement énergétique maximum η_m :**

Le rendement énergétique maximum η_m des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport de la puissance maximale (P_m) fournie par la cellule sur la puissance du rayonnement solaire incident (P_i) :

$$\eta_m = \frac{P_{\max}}{P_i} = \frac{I_M \cdot V_M}{S\phi} = \frac{P_{\max}}{P_{opt}} = \frac{FF \cdot I_{CC} \cdot V_{CO}}{P_i} \quad (38)$$

S : Surface de la cellule solaire (m²);

ϕ : Flux incident (W/m²);

I_m, V_m : Coordonnées de point de fonctionnement.

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

II.6.5. Influence des résistances série

II.6.5.1 Influence de la résistance série R_s

Les performances d'une cellule photovoltaïque sont d'autant plus dégradées que la résistance série est grande ou que la résistance shunt est faible. La figure (35) montre l'influence de la résistance série sur la caractéristique $I=f(V)$ de la cellule. Cette influence est traduite par une diminution de la pente de la courbe dans la zone où la cellule fonctionne comme source de tension. La chute de tension correspondante est liée au courant généré par la cellule.

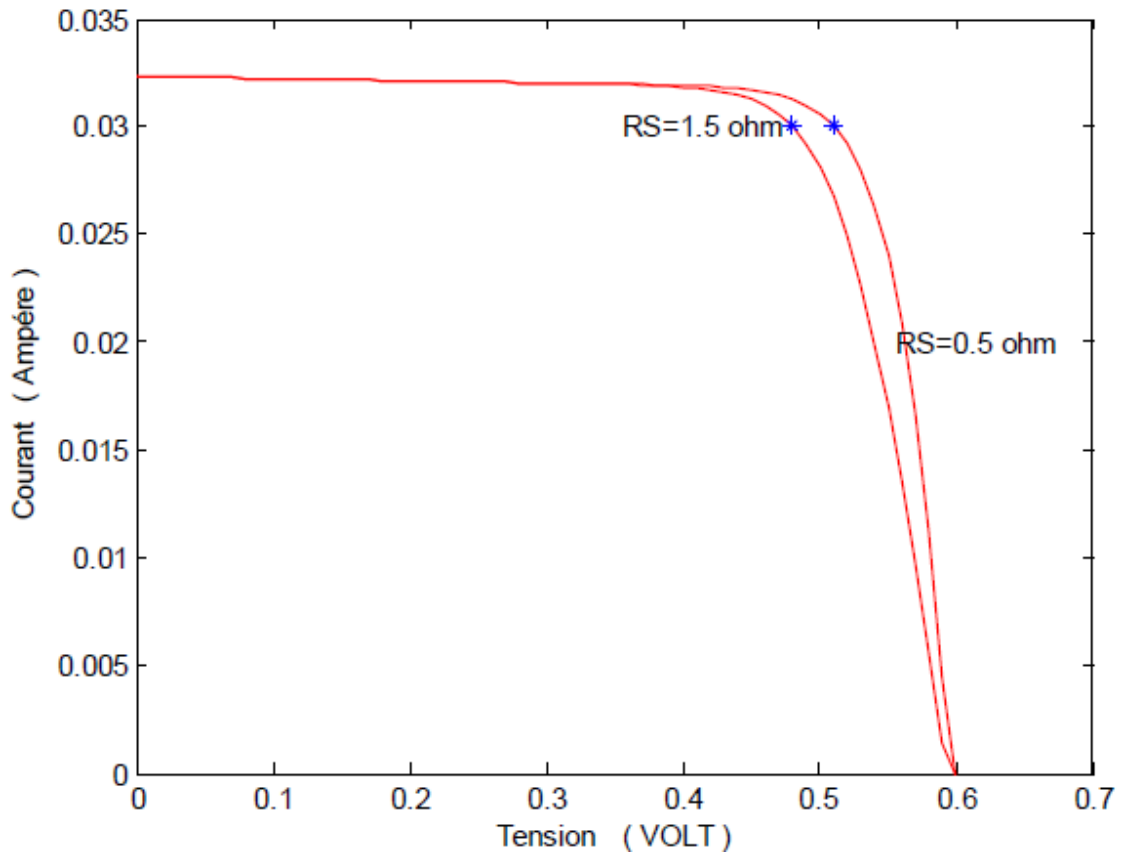


Figure 35 : Influence de R_S sur la caractéristique $I=f(V)$.

1.6.5.2. Influence de la résistance parallèle

La résistance shunt, est liée directement au processus de fabrication, et son influence se montre que pour de très faibles valeurs de courant. La figure (36) montre que cette influence se traduit par une augmentation de la pente de la courbe de puissance de la cellule dans la zone correspondant à un fonctionnement comme source de courant. Ceci provient du fait qu'il faut soustraire de la photo courant, outre le courant direct de diode, un courant supplémentaire variant linéairement avec la tension développée.

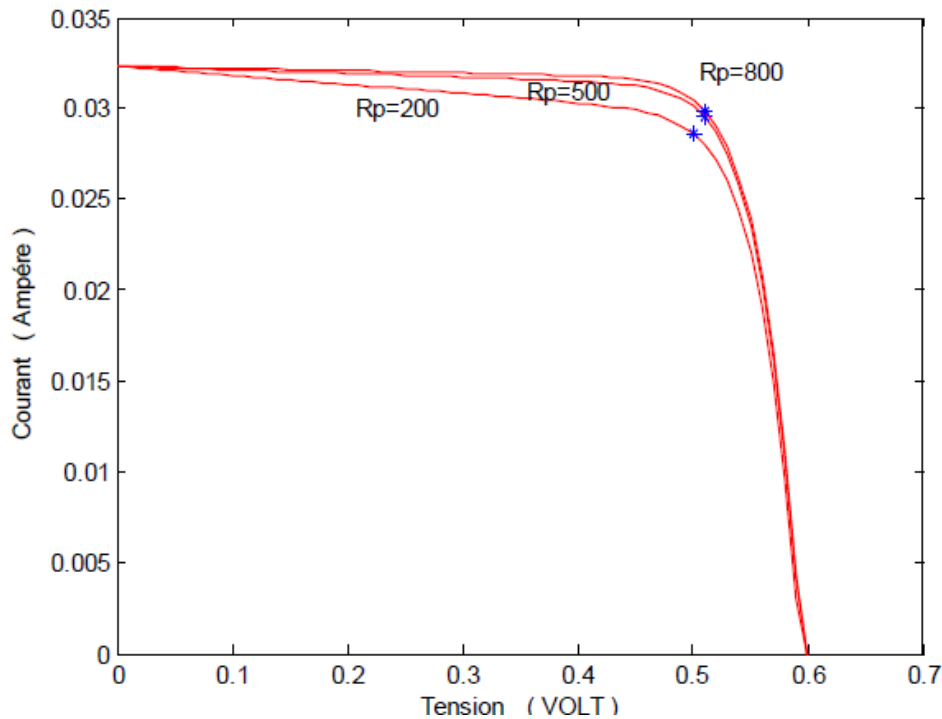


Figure 36 : Influence de R_p sur la caractéristique $I=f(V)$.

I.6.6. Influence de l'éclairement

Le photo-courant I_{ph} est pratiquement proportionnel à l'éclairement ou au flux lumineux ψ . Le courant $I_d(V_d)$, étant par définition le courant direct de la jonction sous obscurité, et normalement non modifié. Ceci n'est valable que pour des cellules n'utilisant pas la concentration du rayonnement solaire ou travaillant sous une faible concentration. En effet, la densité des porteurs de charges et donc le courant de saturation sont modifiés par la variation de la température et de la concentration de l'éclairement. Le photo-courant créé dans une cellule solaire photovoltaïque est aussi proportionnel à la surface S de la jonction soumise au rayonnement solaire ; par contre la tension de circuit ouvert n'en dépend pas et n'est fonction que de la qualité du matériau et du type de jonction considéré. La figure (37) représente les caractéristiques $I=f(V)$ d'une cellule photovoltaïque (jonction p-n sur du silicium monocristallin de 57mm de diamètre) à 28 °C et sous diverses valeurs de l'éclairement ψ .

A chacune de ces valeurs de flux lumineux correspond une puissance électrique maximale que pourrait fournir la cellule solaire. Notons aussi la légère diminution de la tension du circuit ouvert suite à une chute du flux lumineux.

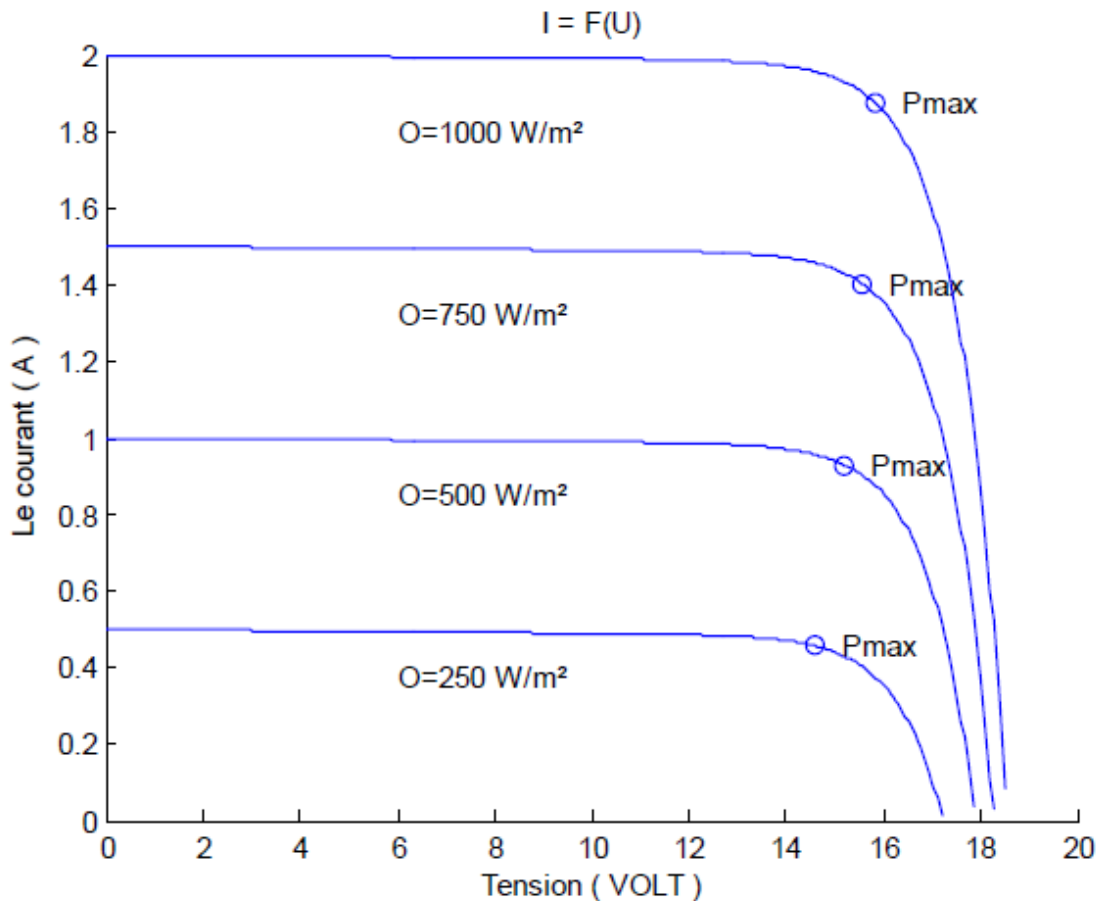


Figure 37: Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I = f(V)$.

I.6.7. Influence de la température

La température est un paramètre très important dans le comportement des photopiles. En effet, si la température augmente, le photo-courant augmente à peu près de $3 \cdot 10^{-2} \text{ mA} \cdot \text{K}^{-1}$ par cm^2 de cellule et par conséquent le courant I , ce qui engendre une diminution de la tension du circuit ouvert V_{co} (fig.38). L'augmentation de la température se traduit aussi par la diminution de la puissance maximale disponible, de l'ordre de $5 \cdot 10^{-5} \text{ W/K}$ par cm^2 de cellule, soit une variation de 0,35% par degré.

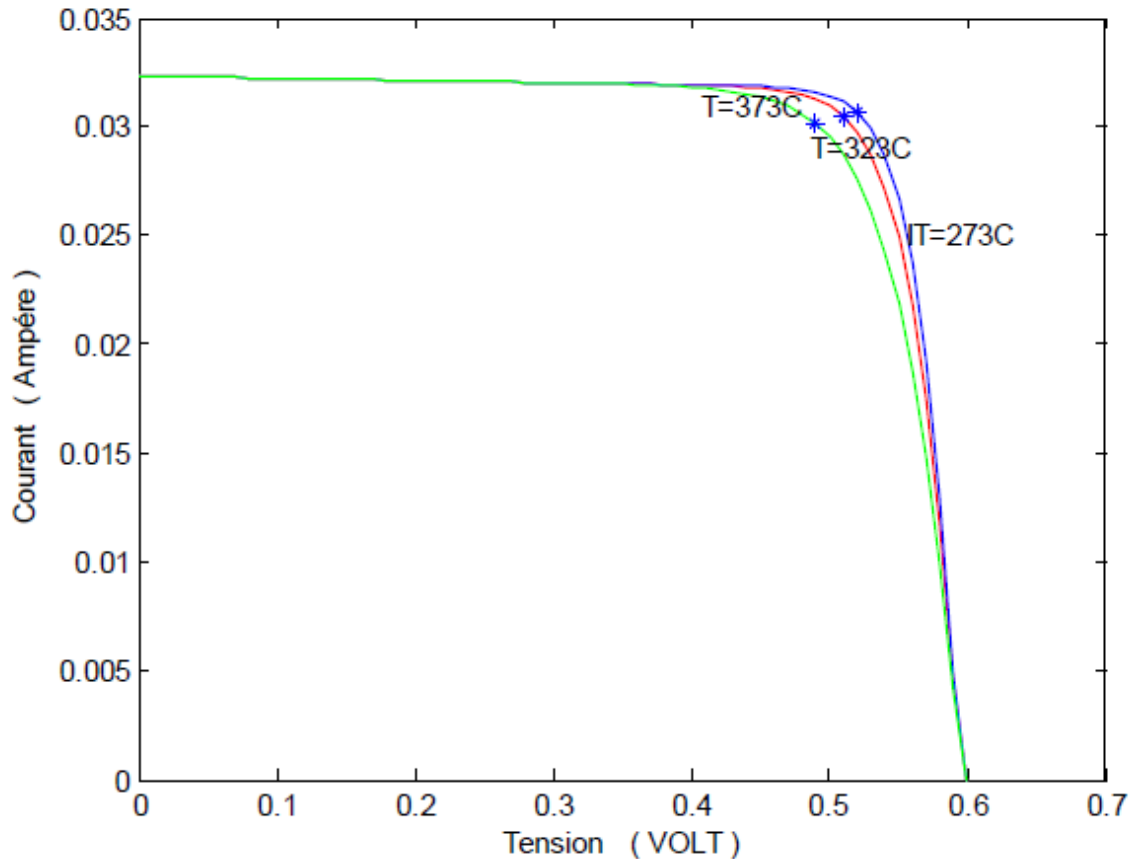


Figure.38 : Influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$

II.7. Générateur éolien

I.7.1. Introduction

Un système éolien ou un aérogénérateur ou encore une éolienne peut être défini comme étant : un système composé d'éléments aptes à transformer une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique puis en énergie électrique.

La plupart des aérogénérateurs commerciaux, surtout les grands, sont à axe horizontal. La part de marché représentée par les systèmes à axe vertical est minuscule. Les aérogénérateurs de grande taille sont parfois construits isolément ou rassemblés en groupes (parcs d'éoliennes) comportant dix éléments ou plus, parfois même des centaines.

Les différents éléments d'une éolienne sont conçus d'une manière à maximiser la conversion énergétique, pour cela, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est nécessaire.

I.7.2. Types d'aérogénérateur dans les systèmes éoliens

La conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique peut être identifiée selon le générateur électrique utilisé

➤ Générateur asynchrone

C'est une machine à induction asynchrone qui transforme de l'énergie mécanique en énergie électrique. Pour réaliser la génération de l'énergie électrique la machine doit être entraînée au-delà de la vitesse de synchronisme (variable suivant la charge) le cas d'une génératrice à cage d'écureuil. Son rotor peut être à cage d'écureuil ou bobinée. La puissance nécessaire à sa magnétisation est fournie par le réseau lorsqu'elle est couplée en parallèle ou par une batterie de condensateurs dans le cas d'une utilisation isolée. Pour les petites puissances, le rotor est à cage d'écureuil, pour des puissances plus importantes, le rotor est bobiné, relié à l'extérieur via un collecteur simplifié à trois bagues, et court-circuité en fonctionnement normal. Mais on peut aussi modifier les propriétés électromécaniques du générateur en agissant sur le rotor par ces connexions « Machine Asynchrone Double Alimentée MADA ».

Cependant, pour les machines asynchrones à cages, il faut néanmoins fournir la puissance de magnétisation "puissance réactive" correspondant à une composante du courant réactif. Ce courant peut être emprunté au réseau mais peut aussi bien être obtenu de façon statique en branchant en parallèle à la machine une batterie de condensateurs. En outre, en ajustant ces condensateurs de façon précise, il est possible, dans certaines conditions, d'utiliser une génératrice asynchrone en dehors d'un réseau, en fonctionnement autonome, pour alimenter une charge isolée. Son emploi est réservé aux générateurs de puissance moyenne dont l'arbre d'entraînement tourne à des vitesses fortement variables : mini centrale hydraulique, éolienne, turbine ou moteur à gaz de récupération, certains groupes électrogènes,...etc.

Les machines asynchrones à rotor bobiné permettent, par un réglage dynamique du glissement, de s'adapter aux variations de puissances fournies par la turbine. La partie mécanique peut généralement subir les variations brutales du régime de vent, ce type de contraintes devient inacceptable pour les fortes puissances. La variation de vitesse devient donc de plus en plus justifiée à mesure qu'on augmente la puissance de l'éolienne.

➤ **Générateur synchrone**

La génératrice synchrone (ou alternateur) n'a pas besoin de magnétisation extérieure pour créer son champ magnétique. Celui-ci est créé par des bobines ou par des aimants permanents, placés sur le rotor tournant induisant un courant dans le stator bobiné. Cette génératrice étant indépendante du réseau, elle fournit une fréquence variable en fonction de la vitesse de rotation, donc de la vitesse du vent. Le raccordement au réseau, qui lui exige une fréquence fixe, s'effectue par un convertisseur qui comporte un étage redresseur, un bus continu et un onduleur : on reconstruit donc une onde sinusoïdale parfaite, ce qui permet aussi de gérer plus facilement la qualité de l'énergie produite.

La régulation de puissance s'effectue en partie au niveau de ce convertisseur. Elle permet un fonctionnement à vitesse variable, donc à rapport d'avance constant et rendement optimal. Elle permet aussi de limiter les efforts dynamiques en autorisant le rotor à accélérer en cas de forte rafale (stockage d'une partie de l'énergie cinétique du vent dans l'inertie du rotor). Plus complexe à construire et plus chère (aimants permanents, convertisseur), la génératrice synchrone est relativement peu utilisée.

➤ **Générateur électrique à courant continu**

La génératrice à courant continu (à excitation séparée) est une machine tournante qui transforme de l'énergie mécanique en énergie électrique apparaissant sous forme de tension et courant continu. Elle comporte deux circuits bobinés (Fig.39) :

1. l'un est un circuit inducteur, porté par le stator, et il crée un champ de direction fixe sous les pôles de la machine ; il est pour cela appelé « circuit de champ » ou encore « Circuit d'excitation »,
2. et l'autre est un circuit induit ou circuit d'armature, porté par l'armature du rotor ; il crée des forces électromotrices induites 'F.E.M'.

La force électromotrice F.E.M peut être exprimée par la relation suivante :

$$E = \frac{P}{a} \cdot N \cdot n \cdot \phi \quad (39)$$

Avec :

E : Force électromotrice F.E.M (Volt) .

P : Nombre de paires de pôles.

a : Nombre de paires de voies en parallèles.

n : Vitesse (tr/s).

N : Nombre total de conducteurs actifs.

ϕ : Le flux par pôle en Wb.

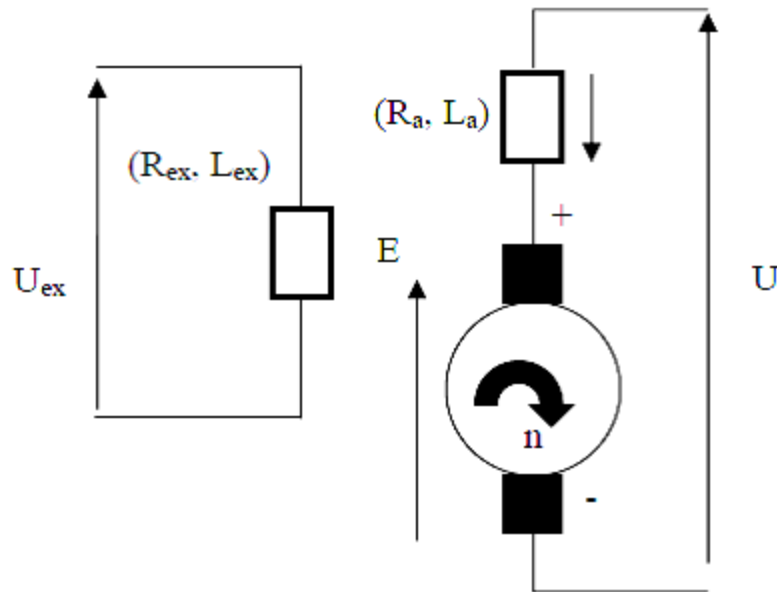


Figure 39: Schémas équivalent électrique d'une génératrice à courant continu à excitation séparée.

La tension extraite de la génératrice notée «U» selon le schéma électrique équivalent (fig.39) peut être donnée comme suit :

$$U = R_a \cdot I + L_a \frac{dI}{dt} - E \quad (40)$$

Avec :

U : Tension extraite de la génératrice (Volt) ;

R_a : Résistance de l'induit (Ω) ;

L_a : Inductance de l'induit (Henry) ;

I : Courant extrait de la génératrice (A) ;

E : Force électromotrice (Volt).

La puissance électromagnétique P_{em} donné par :

$$P_{em} = E \cdot I \quad (41)$$

Avec :

P_{em} : Puissance électromagnétique (Watt).

Le couple électromagnétique C_{em} de la génératrice s'exprime par :

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega} \quad (42)$$

Avec :

Ω : Vitesse angulaire (rad/s).

La puissance électrique générée s'écrit :

$$P = U \cdot I \quad (43)$$

➤ Générateur à structures spéciales

Des machines à structures spéciales avec un principe de fonctionnement spécial aussi. Le but de leurs fabrications est la réponse au besoin actuel, mentionnant par exemple : la machine à réluctance variable, la Machine Asynchrone Double Stator, ...etc.

I.7.3. Différentes classes d'un système éolien

On peut classer les systèmes éoliens à axe horizontal en deux différentes classes :

- **Système éolien à vitesse fixe** : ce sont des systèmes qui fonctionnent pour des vitesses fixes et bien déterminées afin de produire de l'électricité selon les normes. Cette vitesse est définie selon le générateur électrique utilisé. Ce genre de système est destiné à travailler pour des vitesses égales à la vitesse nominale et cela si on admet que la vitesse nominale est celle qui donne au générateur électrique la possibilité de générer une puissance électrique à 50Hz.
- **Système éolien à vitesse variable** : ce sont des systèmes aptes à travailler pour des vitesses égales ou différentes des vitesses nominales. Pour cela plusieurs technologies sont mises en service afin d'assurer ce fonctionnement :
- **Technique mécanique** : c'est une technique qui utilise les paramètres aérodynamiques de la turbine comme outil de variation de la vitesse, et dans ce sens là on distingue deux modes : le « stall control » (basé sur l'accrochage et le décrochage de la génératrice à la turbine), robuste car c'est la forme des pales qui conduit à une perte de portance au-delà d'une certaine vitesse de vent, mais la courbe de puissance chute plus vite : il s'agit donc d'une solution passive, et le « pitch control » (basé sur l'abaissement et l'augmentation de l'angle de calage des pales, qui permet d'ajuster la portance des pales à la vitesse du vent pour maintenir une puissance sensiblement constante). Il faut noter que cette technique n'est fonctionnelle que pour des vitesses égales ou supérieures à la vitesse nominale.
- **Technique électrique** : C'est une technique qui utilise les convertisseurs statiques comme outil de variation de la vitesse.
- **Technique hybride** : C'est une technique qui utilise les deux techniques précédentes à la fois afin d'améliorer le rendement de production et de sécurité du système.

II.8. Systèmes de stockage

Le stockage d'énergie est souvent utilisé dans les petits systèmes hybrides à fin de pouvoir alimenter la charge pour une durée relativement longue (des heures ou même des jours). Il est parfois aussi utilisé avec les SEH connectés à des grands réseaux de courant alternatif isolés. Dans ce cas, il est utilisé pour éliminer les fluctuations de puissance à court terme.

Le stockage d'énergie est généralement réalisé grâce aux batteries. Les batteries sont, d'habitude, du type plomb – acide. Les batteries nickel – cadmium sont rarement utilisées. Il y

a d'autres formes de stockage, mais peu utilisées, comme le pompage de l'eau, les volants d'inertie et le stockage de l'hydrogène.

Dans le cas de stockage par pompage de l'eau, l'énergie produite sert à remplir un réservoir de stockage dont l'eau sera turbinée pour restituer l'énergie .

Le principe du volant d'inertie est simple. Il s'agit d'emmagasiner l'énergie en mettant en rotation une masse importante . L'énergie cinétique obtenue peut être restituée à la demande sous forme d'énergie électrique, en utilisant une machine électrique en régime g é n é r a t e u r .

L'hydrogène alimente les piles à combustible. Il possède un grand pouvoir énergétique gravimétrique (120 MJ/kg) en comparaison au pétrole (45 MJ/kg), au méthanol (20 MJ/kg) et au gaz naturel (50 MJ/kg). Cependant, il est aussi le gaz le plus léger. Ceci pose un véritable problème de stockage. La densité énergétique volumétrique de l'hydrogène n'est intéressante qu'à l'état liquide ou comprimé (700 bars). Il existe de multiples modes de stockage de l'hydrogène : comprimé, liquéfié, hydrures métalliques, charbon actif, nano fibres et nanotubes en carbone etc. Si les deux premiers modes de stockage sont actuellement les plus utilisés, ils sont loin d'être satisfaisants.

II.9. Convertisseurs

Dans un SEH, des convertisseurs sont utilisés pour charger des batteries de stockage et pour transformer le CC en CA et vice-versa. Trois types de convertisseurs sont souvent rencontrés dans les SEH : les redresseurs, les onduleurs et les hacheurs.

Les redresseurs réalisent la conversion CA/CC. Dans le SEH, ils sont souvent utilisés pour charger des batteries à partir d'une source à CA. Ce sont des appareils relativement simples, pas chers et à bon rendement. Les onduleurs convertissent le CC en CA. Ils peuvent fonctionner en autonome pour alimenter des charges à CA ou en parallèle avec des sources à CA. Les onduleurs sont autonomes lorsqu'ils imposent leur propre fréquence à la charge. L'onduleur non autonome exige la présence d'une source à CA pour fonctionner. Il y a aussi des onduleurs qui peuvent assurer les deux régimes de fonctionnement : autonome ou en parallèle avec un autre g é n é r a t e u r . Ceux-ci sont les plus flexibles, mais sont aussi les plus chers. Parfois, les fonctions de redresseur et d'onduleur sont réalisées par un seul appareil.

II.10. Charges

Les charges électriques rendent utile la puissance électrique. Il existe des charges à caractère résistif et inductif. Les charges résistives incluent les ampoules à incandescence, les chauffe-eau etc. Les appareils utilisant des machines électriques sont des charges résistives et inductives. Elles sont les principaux consommateurs de puissance réactive. Les charges à CC peuvent avoir aussi des composants inductifs, mais les seuls effets introduits par ceux-ci sont les variations transitoires de tension et courant pendant les changements dans le fonctionnement du système.

II.11. Conclusion

Ce chapitre nous a permis de donner un aperçu général sur le système d'énergie hybride (S.E.H) qui combine deux systèmes très populaires actuellement dans le marché de la production d'énergie électrique d'origine renouvelable, les systèmes photovoltaïques et les systèmes éoliens.

Dans ce contexte, les principales notions liées à la technologie utilisée dans les S.E.H ont été données.

Notre travail portant sur un S.E.H composé d'une éolienne, des panneaux photovoltaïques et de batteries de stockage, une attention particulière a été consacrée à ce type de sources et de stockage.

Le dimensionnement et le fonctionnement des composantes du S.E.H doivent tenir compte des variations de la charge et des ressources renouvelables disponibles pour maximiser l'utilisation des ressources renouvelables. Dans ce but, les sources du S.E.H étudié sont dimensionnées dans le chapitre suivant.

III.1. Introduction

L'énergie solaire et l'énergie éolienne dépendent fortement des conditions météorologiques (Ensoleillement, vitesse du vent) du site d'installation du système à énergie hybride.

Dans ce chapitre, on définit les différents besoins de notre installation qui est une habitation, dans le but de faire le dimensionnement et l'optimisation du système hybride (photovoltaïque – éolien) par différentes méthodes. Et pour cela, compte tenu des demandes en énergie à satisfaire, l'étude du gisement est le point de départ de toute investigation, cette dernière passe par une incontestable assimilation de la terminologie.

III.2. Définition du dimensionnement

Dans une installation hybride, le concepteur du système doit associer les sources d'énergie et les moyens de stockage de manière à satisfaire deux objectifs :

- assurer une production suffisante pour couvrir l'ensemble de la consommation électrique des utilisateurs.
- garantir le coût minimum de l'énergie consommée par les utilisateurs.

Cette phase de conception s'appelle le dimensionnement. Il s'agit notamment de déterminer quelle sera la puissance et la capacité des différents éléments. Cependant, à cause de la nature intermittente des sources renouvelables, le dimensionnement de l'installation s'avère difficile et doit, en toute rigueur, dépendre à la fois des caractéristiques météorologiques du lieu d'installation tout en intégrant le profil de consommation.

En effet, comment dimensionner chacun des éléments en termes de puissance et de capacité afin d'assurer une alimentation permanente de la charge, tout en obtenant une énergie au moindre coût ? Par exemple, sur un simple système équipé de batteries et de panneaux Photovoltaïques, que faut-il privilégier : une grande surface de panneaux photovoltaïques tout en minimisant la capacité des batteries ou l'inverse, au risque de faire subir des décharges très profondes qui endommageraient les batteries ? Répondre à ce problème d'optimisation, plusieurs solutions ont été proposées. Il s'agit de fournir au concepteur une solution permettant de dimensionner de manière optimale un système autonome de production d'électricité.

III.3. Paramètres à déterminer lors de la conception

D'après la description du système et l'analyse de son fonctionnement, il apparaît que le Concepteur doit déterminer les quatre paramètres suivants:

- 1- Puissance du panneau photovoltaïque. Exprimé en Watt crête (Wc), c'est la puissance que fournit le panneau lorsqu'il reçoit un ensoleillement de 1000 W/m².
- 2- capacités batteries: c'est la taille du réservoir dans lequel on peut stocker l'énergie. Ce Paramètre est exprimé en Ampère heure(Ah).
- 3- Puissance nominale de l'aérogénérateur: c'est la puissance que fournit l'aérogénérateur lorsque le vent entraîne la génératrice à sa vitesse nominale.

III.4. Analyse du potentiel énergétique solaire et éolien disponible

Il existe une multitude de sites favorables pour la production d'énergie décentralisée sur le territoire national de l'Algérie. Notre point d'intérêt étant focalisé sur la production hybride PV-éolien, le choix du site a été basé sur la disponibilité des données météorologiques.

III.4.1. Gisement solaire en Algérie

L'étude de gisement solaire est le point de départ de toute investigation dans le domaine de l'énergie solaire. Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible dans un lieu donné et au cours d'une période donnée. Son évolution peut se faire à partir des données de l'irradiation solaire globale. L'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde.

La durée d'insolation moyenne nationale dépasse les 2000 heures annuellement. Cette valeur peut atteindre les 3900 heures dans les hauts plateaux et le Sahara. Ainsi, l'énergie moyenne reçue quotidiennement sur une surface inclinée à la latitude est d'environ 7 KWh/m²/jour. Elle est répartie comme suit (Fig.40) : Au Nord : 5,6kWh/m²/jour ; Au sud : 7,2kWh/m²/jour.

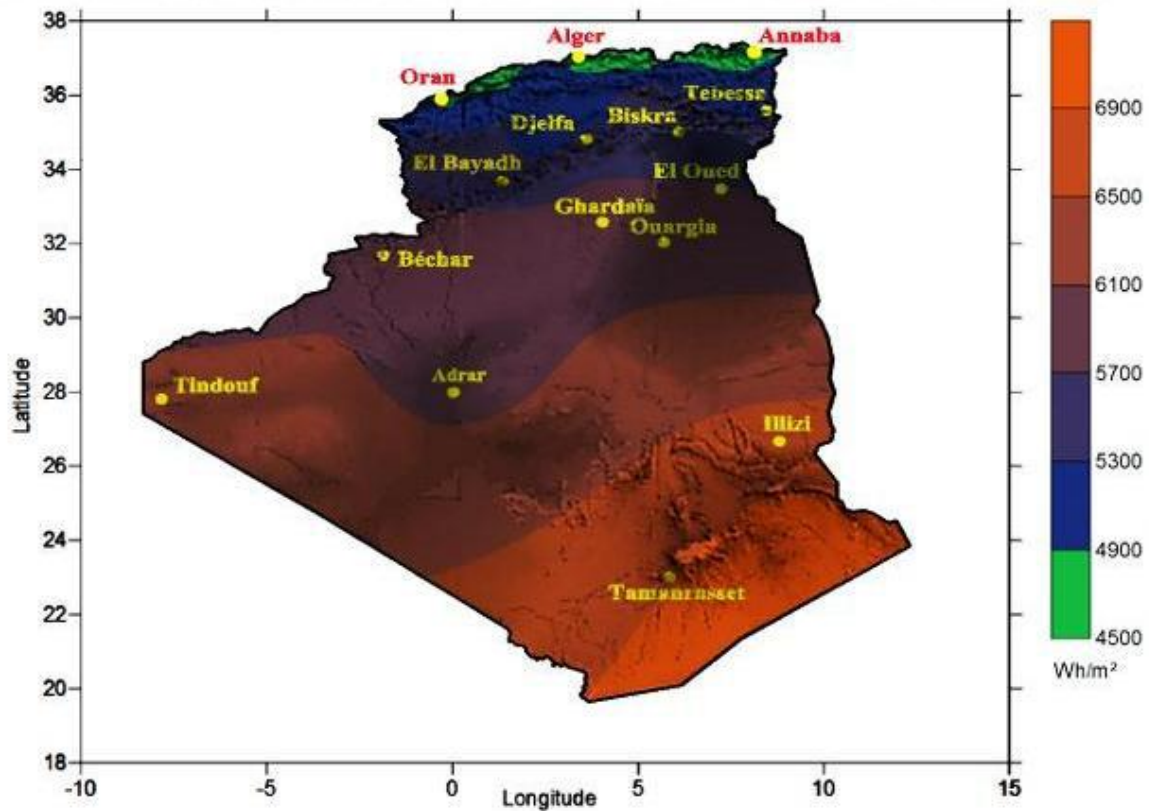


Figure 40 : Moyenne annuelle de l'irradiation globale reçue sur une surface horizontale.

III.4.1.1. Données géographiques du lieu

Ce Tableau 3 résume les coordonnées géographiques du lieu d'implantation (Algérie) :

Caractéristiques	Longitude	Latitude	Altitude
Site région de Batna	6° 11'E	35°33'N	1040 m

Tableau 3 : résume les coordonnées géographiques

III.4.1.2. Données relatives à la température ambiante

La température moyenne mensuelle maximale est de 26,5[°C] au mois de Juillet, tandis que la Température moyenne minimale est de 6,3[°C] au mois de Janvier, ce qui fait une moyenne annuelle de 15,67[°C].

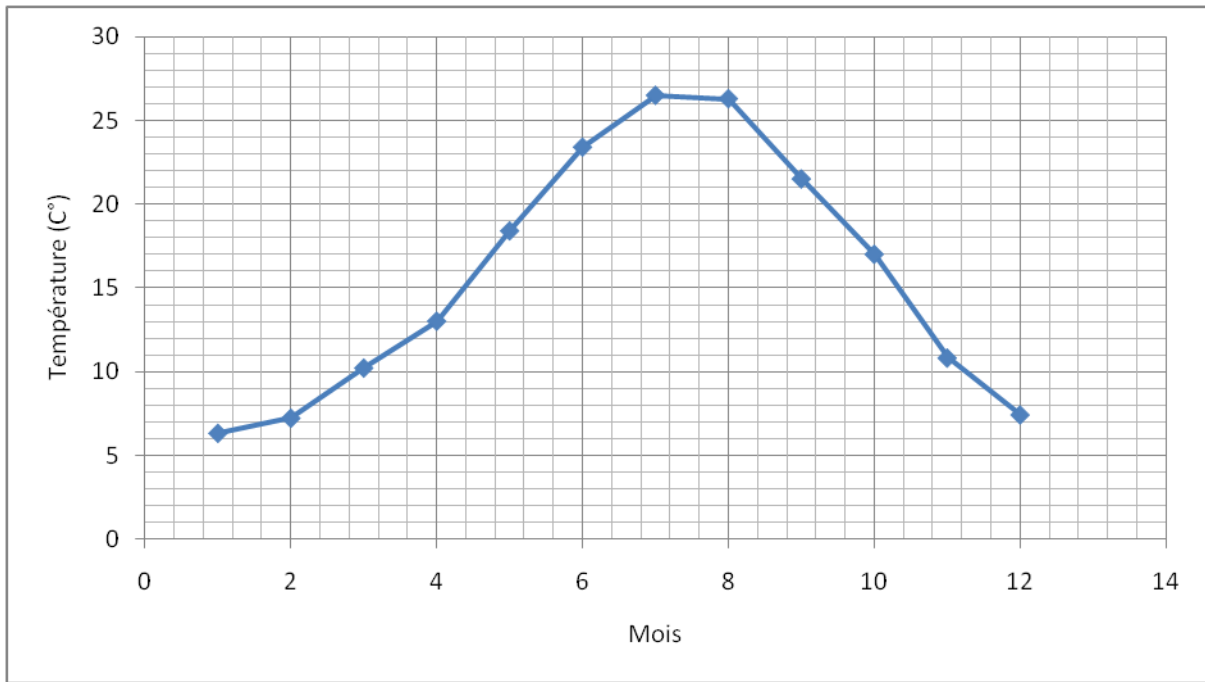


Figure 41 : Profil de température ambiante annuelle.

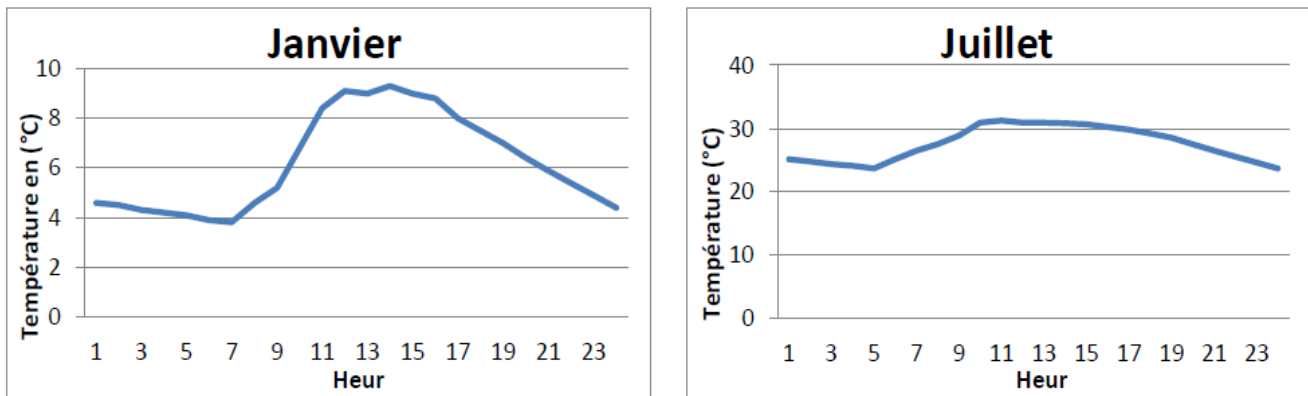


Figure 42: Profil de température ambiante du jour type du mois de Janvier (Hiver) et Juillet (Eté).

III.4.2. Potentiel éolien

Le potentiel éolien diverge selon la situation géographique. Ainsi au nord du pays, le potentiel éolien se caractérise par une vitesse moyenne des vents modérée (1 à 4 m/s) avec des microclimats (local) autour d'Oran, Annaba, sur les hauts plateaux et à Biskra.

Ce potentiel énergétique convient parfaitement pour le pompage de l'eau et l'électrification rural particulièrement sur les Hauts Plateaux. Au Sud, la vitesse moyenne des vents dépasse les 4m/s, plus particulièrement au sud-ouest .

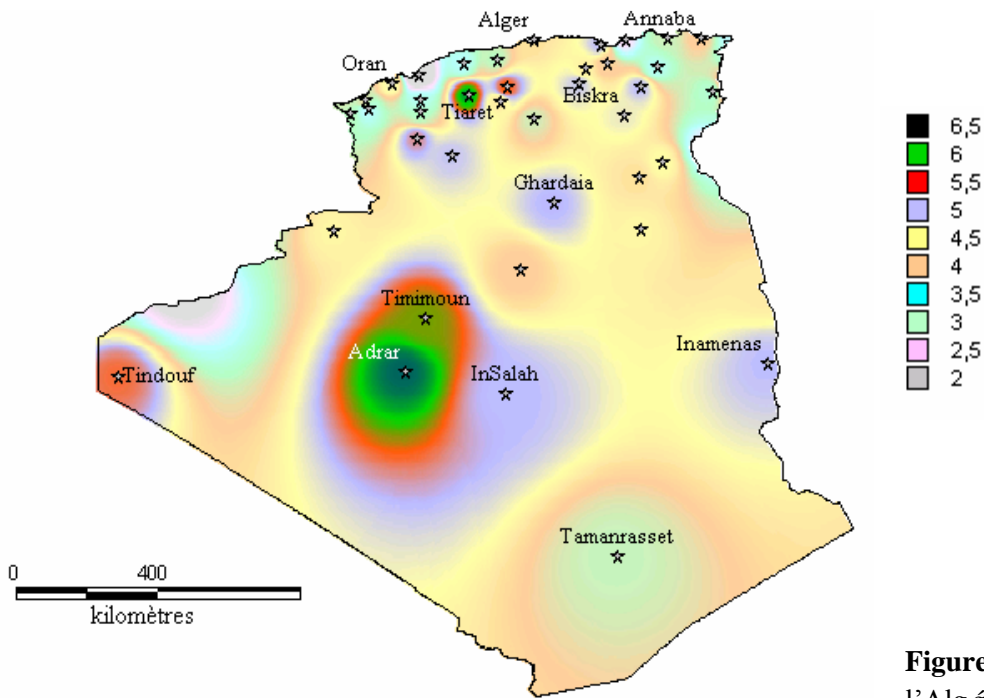


Figure 43 : Carte de vent de l'Algérie .

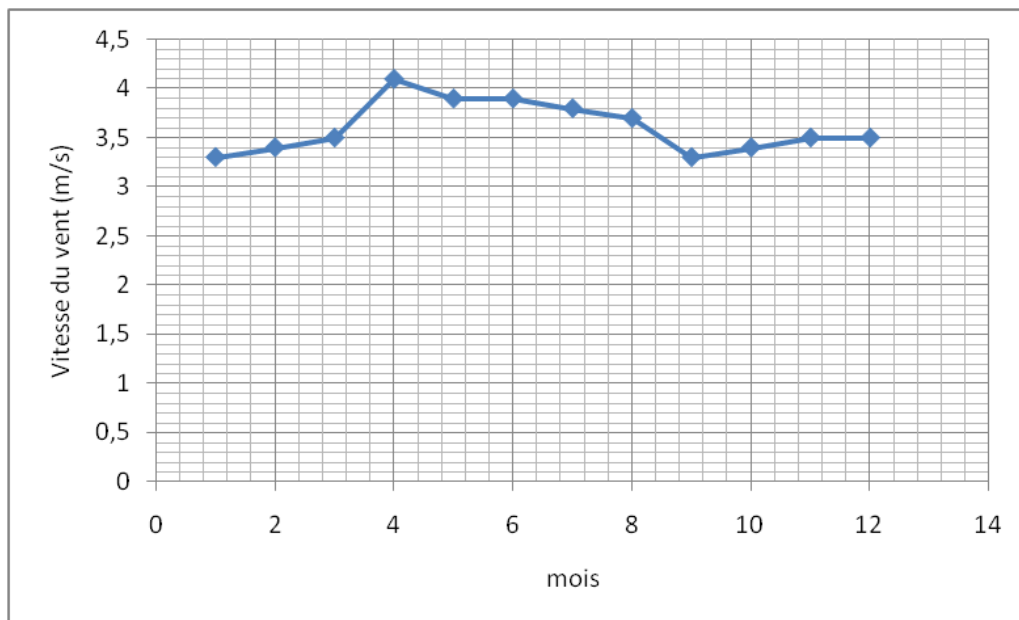


Figure 44 : représente l'évolution de la vitesse du vent en fonction de la hauteur au-dessus du sol, obtenu par logiciel HOMER sur le lieu d'implantation (Batna – Algérie).

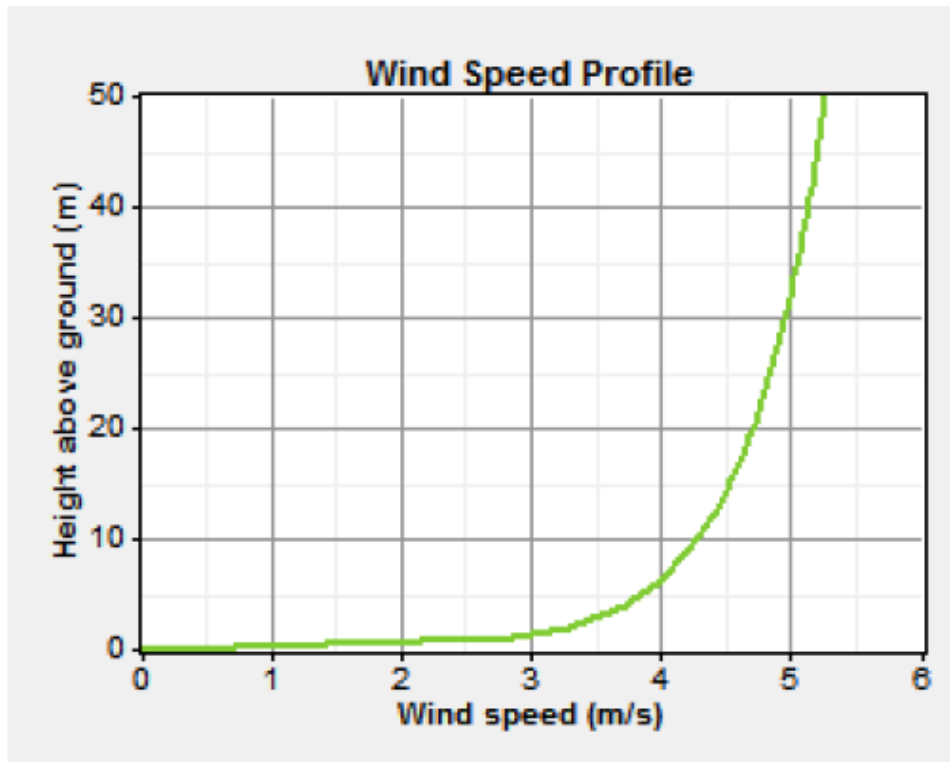


Figure 45 : Profile de la vitesse du vent en fonction de la hauteur au-dessus du sol.

III.4.2.1. Données météorologiques du lieu

➤ **-Estimation du flux global d'irradiation sur un plan horizontal :**

Mois	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
\bar{H} (Wh/m ² /j)	2665	3760	4870	5992	6675	7254	7616	6694	5422	4268	2933	2452

Tableau 4 : Valeurs de l'irradiation globale journalière moyenne mensuelle estimées sur une surface horizontale

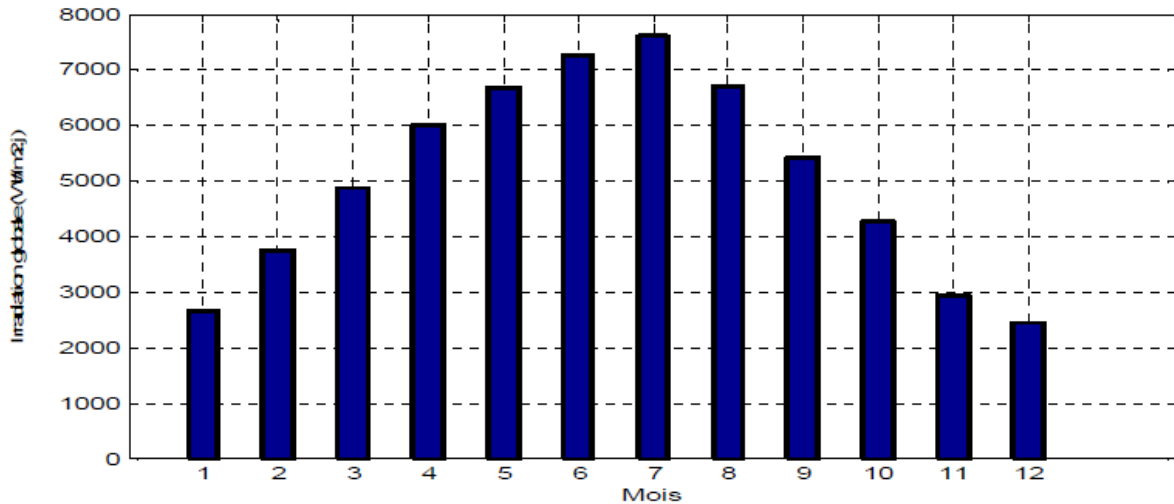


Figure 46 :Irradiations globales journalières moyennes mensuelles estimées sur une surface horizontale

➤ **Rayonnement solaire sur un plan incliné :**

Mois	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
\bar{H} (Wh/m ² j)	4699	5562	5988	6150	6017	6177	6661	6486	6182	5909	4926	4549

Tableau 5 : Valeurs de l'irradiation globale journalière moyenne mensuelle estimées sur une surface inclinée

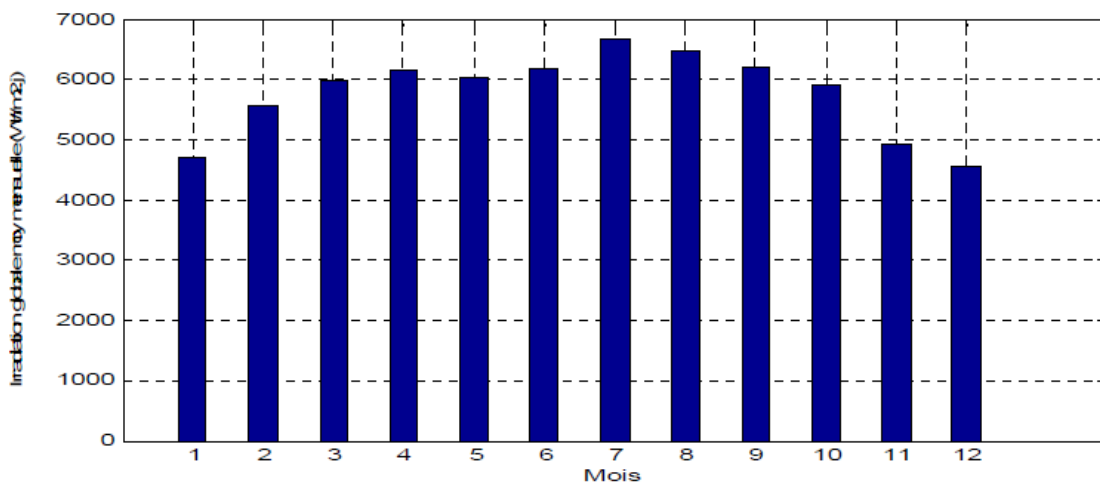


Figure 47 : Irradiations globales journalières moyennes mensuelles sur un plan incliné

➤ **La vitesse moyenne mensuelle et l'énergie disponible du vent :**

Mois	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
V_{moy} (m/s)	3.3	3.4	3.5	4.1	3.9	3.9	3.8	3.7	3.3	3.4	3.5	3.5
Energie (wh/m ³)	528.3	577.8	630.3	1013.1	872	872	806.6	744.6	528.3	577.8	630.3	630.3

Tableau 6 :La vitesse moyenne mensuelle et l'énergie disponible du vent

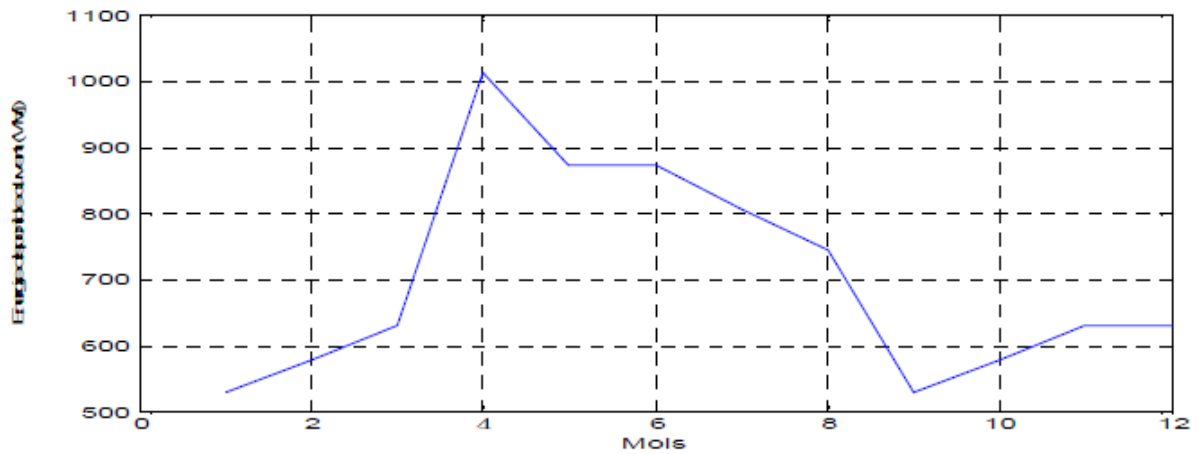


Figure 48 : Energie disponible mensuelle du vent de site de Batna

➤ **la vitesse du vent horaire pour une journée hivernale estivale**

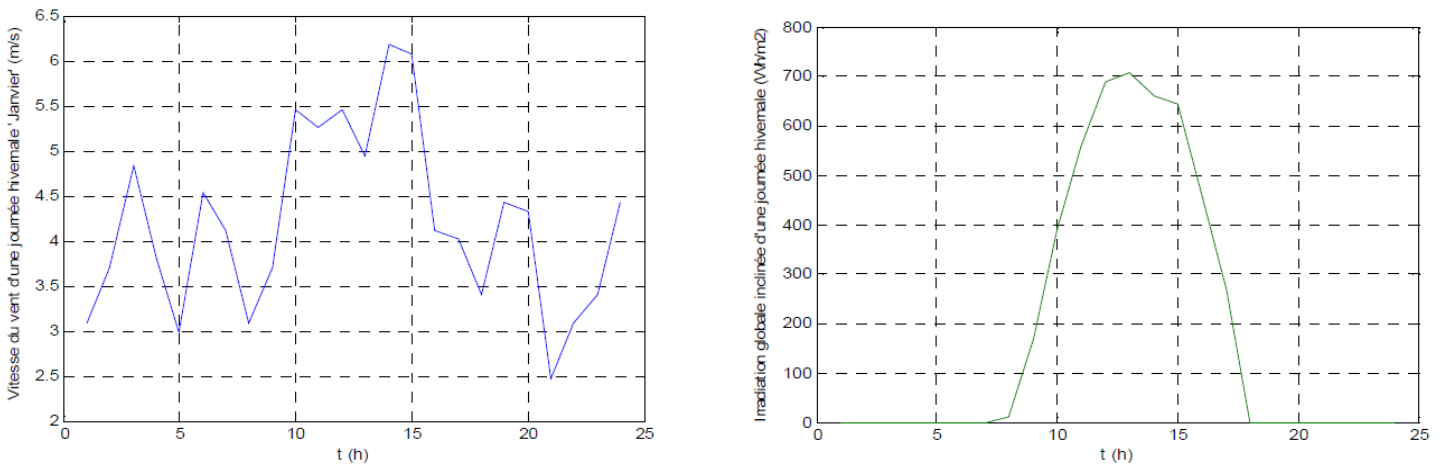


Figure 49 :Vitesse du vent et l'irradiation solaire pour une journée hivernale 'Décembre'

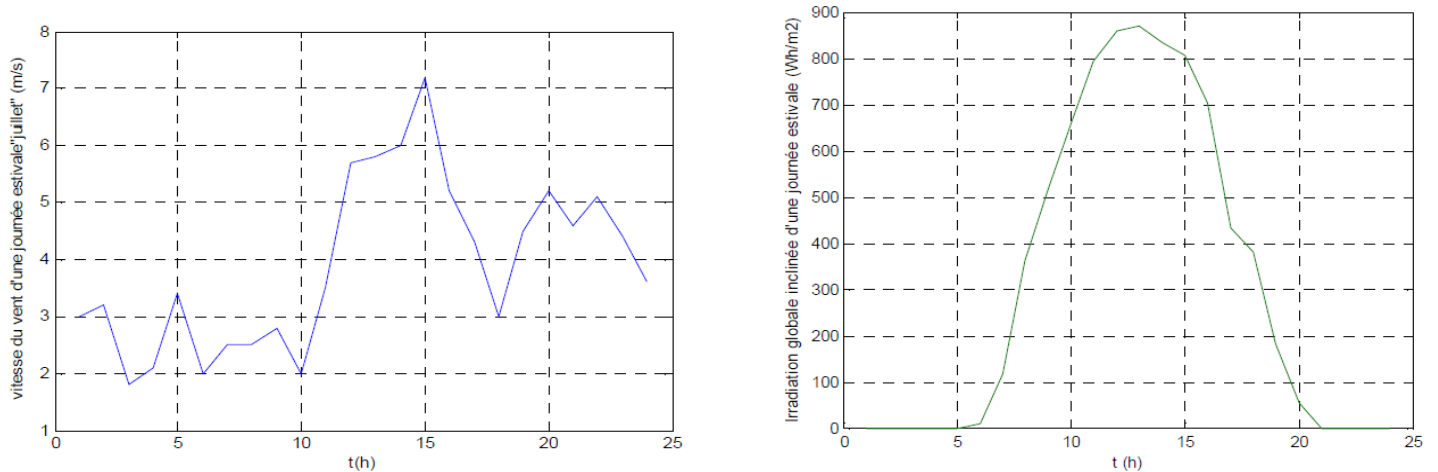


Figure 50 : Vitesse du vent et l'irradiation solaire pour une journée estivale 'Juillet'

III.5. Méthodes de dimensionnement d'un système hybride

III.5.1 Méthodologie adoptée

La méthode adoptée pour le dimensionnement du système hybride s'effectue comme suit :

1. Le choix d'un profil de consommation d'énergie électrique représentatif du site (besoins de la ferme).
2. Choix de l'éolienne.
3. Détermination de la taille du générateur photovoltaïque.
4. Dimensionnement du système de stockage.
5. Dimensionnement du système de régulation.
6. Dimensionnement du système de conversion (onduleur).

III.5.2. Détermination du profil de charge et Besoins électriques domestique

La ferme dont il est question fait partie d'une région rurale isolée non raccordée au réseau de Distribution d'énergie classique qui est occupée en permanence durant toute l'année.

La ferme est équipée de l'ensemble des appareils permettant de fournir le confort aux occupants. Le nombre d'heures de consommation est déterminé en fonction de l'heure de lever et de coucher du soleil. Le nombre d'heures d'éclairage dépend des heures du lever et du coucher des membres de la famille. Par ailleurs, on suppose que le lever et le coucher respectifs des occupants de la ferme s'effectuent en moyenne à 6 h du matin et à 23h du soir. Afin de consommer le minimum d'énergie et de réduire autant que possible la taille du système photovoltaïque et éolien, on choisit les appareils de faibles consommation. L'estimation de l'énergie journalière consommée par les différents équipements électroménagers et l'éclairage sont présentés sur le tableau suivant :

Type de charge	Puissance (W)	Durée utilisation (h)	Consommation électrique (Wh/j)
Eclairage(Lampes)	11-25	5	550/330
Téléviseur TV tube cathodique	80-100	4	320/400
Réfrigérateur (250L)	150-350	24	3600
Radio	40-150	2	80
Moteur de pompe	1500	2	3000/9000
Machine à laver	2000-2200	1cycle/j	0.9Kwh/cycle=900
Four micro-ondes	750-1500	1h/j	750
Fer à repasser	750-1100	5h semaine	540
Sèche cheveux	300-600	30min/j	150
Machine à coudre	70-100	1h/j	70
Machine à traire	750	2	1500
Total journalière			13.532/19.593 Kwh/j

Tableau 7 : Estimation des besoins énergétiques journalier d'une journée Hivernale et estivale

III.5.3. Choix de l'éolienne

L'éolienne SW Whisper 200 est particulièrement recommandée pour les vents faibles et modérés (3 mètres/seconde et au delà). Cette éolienne alimentera des batteries AGM ou GEL dans des sites isolés (habitations non reliés au réseau électrique, pompage, télécommunications ...).

L'éolienne Whisper 200 est parmi les éoliennes les plus silencieuses au monde.

Cette éolienne a les caractéristiques suivantes:

- Puissance nominale : 1000 Watt à 11.6 m/s (42 Km / h).
- Tension : 12, 24,36 ou 48Vdc configurable.
- Vitesse de démarrage : 3.1 m/s (11.2 Km/h).
- Vitesse de vent maximale : 193 Km/h (55 m/s)

III.5.4- Dimensionnement du générateur photovoltaïque

Selon la puissance demandée par la charge et l'irradiation journalière incidente sur le plan du générateur, la puissance nominale que doit fournir le générateur PV est calculée par l'expression suivante :

$$P_c = \frac{E_L}{E_{enso} \cdot \eta_{ondu} \cdot f} \quad (44)$$

Où:

E_L : Energie électrique demandée par la charge en Wh/j.

E_{enso} : durée d'ensoleillement du mois le plus défavorable en heures.

P_c : Puissance crête en Wc.

f : Facteur traduisant les pertes et désadaptations fixé à 0.7.

III.5.4.1D étermination du nombre de modules

$$N_{pv} = \frac{P_c}{P_m} \quad (45)$$

P_m : Puissance crête du module (Wc).

III.5.4.2D étermination du nombre de modules en s érie/parall èle

Pour trouver la tension convenable à l'alimentation d'une charge donnée par la mise en s érie de plusieurs modules PV, le nombre de ces modules est calculé par l'expression suivante :

$$N_{ms} = \frac{V_L}{V_m} \quad (46)$$

Avec :

V_L : La tension nominale de la charge.

V_m : La tension nominale du module.

La mise en parallèle de modules donne l'intensité nécessaire à la charge. Le nombre branches est calculé par l'équation suivante :

$$N_{mp} = \frac{N_m}{N_{ms}} \quad (47)$$

III.5.5Dimensionnement des batteries de stockage

Le dimensionnement de la batterie consiste à calculer le nombre de batteries nécessaires pour un système d'énergie hybride permettant de s'affranchir des variations climatiques temporaires. Cela dépend principalement des jours d'autonomie souhaitée, la profondeur maximale de décharge de la batterie et la température atmosphérique. L'équation

présente le calcul du nombre de batteries qui doit connecter en parallèle pour atteindre les ampères heures requis par le système.

$$N_{bp} = \frac{CT}{C_n} \quad (48)$$

Où :

CT : la capacité totale de banc de batteries nécessaires (Ah) ;

C_n : la capacité nominale d'une unité de batterie (Ah) ;

N_{bp} : le nombre de batteries parallèle.

Équation (IV-9) présente le nombre de batteries qui doit être connecté en série pour atteindre la tension requise par le système.

$$N_{bs} = \frac{V_n}{V_{bat}} \quad (49)$$

Où :

V_n : la tension du système DC (Volt) ;

V_{bat} : la tension de la batterie (Volt) ;

N_{bs} : le nombre de batteries qui doit être connecté en série.

Le nombre total des batteries est obtenu en multipliant le nombre total de batteries en série (N_{bs}) et le nombre total des batteries en parallèle (N_{bp}), comme indiqué par l'équation :

$$N_b = N_{bp} \cdot N_{bs} \quad (50)$$

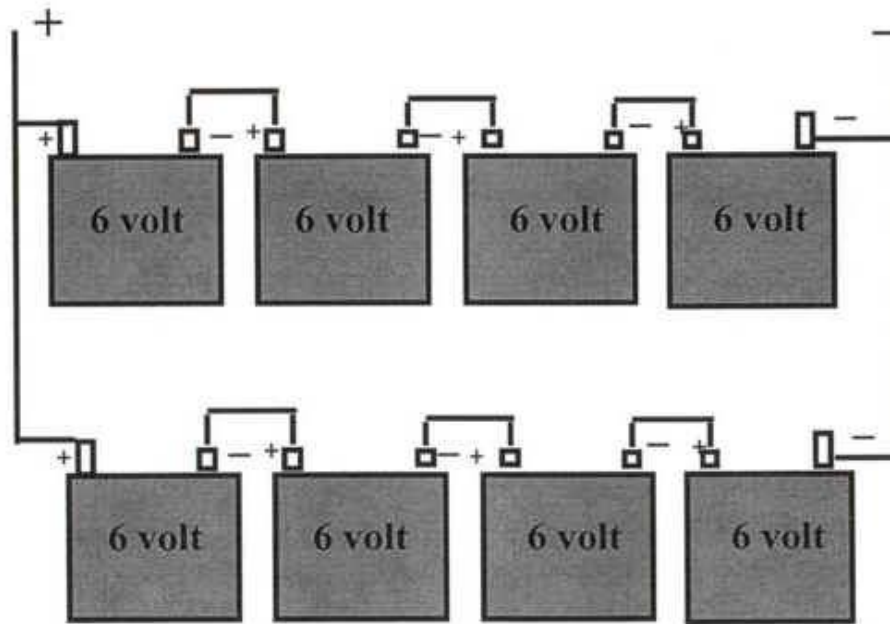


Figure 51 : Exemple de Connexion des batteries (série-parallèle).

Les paramètres de la batterie choisie, pour réaliser le dimensionnement, sont donnés par le tableau 8.

Type	Tension nominale (V)	Capacité nominale (Ah)	Charge minimale	Rendement de charge	le taux d'autodécharge	Coût (\$)
Concorde (PVX-890T)	12	102	20%	0.85	0.0014	235

Tableau 8 : Paramètres de la batterie choisie

III.5.6 Dimensionnement du convertisseur CC/AC (onduleur)

Le dimensionnement de l'onduleur consiste à calculer le nombre d'onduleurs nécessaires pour le GPV et les éoliennes. Dans les petits systèmes hybrides un onduleur sera suffisant, mais pour un plus grand système hybride plusieurs onduleurs peuvent être nécessaires. La tension continue de l'onduleur doit être égale à la tension du générateur et de fréquence égale à celle de la maison. Pour les besoins de notre ferme, l'onduleur choisi est présenté dans le tableau 9.

L'équation (51) représente le calcul du nombre d'onduleurs nécessaires pour un système hybride autonome.

$$\text{Nombre d'onduleurs nécessaires} = \frac{P_L}{P_{ond}} \quad (51)$$

Avec :

P_L : la puissance demandée par la charge.

Paramètres de l'onduleur choisi :

Type	Puissance max (W)	Tension d'entrée nominale de la batterie (V)	Rendement max	Tension de sortie (V)	Fréquence Hz
Sunny Island 4248	4200	48	95 %	220	50

Tableau 9 : Paramètres de l'onduleur choisi

III.5.7 Dimensionnement du régulateur

Le dimensionnement du régulateur consiste à calculer le nombre de régulateurs nécessaires pour le système PV. La tension de sortie du régulateur doit être égale à la tension nominale de la batterie. Aussi la tension maximale du GPV devrait être inférieure à la tension nominale du régulateur.

$$\text{Nombre de régulateurs} = \frac{\text{Puissance Maximale du GPV}}{\text{Puissance Maximale du régulateurs}} \quad (52)$$

Avec :

$$\text{Puissance Maximale du GPV} = P_{PV} \cdot N_{PV}$$

$$\text{Puissance Maximale du régulateurs} = V_{bat} \cdot I_{reg}$$

Où

P_{PV} représente la puissance du module photovoltaïque choisi dans les conditions standards, $I_{r\acute{e}g}$ est le courant maximal du régulateur que peut être géré à partir du système GPV à la batterie.

Type	Courant max (A)	Tension nominale (V)	Tension Voc max (V)
MPPT Flexmax 80	80	48	150

Tableau 10 : Paramètres du régulateur choisi

III.6 Méthodes d'optimisation des systèmes hybrides

L'énergie mensuelle produite par le système par unité de surface est notée E_{pv} pour le photovoltaïque et $E_{\acute{e}ol}$ pour l'éolien.

. La surface du générateur nécessaire pour assurer la couverture totale (100 %) de la charge (EL) durant l'année est exprimé par:

$$A_i = \max \left(\frac{E_{L,m}}{E_{i,m}} \right)$$

Avec :

$i = pv$ pour le générateur photovoltaïque et $i = \acute{e}ol$ pour le générateur éolien.

Avec :

$$E_{PV} = R_{PV} \cdot S_{PV} \cdot P_F \cdot H$$

Où:

S_{PV} : La surface totale du générateur photovoltaïque (m^2);

R_{PV} : Le rendement du générateur photovoltaïque.

H : L'irradiation solaire sur plan incliné (Kwh/m^2).

P_F : Le facteur de remplissage du module, égal à 0.9.

$$E_{\acute{e}ol} = P_{\acute{e}ol} \cdot \Delta t$$

Avec :

$$P_{\acute{e}ol} = \frac{1}{2} C_e \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \cdot 10^{-3}$$

Dans un système hybride photovoltaïque-éolien, le terme de l'énergie totale produite est assez indéfini dans le sens où la contribution de chacune de ces parties n'est pas déterminée. L'énergie totale produite par les deux générateurs photovoltaïque et éolien qui alimentent la charge est exprimé par :

$$E_{pv} \cdot A_{pv} + E_{\text{éol}} \cdot A_{\text{éol}} = EL \quad (53)$$

Avec :

$$E_{pv} \cdot A_{pv} = f \cdot EL$$

$$E_{\text{éol}} \cdot A_{\text{éol}} = (1 - f) \cdot EL$$

Où :

f représente la fraction de la charge alimenté par la source photovoltaïque et $(1 - f)$ celle alimenté par la source éolienne. La valeur limite $f = 1$ indique que la totalité de la charge est alimenté par la source photovoltaïque, quant à $f = 0$ correspond à une alimentation 100% éolienne.

Il existe deux méthodes qui sont utilisés. Elles sont basés sur la moyenne mensuelle annuelle et la moyenne du mois le plus défavorable de l'énergie totale incidente.

III.6.1.Méthode des moyennes mensuelles annuelles

Dans cette méthode, la taille des générateurs photovoltaïque et éolien est tiré des valeurs moyennes mensuelles annuelles de chaque contribution nommé E_{pv} , $E_{\text{éol}}$ (pour un mois). De la même manière, la charge est représenté par la valeur moyenne mensuelle annuelle. Par conséquent, les surfaces des deux générateurs photovoltaïque et éolien sont donnés par :

$$A_{pv} = f \cdot \frac{\overline{EL}}{\overline{E_{pv}}} \quad (54)$$

$$A_{\text{éol}} = (1 - f) \cdot \frac{\overline{EL}}{\overline{E_{\text{éol}}}} \quad (55)$$

III.6.2.R Résultats de simulation

Le tableau montre la production énergétique mensuelle des composants du système hybride étudié et la taille de chaque composant nécessaire pour satisfaire une charge moyenne journalière de 16.563 kWh / jour en utilisant les données de l'irradiation globale journalière mensuelle et la vitesse du vent moyenne mensuelle du site de Batna.

Mois	Irradiation Mensuelle (Wh/m ² ·j)	Energie du Vent (Wh/m ² ·j)	E _{pv} Mensuelle (Wh/m ² ·j)	E _{éol} Mensuelle (Wh/m ² ·j)	EL (Wh/j)	Apv (m ³)	A _{éol} (m ³)
Janvier	4699	528.3	361.7	237.72	13532	37.41	56.92
Février	5562	577.8	398.5	259.99	13532	33.95	52.04
Mars	5988	630.3	438.2	283.61	13532	33.88	47.97
Avril	6150	1013.1	459.9	455.91	19593	42.6	42.97
Mai	6017	872	502.6	392.39	19593	38.98	49.93
Juin	6177	872	547.6	392.39	19593	35.78	49.93
Juillet	6661	806.6	542.5	362.97	19593	36.11	53.97
Aout	6486	744.6	539.9	335.06	19593	26.28	58.47
Septembre	6182	528.3	498.7	237.72	19593	39.28	82.41
Octobre	5909	577.8	447.9	259.99	13532	30.2	52.04
Novembre	4926	630.3	421.9	238.61	13532	32.6	47.71
Décembre	4549	630.3	352.6	238.61	13532	38.37	47.71
Moyenne Mensuelle	5777.5	700.93	459.4	315.42	16563	36.05	52.51

Tableau 11 : Production énergétique mensuelle et tailles du système hybride

La figure suivante représente l'énergie produite par le générateur photovoltaïque et le générateur éolien.

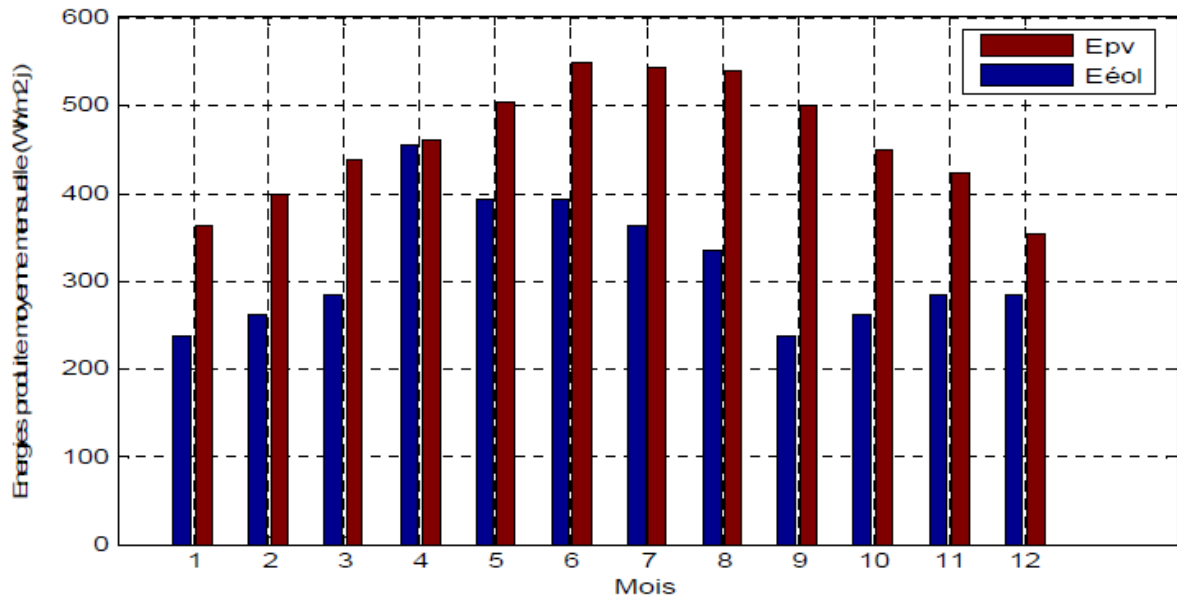


Figure 51 : Energies produites photovoltaïque et éolienne moyennes mensuelles

Les valeurs du dimensionnement du système hybride selon la méthode des moyennes mensuelles annuelles sont obtenues par un programme dans l'environnement MATLAB. Le Tableau 12 illustre les différentes configurations possibles du couplage du système photovoltaïque avec le système éolien et le coût de chaque configuration.

(surface d'un module photovoltaïque : $S=1.26m^2$) (surface de l'éolienne : $S=7.065 m^2$)

f	A_{pv} (m^2)	N_{pv}	$A_{éol}$ (m^2)	$N_{éol}$	Cout pv (\$)	Cout éol (\$)	Cout PV+ éol (\$)
0	0	0	52.51	8	0	28000	28000
10%	3.6054	3	47.26	7	2058	24500	26558
20%	7.2107	6	42	6	4116	21000	25116
30%	10.8161	9	36.75	5	6174	17500	23974
40%	14.4214	11	31.5	4	7546	14000	21546
50%	18.0268	14	26.26	4	9604	14000	23604
60%	21.6321	17	21	3	11662	10500	22162
70%	25.2375	20	15.75	2	13720	7000	20720
80%	28.8428	23	10.5	1	15778	3500	19278
90%	32.4482	26	5.25	1	17836	3500	21336
100%	36.0535	29	0	0	19894	0	19894

Tableau 12: Dimensionnement selon la moyenne mensuelle annuelle

La figure 52 représente l'énergie produite par les générateurs photovoltaïque et éolien :

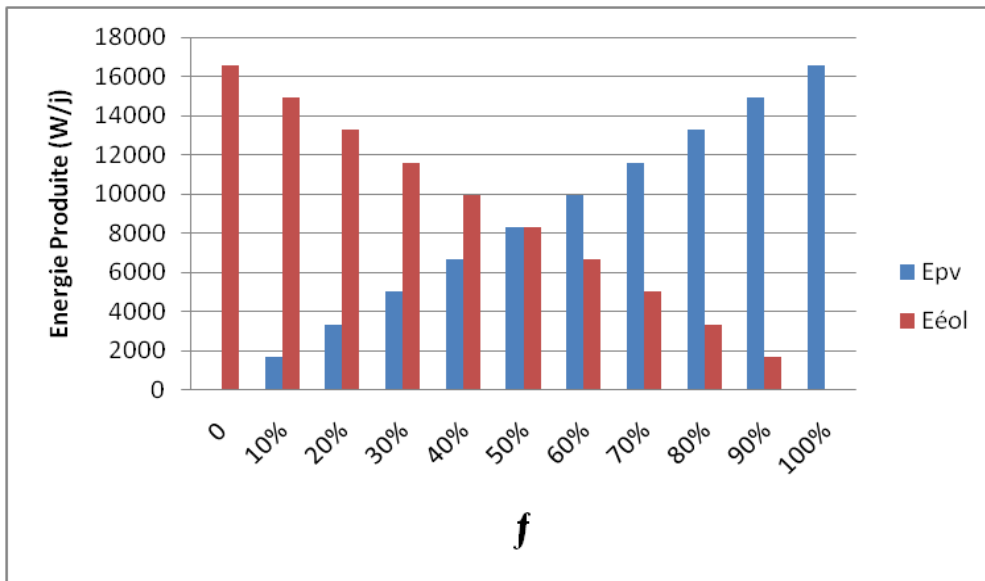


Figure 52 : Energies mensuelles annuelles produites par le système hybride (PV-éolien)

La Figure 53 représente les coûts du système hybride (PV-éolien) :

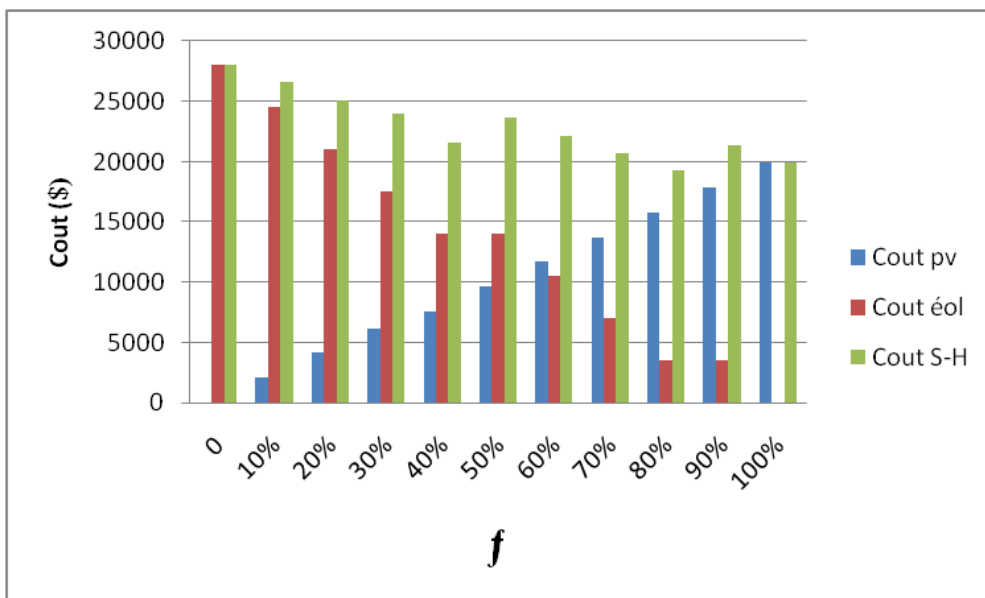


Figure 53 : Coût du système hybride (PV-éolien)

III.7. Interprétation des résultats

Les résultats obtenus de la simulation représentés dans le tableau (12) dans lequel sont présentés le nombre d'unités de chaque composant du système (photovoltaïque et éolien) défini comme le rapport entre la surface du générateur et la surface unitaire et le coût total du système pour chaque configuration.

Avec un aérogénérateur de puissance 1kW a été utilisé La puissance du module photovoltaïque utilisé est de 160 Wc. La capacité de la batterie utilisé est de 102 Ah et a un rendement de charge de 0.85 et une profondeur de décharge de 80 %.

Ces résultats montrent que la configuration avec système photovoltaïque seul ($f = 1$) avec 29 modules photovoltaïques ayant un coût de 19849 \$ est la plus économique. Pour le système éolien pur ($f = 0$) avec 8 éoliennes de 1 kW ayant un coût de 28000 \$, quant au système hybride, le plus économique est celui qui présente $f = 0,9$; (80 % photovoltaïque et 20 % éolien), composé de 23 modules photovoltaïque et un générateur éolien avec un coût de 19278 \$.

Avec un nombre total de 19 batteries de 102 Ah d'une tension de 12V et un cout de 4465\$.

III.8. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une étude et un dimensionnement d'un système hybride PV/ éolien, avec la méthode de l'énergie mensuelle produite par le système par unité de surface pour le bute d'avoir une bonne configuration fiable avec un coût minimal.

L'analyse des résultats ont prouvé que le site de Batna a un environnement idéal (données météorologique :Irradiation solaire, vent) et important afin de produire de l'électricité a partir de deux énergies renouvelables (PV- éolien).

Conclusions générales

La ressource globale en énergie éolienne et photovoltaïque est très importante et peut contribuer de manière significative à la fourniture d'électricité au niveau mondial.

Les travaux présentés dans ce mémoire concernent la production d'électricité à partir d'un système hybride (éolien- photovoltaïque) avec un système de stockage qui a pour objectif de maintenir un niveau de fiabilité élevé avec un coût minimal.

En premier temps, nous avons étudié le principe et l'influence de chaque composant constituant le système PV et l'aérogénérateur éolien.

Dans la deuxième partie du mémoire on a présenté les caractéristiques de chaque composante du système hybride éolien- photovoltaïque avec soin.

Dans la dernière partie nous avons étudié et développé une configuration optimale d'un système hybride (PV-Eolien) selon les données météorologiques du site (Batna) afin de satisfaire les charges d'une ferme située dans une zone rurale non raccordé au réseaux (site isolé).

Les résultats de l'étude et de l'optimisation que nous avons obtenus montrent que la méthode choisie donne de bonnes estimations.

Rien à dire que quelque soit l'effort dépensé, une étude n'est jamais à terme, pas mal de point reste à traiter, pas mal de précision à apporter dans les futures travaux et ceux en cours. Ils s'agit d'un domaine multidisciplinaire ce qui rend son étude passionnante et relativement complexe au même titre.

A ce titre, nous citons ci-après, quelques un des axes pouvant être développés, dans la continuité de notre travail :

-l'utilisation d'une base de données de l'irradiation solaire et de vitesse du vent de plusieurs années et en utilisant des algorithmes génétiques, définir la charge horaire demandé afin d'obtenir des résultats plus précis.

Conclusion générale

En Conclusion, pour contribuer à la solution aux problèmes d'énergie, il est intéressant de développer des sources décentralisées de ces énergie .Dans la recherche de telles solution, le système hybride développé pourra constituer un moyen très économique pour l'énergie d'électrification rurale.

Chapitre 1

- [1] Ministère de l'Énergie et des Mines (Algérie), « Guide des Énergies Renouvelables », Édition 2007.
- [2].B. FLECHE, D. DELAGNES, «Énergie solaire photovoltaïque », STI ELT Approche générale, Juin 2007.
- [3]. B. BENYOUCEF, «les énergies renouvelables », Cours de Magister, 2008.
- [4].S.PETIBON, «Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », Thèse de Doctorat, Université Toulouse, 2009.
- [5]. J. BERNARD, «Énergie solaire Calculs et optimisation », Édition ellipses, 2004.
- [6]. A. BENATIALLAH, « Etude expérimentale et simulation des performances d'une installation photovoltaïque de faible puissance », Thèse de Magister, Université de Tlemcen, 1998.
- [7]. J. M.MARTIN-AMOUROUX, «Perspectives énergétiques mondiales », Techniques de l'Ingénieur, BE 8 515 -2004.
- [8]. G.CUNTY, « Eoliennes et aérogénérateurs, guide de l'énergie éolienne », Edissud, Aixen- Provence, 2001, www.edisud.com.
- [9]. C. GREZE, « Ce qu'il faut savoir sur : Les aérogénérateurs », Cours D'électrotechnique 2008/2009.
- [10]. P. LECONTE, M. RAPIN, E. SZECHENYI, « Éoliennes », Techniques de l'Ingénieur, BM 4 640-2005.
- [21]. L.PROTIN and S.ASTIER, « Convertisseurs photovoltaïques », Technique d'ingénieur, D 3360, 1996.

Webographie :

- [1]. www.neal-dz.net: New Energy Algeria, 2009.
- [2]. www.solarelectripower.org: Solar Electric Power Association, 2010.
- [3]. <http://www.windpower.org/fr/tour/wtrb/comp/index.htm> : Danish Wind Industry Association, 2010.

Chapitre 2

- [1] D. SAHEB-KOUSSA, M.BELHAMEL, « Production d'électricité sans interruption moyennant un système hybride (éolien – photovoltaïque – diesel) » Revue des Energies Renouvelables, ICRES-07 Tlemcen 121 – 128, 2007.
- [2] D. REKIOUA, Z. ROUMILA et T. REKIOUA, « Etude d'une centrale hybride photovoltaïque - éolien – diesel », Revue des Energies Renouvelables, Vol. 11 N° 4 623 – 633, 2008.
- [3] J. G. MCGOWAN, J.F. MANWELL, «Hybrid/PV/Diesel system experiences », Renewable Energy, 16, 928-933, 1999.
- [4]. E. KOUTROULIS, K. KALAITZAKIS, N. C. VOULGARIS, «A hybrid PV-Wind generator system using à maximum power point tracking technique », Renewable energies for islands, Chania, Crete Greece, 2001.
- [5] A. KAABECHE, M. BELHAMEL, R. IBTIOUEN, S. MOUSSA et M. R. BENHADDADI, « Optimisation d'un système hybride (éolien – photovoltaïque) totalement autonome », Revue des Energies Renouvelables, Vol. 9, N° 3 199 – 209, 2006.
- [6] A. EL KHADIMI, « Modélisation de l'Irradiation Solaire Globale d'un Plan Horizontal et de la Vitesse du Vent en Vue de leur Utilisation dans le Dimensionnement d'un Système Hybride », Thèse de Doctorat de 3ème Cycle, Université Cadi Ayyad, Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech.
- [7] J. G. MCGOWAN, J.F. MANWELL, «Hybrid/PV/Diesel system experiences », Renewable Energy, 16, 928-933, 1999.
- [8] S. PETIBON, «Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, France, 2009.
- [9] : Bendjellouli Zakaria, ' Contribution à la modélisation d'une cellule solaire ', mémoire de magister, Tlemcen, 2009.

Chapitre 3

- [1] : S.Moussa, A.Kaabèche et M. Belhamel, 'Evaluation des Performances d'un Système Hybride de Production d'Electricité', Revue. Energie Renouvelable, 1999, pp 247-250.
- [2] : R. Miguel, 'Small Wind/Photovoltaic Hybrid Renewable Energy System Optimisation', Thèse de master, Université de Puerto Rico, 2008.
- [3] : S. Diaf, M. Haddadi et M. Belhamel, 'Analyse technico économique d'un système hybride (photovoltaïque/éolien) autonome pour le site d'Adrar', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 9, N°3, pp 127 – 134, 2006..
- [4] : M. Louazène, 'Etude technico- économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site de Ouargla', mémoire de magister, Batna, 2008.
- [5] : N.Benbouza, 'Etude du rayonnement solaire dans la région de Batna,' mémoire de magister, Batna, 2008.
- [6] : M.Aksas, 'Wind energy potential in the site of Batna in Algeria', 1er Séminaire Méditerranéen sur L'énergie Eolienne, SMEE'2010, Tipaza, Algérie, 2010.
- [7] : Soltane Belakhal, 'Conception et Commande des machines à aimants permanents dédiés aux énergies renouvelables', thèse de doctorat, Constantine, 2010.
- [8] : <http://nrel.gov/homer>, HOMER V-2.68 Beta, National Renewable Energy Laboratory (NREL), USA.
- [9] : L. Zarour, 'Etude d'un système d'énergie hybride photovoltaïque-éolien hors réseau', thèse de doctorat, Constantine, 2010.
- [10] B.DESSUS et F. PHARABOD, «L'Énergie solaire », P.U.F, Paris, 1996.

ANNEXES

Caractéristiques l'éolienne SW Whisper 200 :

- _ Régulateur de charge externe,
- _ Pales en carbone/polypropylène,
- _ Alternateur sans balai à aimants permanents,
- _ Tension de sortie configurable à 12, 24, 36 ou 48Vdc.
- _ Diamètre du rotor : 3.0 m
- _ Poids : 30 Kg
- _ Vitesse de démarrage : 3.1 m/s (11.2 Km/h)
- _ Tension : 12, 24,36 ou 48Vdc configurable
- _ Puissance nominale 1000 Watt à 11.6 m/s (42 Km/h)
- _ Régulateur externe multi tension avec banc de dissipation, fourni avec l'éolienne
- _ Pâles : 3 pâles en carbone/polypropylène
- _ Potentiel de production : 193 kWh/mois à 5.4m/s de moyenne (19.3 Km/h)
- _ Vitesse de vent maximale : 193 Km/h (55 m/s)



Caractéristiques électriques du module photovoltaïque :

Puissance maximale (Pmax)	160 Wc
Tension à Pmax (Vmpp)	35.1V
Courant à Pmax (Impp)	4.8A
Tension à circuit ouvert (Vco)	44.2V
Courant à court-circuit (Isc)	5.35V
Coefficient de température de Isc	(0.065 ± 0.015)%/ °C
Coefficient de température de Vco	-(160 ± 20) mV/ °C
Coefficient de température de la puissance	-(0.5 ± 0.05)%/ °C
Rendement	12.7%
Tension nominale	24V
NOCT	47 ± 2 °C

Programme Matlab :

```
clc
clear all
EL=16563;
Epv=459.4;
Eeol=315.42;

Apv=[];
Aeol=[];
f=0
while f<=1

    A1=f*(EL/Epv);
    A2=(1-f)*(EL/Eeol);
    Apv=[Apv;A1];
    Aeol=[Aeol;A2];
    % Apv=Apv./1.26;
    % Aeol=Aeol./7.05;

    % Apv=round(Apv);
    % Aeol=round(Aeol);

    f=f+0.1

end
%Apv=Apv./1.26;
%Aeol=Aeol./7.05;
%Apv=int16(Apv)+1;
%Aeol=int16(Aeol)+1;
Apv
Aeol
```