

Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Mécanique



MEMOIRE

Pour obtenir le Diplôme de Master Professionnel

Spécialité: Génie Mécanique
Option : Energétique

Présenté Par :

BOUNACEUR AMIN

-THEME-

**Etude et conception d'un système hybride de
production d'énergie**

Soutenue le : 07 / 06 / 2015 devant la commission d'examen

Jury:

Mr.	BENCHEIKH KAMALE	MA(A).	Président
Mr.	KOURAS SIDALI	MA (A)	Examineur
Mr.	DOUAK MOHAMADE	MA (A)	Rapporteur

Année universitaire 2014-2015

Remerciement

*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 tiens tout d'abord à remercier notre encadreur **Mr. DOUAK MOUHAMED** Maître Assistante à l'université Kasdi Merbah Ouargla, pour nous avoir proposé ce sujet, et pour sa contribution et son aide qui nous ont été indispensable pour la réalisation de ce travail ainsi que tous ces remarques constructives qui nous ont permis d'approfondir les connaissances scientifiques.*

Je tiens à exprimer notre gratitude envers l'ensemble des membres de jury qui ont accepté de lire et juger notre travail :

***BENCHEIKH KAMALE**, maître assistante et chercheur à l'université Kasdi Merbah d'Ouargla, pour avoir accepté de présider le jury.*

***Mr. KOURAS**, maître assistante à l'université Kasdi Merbah d'Ouargla, pour nous avoir honorés par sa présence.*

Enfin, dans ces dernières lignes je tiens à remercier mes parents, mes sœurs et mes frères, pour les conseils et les encouragements qu'ils m'ont toujours prodigués ainsi que pour leur soutien tant moral que financier. Sans eux, je n'en serais pas où j'en suis et ce que je suis.

Merci encore à tous...

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

A mes chers parents que dieu les garde

A mes chers frères et sœurs.

Mes neveux et nièces ;

Mon grand-père et Mon grand-mère

Mes beaux-frères ;

Mes enseignants depuis mon enfance ;

A toute mes amis.

BOUNACEUR.A

Etude et conception d'un système hybride de production d'énergie

Résumé :

Ce travail constitue une contribution à l'étude des systèmes de conversion d'énergie électrique hybrides pour le site d'Ouargla. La démarche retenue exploite une méthodologie d'analyse de la complémentarité qui existe entre les deux énergies solaire et éolienne à partir de leurs variations saisonnières respectives. Pour cela nous avons utilisé deux méthodes différentes : La première est basée sur la moyenne des valeurs mensuelles annuelles, la seconde est basée sur le mois le plus défavorable. Les résultats obtenus montrent que la méthode du mois le plus défavorable présente un coût plus élevé du système hybride par rapport à la première, cela est dû à la meilleure fiabilité que présente le système déduit de cette méthode.

Mots clés: Système Photovoltaïque, Système éolien, Système hybride Photovoltaïque- éolien, Dimensionnement, Optimisation.

Abstract:

This work is a contribution to the study of systems for converting electrical energy associated with a hybrid storage system for the site of Ouargla. The approach adopted uses a methodology of analysis of the complementarity between both solar and wind power from their respective seasonal variations. For this we used two different methods: The first is based on the average annual monthly values, the second is based on the worst month. The results show that the method of the worst month has a higher cost of the hybrid system compared to the first, this is due to the greater reliability that the system has inferred from this method.

Keywords: Photovoltaic System, Wind System, Hybrid photovoltaic-wind, Sizing, Optimization.

ملخص:

يساهم هذا العمل في دراسة نظم تحويل الطاقة الكهربائية المرتبطة بنظام هجين لولاية ورقلة. النهج المعتمد يستخدم منهجية لتحليل التكامل الموجود بين الطاقين الشمسية والهوائية انطلاقاً من تغيراتهما الموسمية. وقد استعملنا طريقتين مختلفتين : الطريقة الأولى تعتمد على القيم المتوسطة السنوية للشهور خلال عام، بينما تعتمد الثانية على قيم الشهر الأسوأ في العام. تظهر النتائج أن الطريقة الثانية لها كلفة مرتفعة للنظام الهجين مقارنة بالأولى. يرجع هذا إلى زيادة موثوقية النظام المسير بهذه الطريقة.

الكلمات المفتاحية: النظام الكهروضوئي -النظام الهوائي -النظام الهجين الهوائي - كهر وضوئي - التحجيم- التحسين

Table des matières

Remerciements	
Dédicace	
Résumé	
Table des matières	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Symboles –notation- abréviations	
Liste des annexes	
Introduction générale	01
Chapitre I : Généralités sur les énergies renouvelables solaire et éolienne	
1. Introduction	05
2. Energie solaire	05
2.1. Définition	05
2.2 Energie solaire photovoltaïque	06
2.2.1 Définition	06
2.2.2 Différents types des cellules photovoltaïques	07
3. Energie éolienne	08
3.1 Définition de l'énergie éolienne	08
3.2 Les différents types d'éoliennes	08
a) Les éoliennes à axe horizontal	08
b) Les éoliennes à axe vertical	09
3.3 Principe De Fonctionnement	10
3.4 Eléments Constitutifs D'un Aérogénérateur (A Axe HORIZONTAL)	10
4. Energies solaire et éolienne en Algérie	12
4.1 Energie Solaire	13
4.2 Energie Eolienne	14
5. Conclusion	15

Chapitre II : Caractéristiques du système hybride photovoltaïque-éolien	
1. Introduction	17
2. Présentation du système hybride photovoltaïque-éolien	17
3. Principaux composants du Système d'énergie hybride photovoltaïque - éolien	18
4. Descriptions des composants du système hybride photovoltaïque-éolien	19
4.1. Générateurs photovoltaïques	19
4.2 Générateur éolien	19
4.3 Systèmes de stockage	19
4.4 Convertisseurs	20
4.5 Charges	20
5. Définition du système d'énergie hybride (S.E.H)	21
6. Conclusion	24
Chapitre III: Analyse technico économique d'un système hybride (photovoltaïque/éolien) autonome pour le site de Ouargla	
1. Introduction	26
2. Analyse du potentiel énergétique solaire et éolien disponible à Ouargla	26
3. Système Hybride Photovoltaïque - Eolien (PV-E)	27
3.1 Eléments constitutifs du système hybride	28
4. Caractéristiques des énergies photovoltaïque et éolienne	29
4. 1 Générateur photovoltaïque	29
4. 2 Générateur éolien	30
5. Méthode de dimensionnement du système	31
5. 1 Méthode des moyennes mensuelles annuelles	30
5.2 Méthode du mois le plus défavorable	33
5. 3 Surfaces retenues des composants	33
6. Analyse économique	33
7 Analyse et discussion des résultats	34

7.1 Procédure	40
7.2 Résultats	40
8. Conclusion	41
Conclusion Générale	43
Références Bibliographiques Annexes	

Liste des figures

Figure I.1: Les deux types d'énergie solaire	06
Figure I. 2 : Système Photovoltaïque	06
Figure I. 3 : Conversion de l'énergie cinétique du vent	08
Figure I. 4 : configuration à axe horizontal	09
Figure I. 5: éolienne de type Darrieus et Savonius	10
Figure I. 6 : Les Composante De L'aérogénérateur	11
Figure I. 7 : Potentiel d'énergie solaire en Algérie	13
Figure I. 8 : Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol (m/s)	14
Figure II. 1 : Schéma synoptique du système hybride étudié	18
Figure II. 2 : Système d'énergie hybride photovoltaïque-éolien	21
Figure III. 1 : Irradiation globale moyenne mensuelle du site d'Ouargla	27
Figure III. 2: Vitesse moyenne mensuelle du site d'Ouargla	27
Figure III. 3 : Schéma d'un système PV-E	28
Figure III. 4 : Variation mensuelle de température des cellules et de température ambiante.	30
Figure III. 5 : Rendement des panneaux photovoltaïques	30
Figure III. 6 : Energies moyennes mensuelles produites par les générateurs photovoltaïque et éolienne	35
Figure III. 7: Energies mensuelles annuelles produites par le système hybride (PV-éolien) Utilisé	36
Figure III. 8: Coût du système hybride (PV-éolien)	36
Figure III. 9: Energie produite par le système (PV-éolien) du mois le plus défavorable	37
Figure III. 10: Coût du système pour le mois le plus défavorable.	38
Figure III. 11: Organigramme de simulation du système hybride	39

Liste des tableaux

Tableau	Page
Tableau I.1: Comparatif des différentes technologies	07
Tableau I. 2 : Statistiques des degrés d'ensoleillement par zones	13
Tableau III.1 : Energies spécifiques mensuelles produites par les générateurs Photovoltaïque et éolien pour le site d'Ouargla et tailles nécessaires des deux générateurs.	34
Tableau III.2 : Méthode 1 - Dimensionnement selon la moyenne mensuelle annuelle $f = 1 \Rightarrow 100\%$ PV et $f = 0 \Rightarrow 100\%$ Eolien.	35
Tableau III.3 : Méthode 2 - Dimensionnement selon le mois le plus défavorable.	37

Liste Des Abréviations

PV	: L'énergie solaire photovoltaïque
GPV	: Générateur Photovoltaïque
PPM	: Un Point De Puissance Maximale
PV-E	: Système Hybride Photovoltaïque – Eolien
SEH	: Systèmes Hybrides
CC	: Le Courant Continu
CA	: Le Courant Alternatif

Notions et symboles

E_{pv}	: L'énergie électrique produite par un générateur photovoltaïque (kWh/m ² .mois)
A_c	: Représente la surface totale du générateur photovoltaïque (m ²)
η_{gen}	: Le rendement du Générateur photovoltaïque
G_{in}	: L'irradiation solaire sur un plan incliné (kWh/m ² .mois)
γ	: Le coefficient de la variation du rendement du module photovoltaïque en fonction de la température (°C ⁻¹)
η_r	: Le rendement de référence du générateur photovoltaïque
T_a	: La température ambiante moyenne journalière (°C)
T_c	: La température moyenne journalière de la cellule (°C)
NOCT	: La température nominale de fonctionnement de la cellule (°C)
P_f	: Le facteur de remplissage du module
E_{el}	: L'énergie électrique produite par un générateur éolien (kWh/m ² .mois)
P	: La puissance contenue sous forme d'énergie cinétique (w)
A	: La surface traversée par le vent (m ²)
ρ	: La densité de l'air (kg/m ³)
V	: La vitesse du vent (m/s)
C_e	: Le facteur d'efficacité
η_m	: Le rendement respectivement du multiplicateur
η_g	: Le rendement respectivement de la génératrice
C_p	: Le coefficient de performance de la turbine éolienne
EL	: Energie électrique demandée par la charge (Wh/j)
A_{pv}	: Surface des modules photovoltaïques (m ²)
$A_{éol}$: Surface de l'éolienne (m ²)
C_{tot}	: Coût total (PV +éolien (£))
C_{pv}	: Coût PV (£)
C_{el}	: Coût éolien (£)
(Nb)	: Nombre de Modules (PV- éolien)
F	: La fraction de la charge

Introduction Générale

/

Introduction Générale

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.

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'Algérie, 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.

Tandis que l'énergie éolienne qui représente un potentiel important à la région d'Ouargla, donne une autre extension pour notre pays pour se diversifier au point de production d'électricité d'origine renouvelable dans la décennie à venir.

De l'investissement d'une installation de production d'énergie électrique à partir du vent ou du rayonnement solaire.

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 étude de dimensionnement et d'optimisation technico-économique d'un système hybride photovoltaïque/éolien dans la région de Ouargla. Deux méthodes sont développées pour ce type de système. La première est basée sur la moyenne des valeurs mensuelles annuelles dans laquelle la taille des générateurs photovoltaïque et éolien est déterminée à partir des valeurs moyennes mensuelles des contributions de chaque composant. Dans la seconde méthode, la détermination des tailles de ces deux composants du système est basée sur le mois le plus défavorable.

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

- ❖ Le premier chapitre présente et expose les deux sources d'énergies renouvelables, que 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 proposée.
- ❖ Le troisième chapitre traite également de l'analyse technico économique des résultats de la simulation numérique et l'optimisation du système hybride (photovoltaïque/éolien) autonome pour le site de Ouargla qui a été traitée en utilisant MATLAB, pour chacune des méthodes ci-dessus.

Finalement, on termine par une conclusion générale, on rappellera les principaux résultats obtenus et on donnera les éventuelles perspectives.

Chapitre I :

Généralités sur les énergies renouvelables :

solaire et éolienne

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 terrestre 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. Énergie solaire.

I.2.1. Définition

L'énergie solaire est la source énergétique la plus abondante sur terre. Elle est à l'origine de la majorité des énergies renouvelables.

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 [1] (Voir Figure I.1).

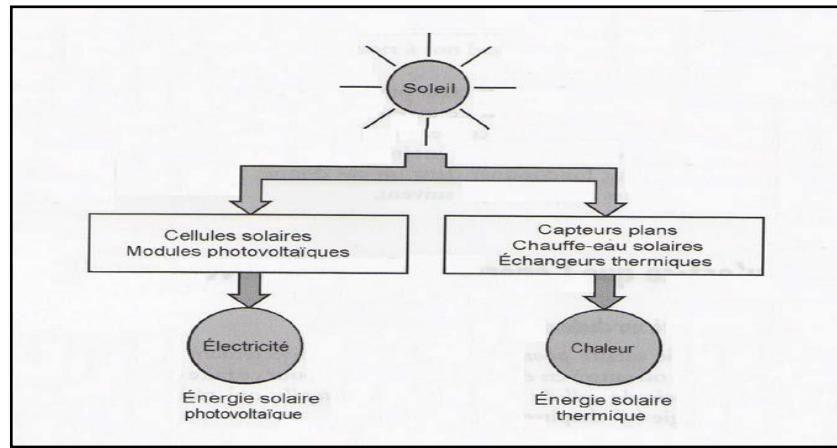


Figure I.1 : Les deux types d'énergie solaire [2]

Dans notre étude le système hybride est basé partiellement sur l'utilisation de l'énergie photovoltaïque.

I.2.2 Energie solaire photovoltaïque

I.2.2.1 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 de rayonnement et de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de l'ensemble [3].

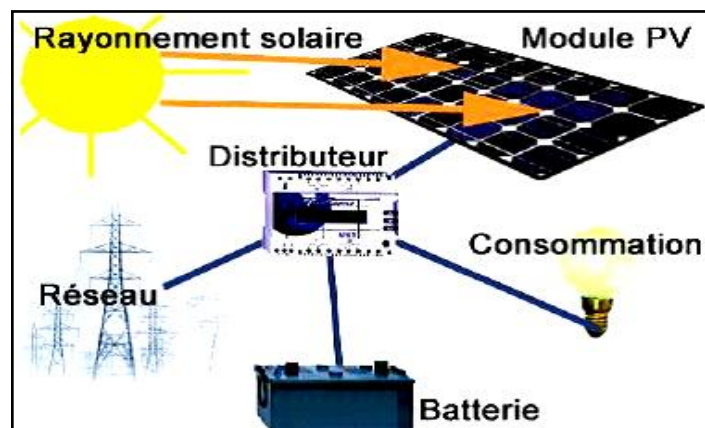





Figure I.2 : Système Photovoltaïque. [4]

I.2.2.2 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, (voir Tableau I.1) [5] :

Tableau I.1 : Comparatif des différentes technologies. [6]

Technologie	Monocristallin	Polychristallin	Amorphe
Cellule et module			
Caractéristiques	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Très bon rendement : 14 à 20 %. ❖ Durée de vie : importante (30 ans) ❖ Coût de fabrication : élevé. ❖ Puissance : 100 à 150 Wh/m². 7 m²/kWh. ❖ Rendement faible sous un faible éclairement. ❖ perte de rendement avec l'élévation de la température. ❖ Fabrication : élaborés à partir d'un bloc de silicium fondu qui s'est solidifié en formant un seul cristal ❖ Couleur bleue uniforme. 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Bon rendement : 11 à 15 %. ❖ Durée de vie : importante (30 ans) ❖ Coût de fabrication : meilleur marché que les panneaux monocristallins ❖ Puissance : 100 Wh/m². 8 m²/kWh. ❖ Rendement faible sous un faible éclairement. ❖ perte de rendement avec l'élévation de la température. ❖ Fabrication : élaborés à partir de silicium de qualité électronique qui en se refroidissant forme plusieurs cristaux. ❖ Ces cellules sont bleues, mais non uniforme : on distingue des motifs créés car les différents cristaux. 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Rendement faible : 5 à 9 %. ❖ Durée de vie : assez importante (20 ans) ❖ Coût de fabrication : peu onéreux par rapport aux autres technologies ❖ Puissance : 50 Wh/m². 16 m²/kWh. ❖ Fonctionnement correct avec un éclairement faible. ❖ Peu sensible aux températures élevées. ❖ Utilisables en panneaux souples. ❖ Surface de panneaux plus importante que pour les autres panneaux au silicium. ❖ Rendement faible en plein soleil. ❖ Performances diminuant avec le temps. ❖ Fabrication : couches très minces de silicium qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide.
Part de marché	43 %	47 %	10 %

I.3. Energie éolienne

I-3-1 Définition de l'énergie éolienne

L'éolienne est un dispositif destiné à convertir l'énergie cinétique du vent en énergie Mécanique, elles sont généralement utilisées pour produire l'électricité.

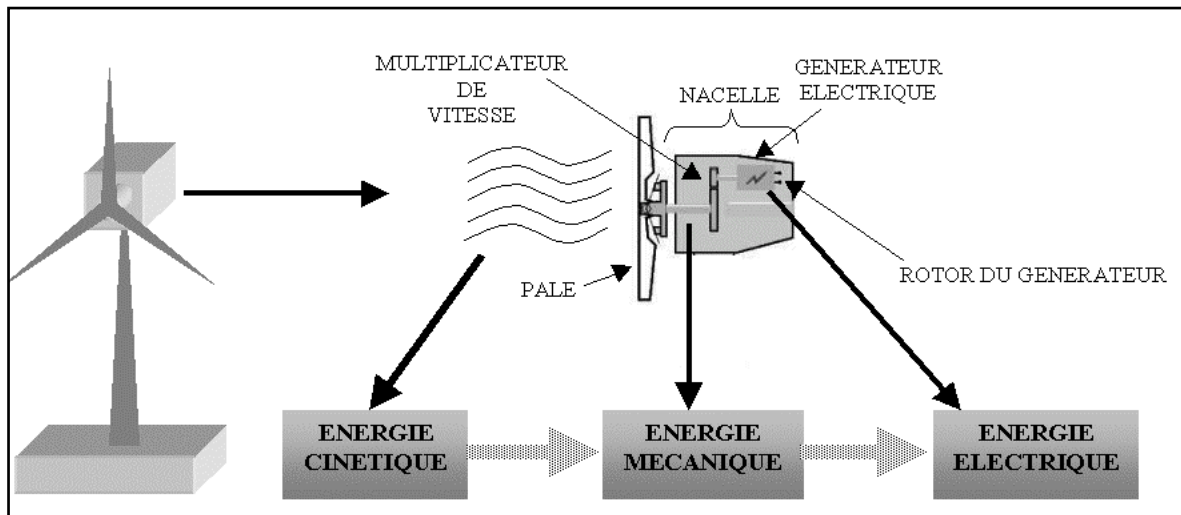


Figure I-3: Conversion de l'énergie cinétique du vent [7]

I-3-2 Les différents types d'éoliennes :

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe Horizontal [8] :

a) Les éoliennes à axe horizontal

Ce sont les machines les plus répandues actuellement du fait de :

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

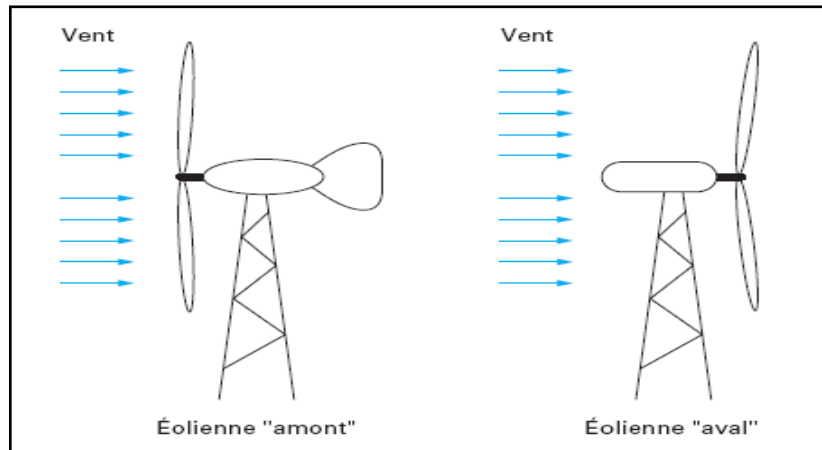


Figure I -4 : Configuration à axe horizontal [8]

b) Les éoliennes à axe vertical

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

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

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

Deux d'entre elles sont particulièrement remarquables : Savonius et Darrieus.

❖ L'éolienne Savonius comporte principalement deux demi cylindres dont les axes sont décalés l'un par rapport à l'autre. Comme les machines à aubes, elle utilise

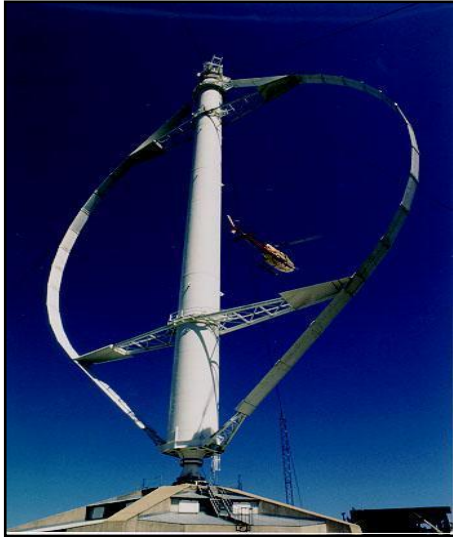
Essentiellement la traînée pour tourner. Cette machine présente deux avantages :

- Elle est simple à fabriquer
- Elle démarre avec des vitesses de vent de l'ordre de 2 m/s

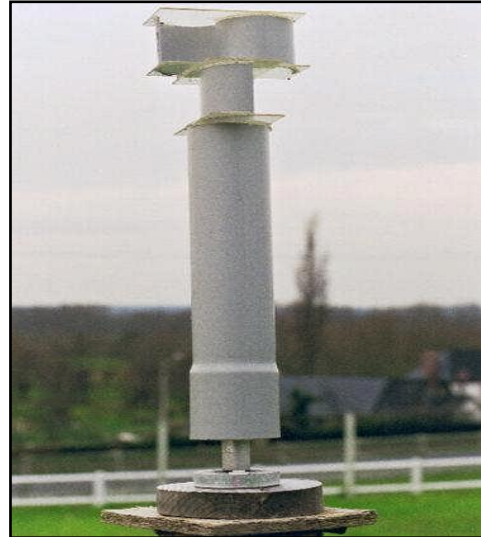
❖ L'éolienne inventée par le Français Darrieus est un rotor dont la forme la plus courante rappelle vaguement un fouet à battre les œufs.

Cette machine est bien adaptée à la fourniture d'électricité. Malheureusement, elle ne peut pas démarrer seule. Ce type de machine, qui peut offrir les puissances les plus fortes n'a pas connu le développement technologique qu'il méritait à cause de la fragilité du mécanisme encore mal maîtrisée.

Toutefois, cela devrait pouvoir être résolu si des efforts supplémentaires étaient faits dans la recherche sur ce sujet.



Éolienne de type Darrieus.



Éolienne de type Savonius.

Figure I -5: Eolienne de type Darrieus et Savonius [8]

I-3-3 Principe De Fonctionnement

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

❖ Au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique, en utilisant des profils aérodynamiques. Le flux d'air crée autour du profil une poussée qui entraîne le rotor et une traînée qui constitue une force parasite.

❖ Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique [9].

I-3-4 Eléments Constitutifs D'un Aérogénérateur (A Axe HORIZONTAL)

L'aérogénérateur utilise l'énergie cinétique du vent pour entraîner l'arbre de son rotor : cette énergie cinétique est convertie en énergie mécanique qui est elle-même transformée en énergie électrique par une génératrice électromagnétique solidaire au rotor. L'électricité peut être envoyée dans le réseau de distribution, stockée dans des accumulateurs ou utilisée par des charges isolées.

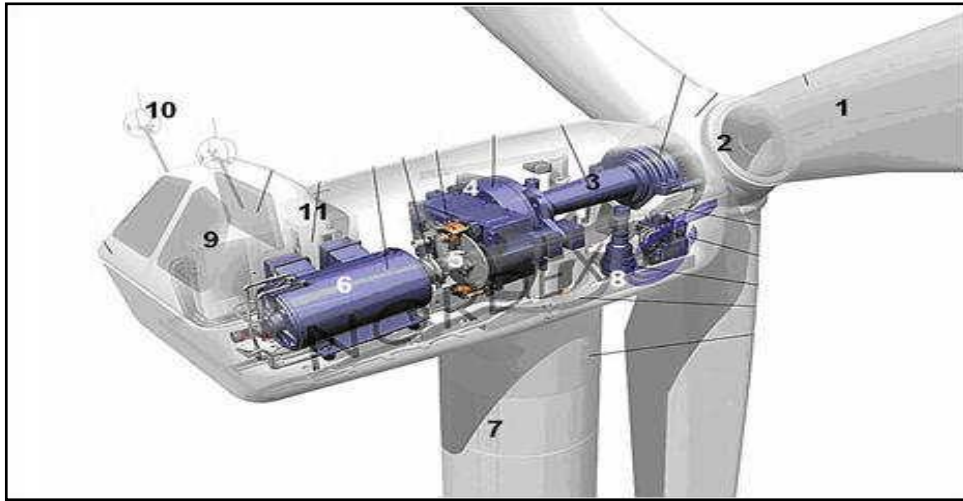


Figure I -6 Les Composante De L'aérogénérateur [10]

- 1. Les pales** : sont les capteurs de l'énergie cinétique qui transmettent l'énergie au rotor
- 2. Le moyeu** : il est pourvu d'un système qui permet d'orienter les pales pour réguler la vitesse de rotation.
- 3. L'arbre primaire** (ou arbre lent) : relie les pales au multiplicateur.
- 4. Le multiplicateur** : il permet de réduire le couple et d'augmenter la vitesse. C'est l'intermédiaire entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire.
- 5. L'arbre secondaire** : il amène l'énergie mécanique à la génératrice. Il est équipé d'un frein à disque mécanique qui limite la vitesse de l'arbre en cas de vents violents.
- 6. Le générateur électrique** : il assure la production électrique. Sa puissance peut atteindre jusqu'à 5 MW. Il peut-être une dynamo (produit du courant continu) ou un alternateur (produit du courant alternatif). L'alternateur est le plus utilisé pour des raisons de coût et de rendement.
- 7. Le mât** : c'est un tube en acier, pilier de toute l'infrastructure. Sa hauteur est importante : plus elle augmente, plus la vitesse du vent augmente mais en même temps le coût de la structure augmente. En général, le mat a une taille légèrement supérieure au diamètre des pales.
- 8. Le système d'orientation de la nacelle** : c'est une couronne dentée équipée d'un moteur qui permet d'orienter l'éolienne et de la verrouiller dans l'axe du vent grâce à un frein.
- 9. Le système de refroidissement** : il est à air, à eau ou à huile et destiné au multiplicateur et à la génératrice.

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

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

12. Au pied du mât se trouve un transformateur.

I.4 Energies solaire et éolienne en Algérie

L'intérêt pour le développement des énergies nouvelles et renouvelables a été perçu très tôt en Algérie. Toutefois, les efforts consentis dans ce domaine n'ont pas permis l'évolution attendue compte tenu de leur disponibilité et leur importance dans le développement économique et sociale.

Le potentiel techniquement exploitable en énergies renouvelables en Algérie est considérable et la qualité des gisements est telle que des investissements rentables peuvent être envisagés pour leur développement. Trois raisons principales plaident en faveur d'un tel développement:

1. Les énergies renouvelables constituent une solution économique viable pour fournir des services énergétiques aux populations rurales isolées notamment dans les régions du Grand Sud ;
2. Les énergies renouvelables permettent un développement durable du fait de leur caractère inépuisable et de leur impact limité sur l'environnement ;
3. La valorisation des énergies renouvelables ne peut qu'avoir des retombées positives en matière d'équilibre régional et de création d'emplois.

La Loi sur la maîtrise de l'énergie de juillet 1999 traduit la volonté et l'engagement des pouvoirs publics en faveur du développement des énergies renouvelables et fixe un nouveau cadre juridique pour la gestion et l'orientation de la demande d'énergie à tous les niveaux de la chaîne énergétique. Cette politique énergétique s'articule autour des préoccupations d'utilisation rationnelle de l'énergie, de promotion des énergies renouvelables et de protection de l'environnement.

Compte tenu des enjeux futurs que représentent ces sources d'énergies durables, les pouvoirs publics ont consacré le caractère prioritaire et stratégique des énergies renouvelables à travers un cadre législatif mis en place récemment. En effet, les pouvoirs publics se sont engagés à accorder un soutien direct au programme de développement des énergies renouvelables notamment au profit des populations défavorisées et des régions déshéritées [11].

Le potentiel des énergies renouvelables en Algérie est comme suit :

I.4.1 Energie Solaire

Par sa situation géographique, l'Algérie dispose l'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m² est de l'ordre de 5KW/h sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 (KW/h/m²)/an au Nord et 2263 (KWh/m²)/an au Sud, voire carte solaire (figure 1.6).

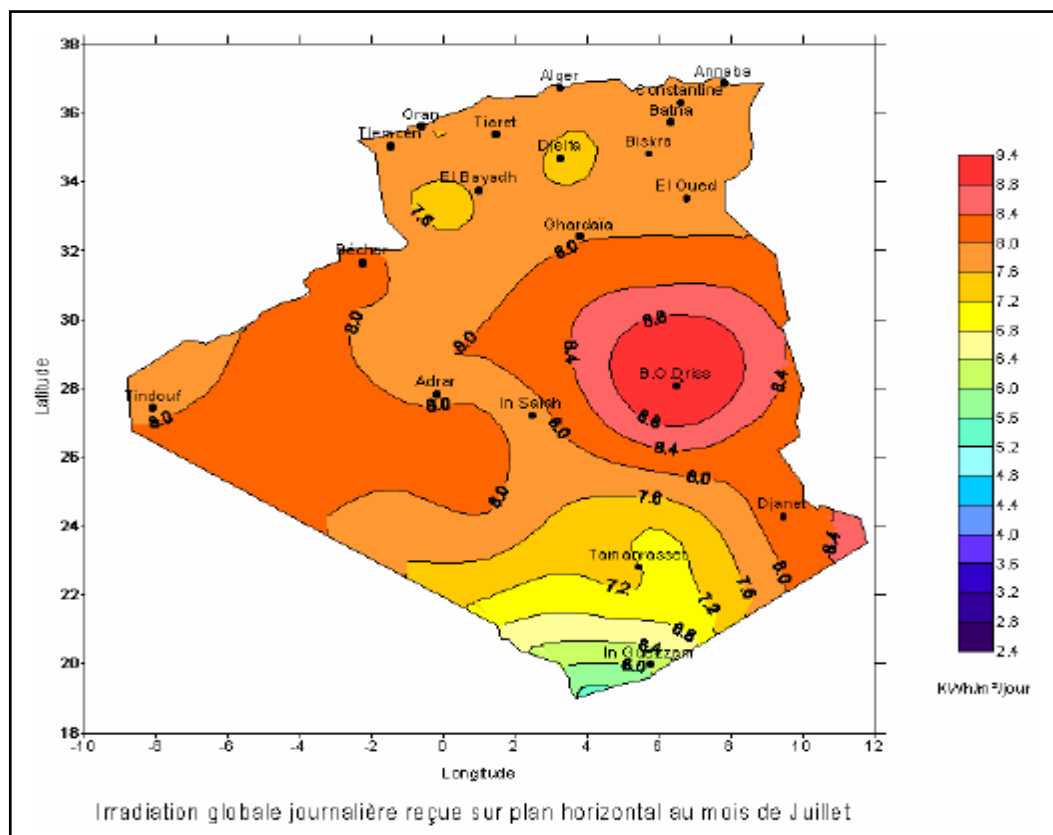


Figure 1.7: Potentiel d'énergie solaire en Algérie [12].

Tableau I.2: Statistiques des degrés d'ensoleillement par zones [13].

Régions	Région côtière	Hauts plateaux	Sahara
Superficie %	04	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement H/A	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue kWh/m ² /An	1700	1900	2650

Ce gisement solaire dépasse les 5 milliards de GWh [13].

I.4.2 Energie Eolienne

La carte des vents de l'Algérie, estimée à 10 m du sol est présentée en figure 2.16. Les vitesses moyennes annuelles obtenues varient de 2 à 6.5 m/s. On remarque qu'à l'exception de la région côtière (moins Béjaïa et Oran), du Tassili et de Beni Abbés, la vitesse de vent moyenne est supérieure à 3 m/s.

En fait, la région centrale de l'Algérie est caractérisée par des vitesses de vent variant de 3 à 4 m/s, et augmente au fur et à mesure que l'on descend vers le sud-ouest. Le maximum est obtenu pour la région d'Adrar avec une valeur moyenne de 6.5 m/s.

Cependant, nous pouvons observer l'existence de plusieurs microclimats où la vitesse excède les 5 m/s comme dans les régions de Tiaret, Tindouf et Oran.

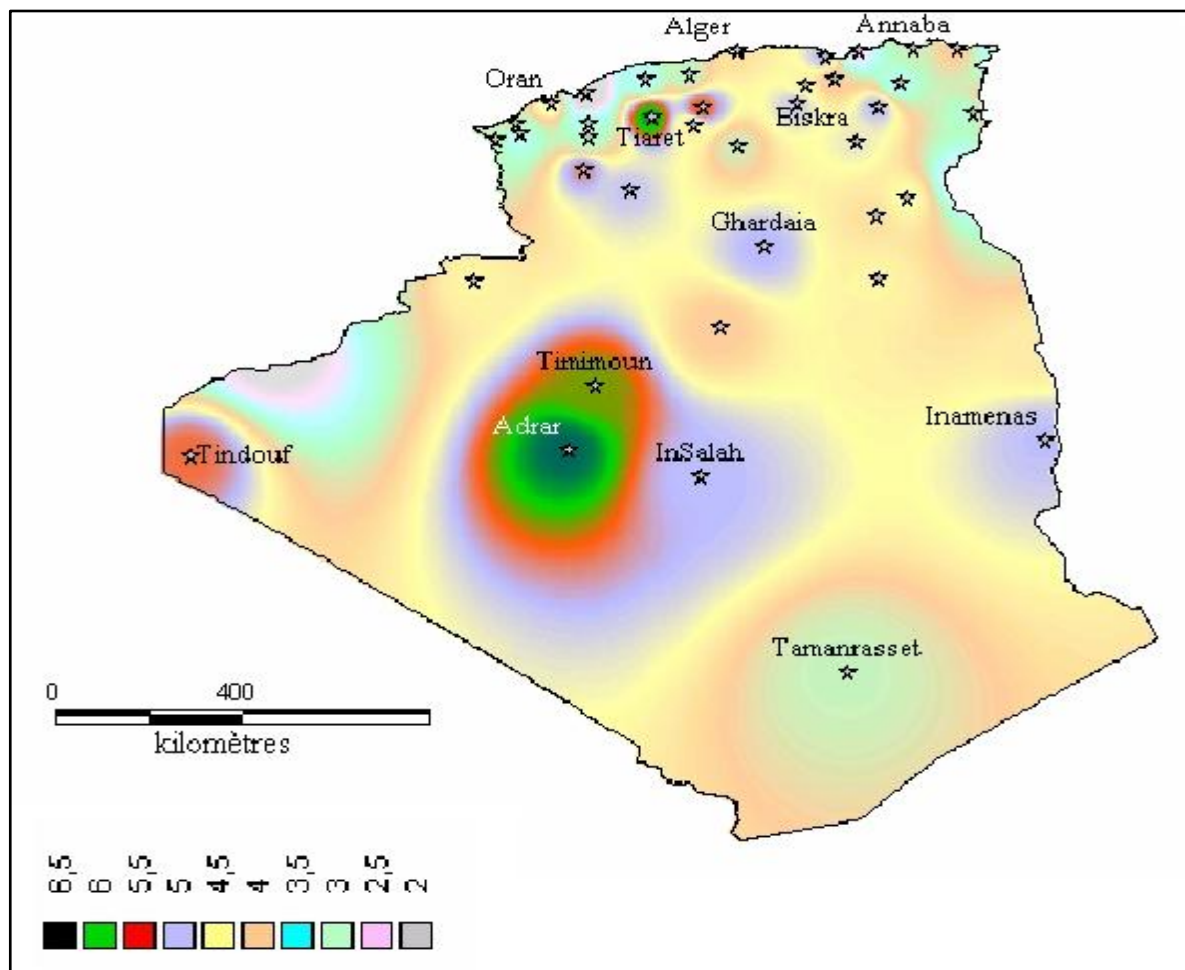


Figure 8 : Atlas de la vitesse moyenne Annuelle du vent de l'Algérie estimée à 10 m du sol [12].

I.5. Conclusion

Nous avons présenté dans ce présent chapitre d'une part les différentes notions qui entrent dans la conception des deux énergies : solaire photovoltaïque et éolienne. Et d'autre part, nous avons évoqué 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.

Chapitre II :

*Caractéristiques du système hybride
photovoltaïque-éolien*

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.

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

II.2. 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 (Voir Figure II.1), et produisent du courant continu facilement convertible en courant alternatif, grâce à l'intégration d'un onduleur autonome dans le circuit [14]. 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 [15].

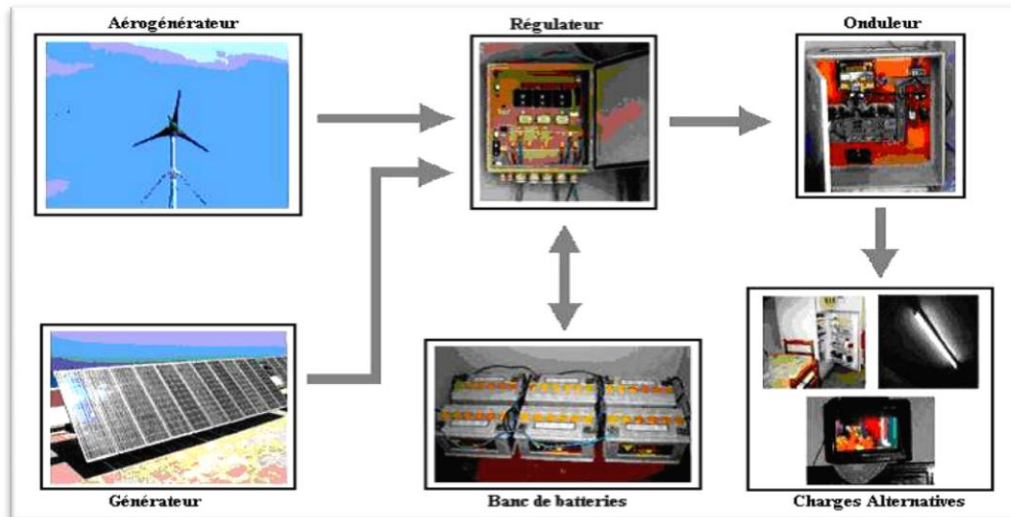


Figure II.1 : Schéma synoptique du système hybride étudié. [14]

II.3. 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 [16],
- 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.4. Descriptions des composantes du système hybride photovoltaïque-éolien

II.4.1. 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.4.2 Générateur éolien

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 [17].

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 [18].

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 [19].

II.4.3 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 [20].

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 [20].

Le principe du volant d'inertie est simple. Il s'agit d'emmagasiner l'énergie en mettant en rotation une masse importante [21]. L'énergie cinétique obtenue peut être restituée à la demande sous forme d'énergie électrique, en utilisant une machine électrique en régime générateur.

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.4.4 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 générateur. 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.4.5 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.5. 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 [22].

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.

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

(Voir Figure II.2) [23].

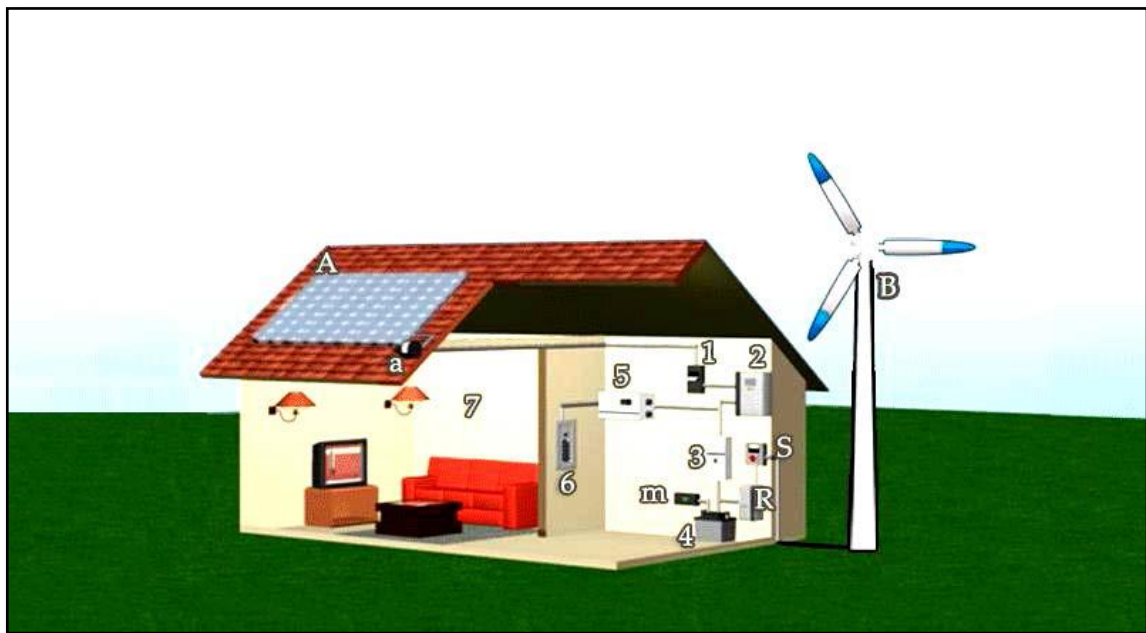


Figure II.2 : Système d'énergie hybride photovoltaïque-éolien [23].

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 [23]: 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 écrêter les hausses de tension. Dans le cas hybride il sera aussi placé dans la boîte de jonction associée à l'éolienne.

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.

4 : Batterie : La batterie doit être installée si possible dans une enceinte isolée ou un bac en plastique avec couvercle et entreposée dans un endroit bien ventilé, car elle est sensible aux variations de températures [23] .

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 [23].

II.6. 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. Les différents types d'architectures existants, les outils de dimensionnement, ainsi que les problèmes habituels des S.E.H ont également été présentés.

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 modélisées puis dimensionnées dans le chapitre suivant.

CHAPITRE III:

*Analyse technico économique d'un système
hybride (photovoltaïque/éolien) Autonome
pour le site de Ouargla*

III.1 Introduction :

Dans ce papier, nous présentons d'une part, une méthode qui permet de déterminer la taille et l'optimisation d'un système hybride photovoltaïque-éolien. D'autre part, nous déterminons la configuration technico-économique optimale en utilisant deux scénarios. Le premier scénario utilise la moyenne des valeurs mensuelles par an, alors que, le deuxième scénario introduit la notion du mois le plus défavorable. Pour une charge fixe de 0.720 kWh/j.

III.2 Analyse du potentiel énergétique solaire et éolien disponible à Ouargla

Ouargla est doté d'un fort potentiel de rayonnement solaire, et la région est caractérisée par une saison d'été très chaude (Juin - Septembre), la température ambiante varie entre 12.7°C au mois de Janvier (le mois le plus froid) et 38.05°C au mois de Juillet (le mois le plus chaud), avec une valeur moyenne annuelle de 25.37°C. Les valeurs moyennes mensuelles journalières de l'irradiation globale sur plan horizontal et incliné (à la latitude 31.9°C) sont représentées dans la figure 1. L'irradiation moyenne journalière sur plan horizontal est importante sur la période (Juin – Septembre), comparativement aux autres mois de l'année, elle dépasse les 7.3 kWh/m².jour durant les mois de juin et juillet. Remarquant que durant la période Mai - août, l'irradiation sur le plan horizontal est plus importante que sur le plan incliné. Du même pour le gisement éolien, en se basant sur les données de l'Office National de la Météorologie 'O.N.M.' du site de Ouargla [24], la vitesse moyenne mensuelle est représentée dans la figure 2. On peut constater que le site de Ouargla est doté aussi d'un gisement éolien considérable avec une vitesse moyenne annuelle du vent de l'ordre de 3.7 m/s pour une hauteur de 10 mètres et une vitesse moyenne mensuelle généralement élevée pendant la période de (Mars – septembre) dépassant les 4 m/s par rapport aux autres mois de l'année. Ceci prouve clairement que le site d'Ouargla est bien adapté pour une production de l'énergie éolienne.

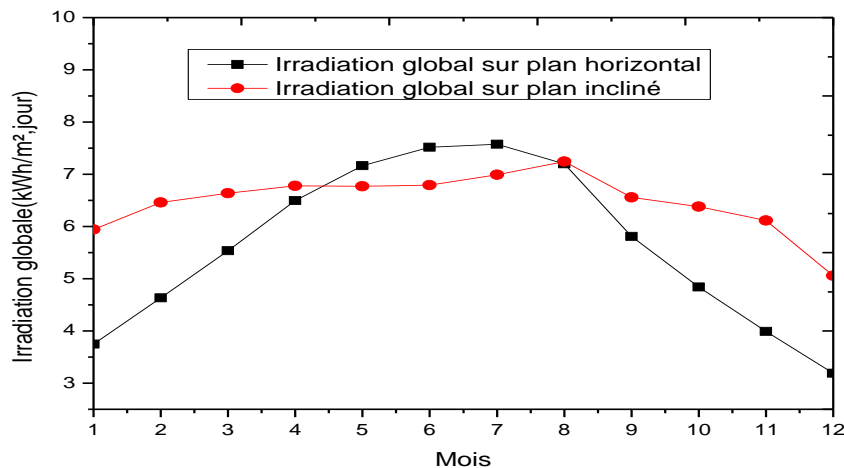


Figure III.1: Irradiation globale moyenne mensuelle du site d'Ouargla

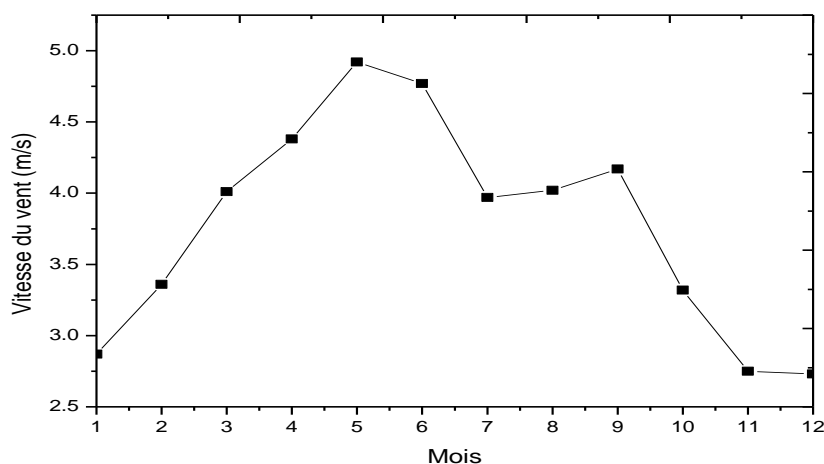


Figure III.2: Vitesse moyenne mensuelle du site d'Ouargla

III.3 SYSTEME HYBRIDE PHOTOVOLTAIQUE - EOLIEN (PV-E)

Le système couplé PV-E a été simulé en utilisant des données synthétiques de l'irradiation solaire et de la vitesse du vent collectées du 1er janvier 2006 au 31 décembre 2015, pour le site de Ouargla, (latitude = 31°9'N, longitude = 5°4'W, altitude = 142 m).

L'intérêt d'un tel couplage est d'avoir plus d'énergie, mais, comme pour tout système Solaire, le risque demeure d'avoir trop d'énergie à certains moments et pas assez à d'autres (absence de vent par ciel couvert, par exemple). Il s'agit donc, par l'intermédiaire d'un système

de stockage, d'emmagasiner l'excès énergétique lorsqu'il existe et de le restituer lors des périodes de manque d'apport [25].

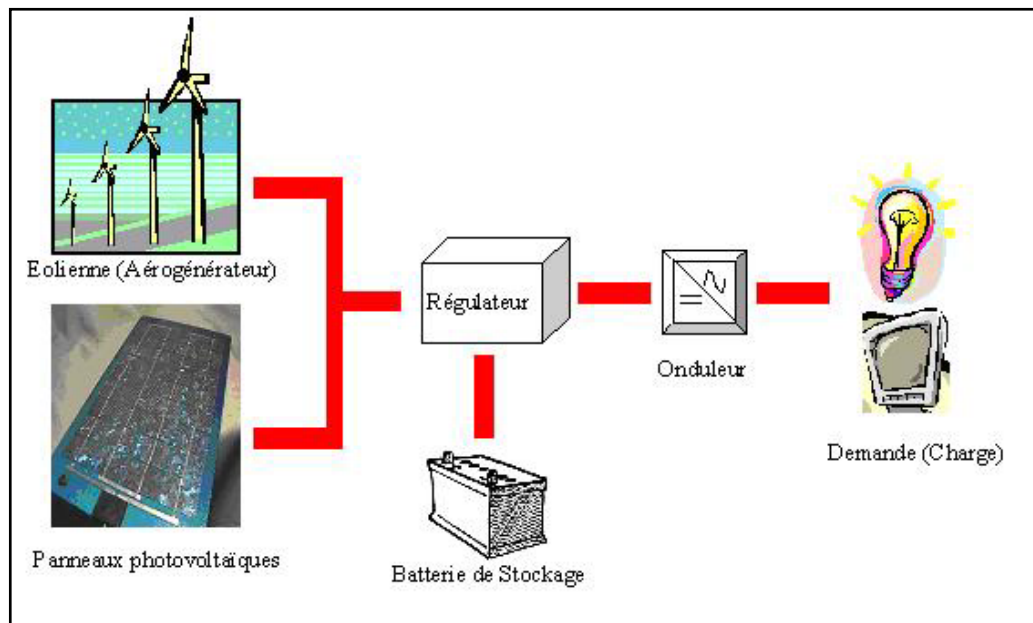


Figure III. 3 : Schéma d'un système PV-E

Pour faire cette analyse, nous définissons un système de conversion complètement intégré qui combine les deux sortes d'énergies. Ce système contient la conversion d'énergie solaire et éolienne, qui est ensuite relié au stockage et à la demande comme le schématise la figure. 3 [26].

III.3.1 Eléments constitutifs du système hybride

Les systèmes PV-E 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 [27],
- ❖ L'éolien, très variable [28].

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

III.4 Caractéristiques des énergies photovoltaïque et éolienne

III.4.1 Générateur photovoltaïque

L'énergie produite par un générateur photovoltaïque est estimée à partir des données de l'irradiation globale sur plan incliné, de la température ambiante et des données du constructeur pour le module photovoltaïque utilisé.

L'énergie électrique produite par un générateur photovoltaïque est donnée par [29]:

$$E = \eta_{gen} \cdot A_c \cdot P_f \cdot G_{in} \quad (1)$$

Où A_c représente la surface totale du générateur photovoltaïque (m^2); η_{gen} le rendement du Générateur photovoltaïque et G_{in} l'irradiation solaire sur un plan incliné ($kWh/m^2 \cdot mois$).

Le rendement du générateur photovoltaïque est représenté par l'équation suivante:

$$\eta_{gen} = \eta_r (1 - \gamma (T_c - 25)) \quad (2)$$

$$T_c = T_a + G_{in} \left(\frac{NOCT - 20}{800} \right) \quad (3)$$

γ : est le coefficient tenant compte de la variation du rendement du module photovoltaïque en fonction de la température, qui est pris à ($0.0045 / ^\circ C$); η_r est le rendement de référence du générateur photovoltaïque; T_a la température ambiante moyenne journalière; T_c la température moyenne journalière du cellule ($^\circ C$); NOCT est la température nominale de fonctionnement de la cellule qui est pris à $45,3 (^\circ C)$. et P_f qui est le facteur de remplissage du module, égal à 0.9.

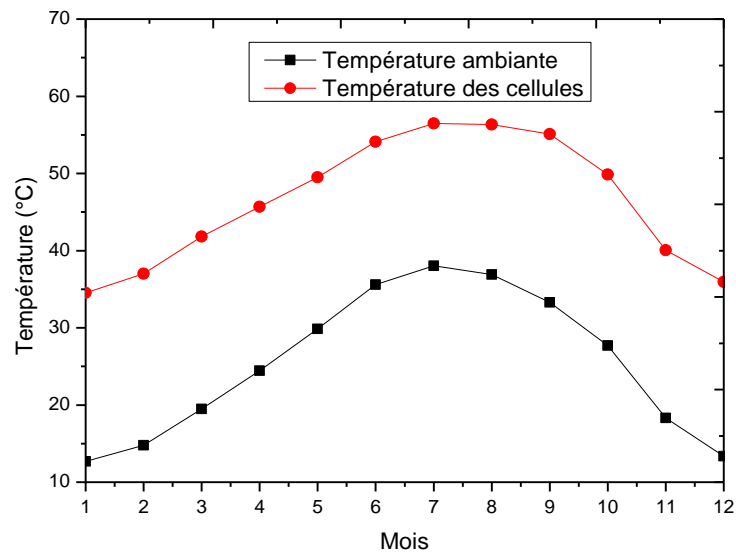


Figure III.4 : Variation mensuelle de température des cellules et de température ambiante.

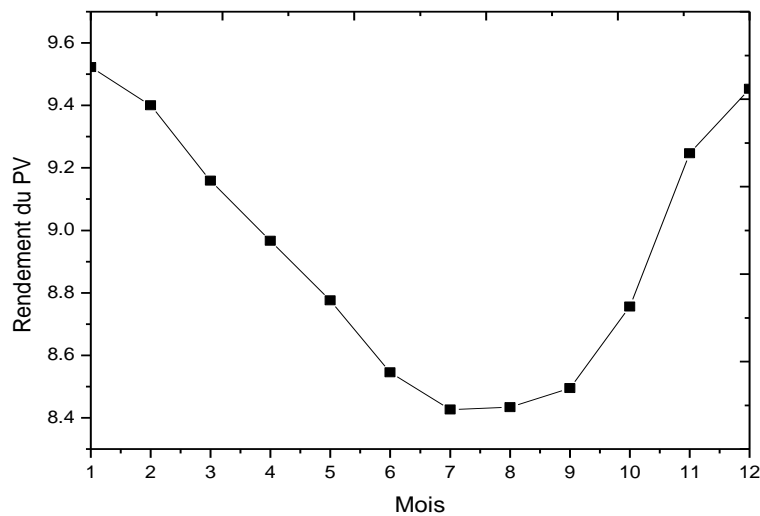


Figure III.5: Rendement des panneaux photovoltaïques

III.4. 2 Générateur éolien

La puissance contenue sous forme d'énergie cinétique, P (W), dans le vent est exprimée par:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (4)$$

Avec: A est la surface traversée par le vent (m²); ρ est la densité de l'air (= 1.225kg/m³) et V la vitesse du vent (m/s).

Pour des applications en génie énergétique éolien, l'estimation de la puissance moyenne produite par un aérogénérateur, passe nécessairement par la connaissance de la vitesse du vent à la hauteur de son moyeu. Pour obtenir des données de vitesses du vent à une hauteur désirée, on doit procéder à une extrapolation verticale des vitesses du vent mesurées généralement à la hauteur normalisée de 10 mètres du sol, au moyen du modèle de puissance (Justus et Mikhail 1976), souvent utilisé dans la littérature existante.

$$\frac{V}{V_{data}} = \left(\frac{Z}{Z_{data}} \right)^{\alpha} \quad (5)$$

Tel que α est donnée par la loi de puissance Justus C.G. et Mikhail 1976

$$\alpha = \frac{0.37 - 0.088 \ln(V_{data})}{1 - 0.088 \ln\left(\frac{Z_{data}}{10}\right)} \quad (6)$$

la puissance produite par le générateur éolien:

$$P_e = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_e \cdot A \cdot V^3 \cdot 10^{-3} \quad (7)$$

C_e est le facteur d'efficacité, qui dépend de la vitesse du vent et de l'architecture du système [30]. Il est déterminé à partir des performances de l'unité de transformation.

$$C_e = C_p \cdot \eta_m \cdot \eta_g \quad (8)$$

η_m et η_g représentent le rendement respectivement du multiplicateur et de la génératrice. C_p est le coefficient de performance de la turbine éolienne. Il ne peut théoriquement pas dépasser une limite dite limite de Betz (C_p-limite = 0.593).

Dans cette étude, on prend C_e = 0.45.

Par conséquent, l'énergie produite par le générateur éolien est exprimée par:

$$E_{el} = P_{el} \cdot \Delta t \quad (9)$$

III.5 Méthode de dimensionnement du système

L'énergie mensuelle produite du mois le plus défavorable est fonction de la charge mensuelle, des ressources climatiques et des performances des composants du système. La

surface du générateur nécessaire pour assurer la couverture totale (100 %) de la charge (E_L) durant le mois le plus défavorable est exprimée par:

$$A_i = \max \left(\frac{E_{L,m}}{E_{i,m}} \right) \quad (10)$$

Avec $i = pv$ pour le générateur photovoltaïque et $i = el$ pour le générateur éolien.

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 exprimée par:

$E_{pv,m}$ (kWh/m²) pour le photovoltaïque et $E_{el,m}$ (kWh/m²) pour l'éolien (où $m = 1, \dots, 12$, représente le mois de l'année).

$$E_{pv}A_{pv} + E_{el}A_{el} = E_L \quad (11)$$

Avec

$$E_{pv}A_{pv} = f \cdot E_L \quad (12)$$

$$E_{el}A_{el} = (1 - f) E_L \quad (13)$$

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

Dans cette étude de dimensionnement et d'optimisation, deux méthodes sont utilisées, et elles sont basées sur la moyenne mensuelle annuelle et la moyenne du mois le plus défavorable de l'énergie totale incidente.

III.5. 1 Méthode des moyennes mensuelles annuelles

Dans cette méthode, la taille des générateurs photovoltaïques et éoliens est tirée des valeurs moyennes annuelles de chaque contribution nommée E_{pv} , E_{el} (pour un mois). De la même Manière, la charge est représentée par la valeur moyenne mensuelle annuelle. Par conséquent, les surfaces des deux générateurs photovoltaïque et éolien sont données par:

$$A_{pv} = f \frac{\overline{E_L}}{E_{pv}} \quad (14)$$

$$A_{el} = (1-f) \frac{\overline{E_L}}{E_{el}} \quad (15)$$

Cette méthode est utilisée lorsque les données météorologiques incidentes sont disponibles.

III.5.2 Méthode du mois le plus défavorable

Pour cette méthode, le dimensionnement des composants du système (générateurs photovoltaïque et éolien) se fait en fonction du mois le plus défavorable pour le solaire et pour l'éolien.

Les surfaces nécessaires pour les deux générateurs sont exprimées par:

$$A_{pv} = f \cdot \max \left(\frac{E_{L,m}}{E_{pv,m}} \right) \quad (16)$$

$$A_{el} = (1-f) \cdot \max \left(\frac{E_{L,m}}{E_{el,m}} \right) \quad (17)$$

Dans notre cas, E_L est constante.

III.5.3 Surfaces retenues des composants

Economiquement, la taille réelle retenue pour chaque générateur est particulièrement importante pour les systèmes de petite échelle car elle peut être différente de celle (théorique) qui est déterminée dans les équations précédemment mentionnées. La taille (surface) réelle est calculée selon la surface de l'unité du composant ($S_{pv,u} = 0.3 \text{ m}^2$ et $S_{e,u} = 0.65 \text{ m}^2$).

$$A_{i,r} = ENT \left(\frac{A_i}{A_{i,u}} \right) \quad (18)$$

Telle que $ENT \left(\frac{A_i}{A_{i,u}} \right)$ représente la valeur entière du rapport, prise par excès.

III.6 Analyse économique

Le coût total du système représente la somme des coûts initiaux de tous les composants, les coûts d'opérations et de maintenance et les coûts de remplacement.

Pour cette analyse économique, seuls les coûts des composants seront pris en compte. Le coût total du système sera donné par:

$$C_{tot} = C_{PV} + C_{el} \quad (19)$$

Les prix unitaires de chaque composant sont relatifs à l'article [31].

- ❖ Module photovoltaïque amorphe: 58.78 £ pour une surface de 0.3 m².
- ❖ Générateur éolien: 327 £ pour une surface de 0.65 m².

III.7 Analyse et discussion des résultats

Le tableau 1 montre la production énergétique mensuelle des composants du système hybride étudié et la taille de chaque composant nécessaire pour satisfaire une charge de consommation journalière supposée constante de l'ordre de 0.720 kWh par jour en utilisant les données réelles du site de Ouargla.

Tableau 1: Energies spécifiques mensuelles produites par les générateurs photovoltaïque et éolien pour le site de Ouargla et tailles nécessaires des deux générateurs.

Mois	Irradiation mensuelle (kWh/m ² .mois)	E _{pv} mensuelle (kWh/m ² .mois)	E _{el} mensuelle (kWh/m ² .mois)	E _{tot} kWh/m ² .mois)	EL (kWh)	A _{pv} (m ²)	A _{el} (m ²)
Janvier	180	17.82	4.5016	22.3216	22.32	1.2525	4.5016
Février	176	17.424	6.6562	24.0802	20.16	1.157	3.0287
Mars	200	19.8	12.1642	31.9642	22.32	1.1273	1.8349
Avril	197	19.503	16.9048	36.4078	21.6	1.1075	1.2777
Mai	202	19.998	24.1257	44.1237	22.32	1.1161	0.9251
Juin	195	19.305	18.0838	37.3888	21.6	1.1189	1.1944
Juillet	207	20.493	16.3041	36.7971	22.32	1.0892	1.369
Aout	215	21.285	14.1333	35.4183	22.32	1.0486	1.5792
Septembre	191	18.909	13.6774	32.5864	21.6	1.1423	1.5792
Octobre	192	19.008	7.3694	26.3774	22.32	1.1742	3.0287
Novembre	179	17.721	3.1008	20.8218	21.6	1.2189	6.9659
Décembre	154	15.246	4.0363	19.2823	22.32	1.464	5.5298
Moyenne mensuelle	190.666	18.876	11.7548	30.6308	21.9	1.168	2.7345

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

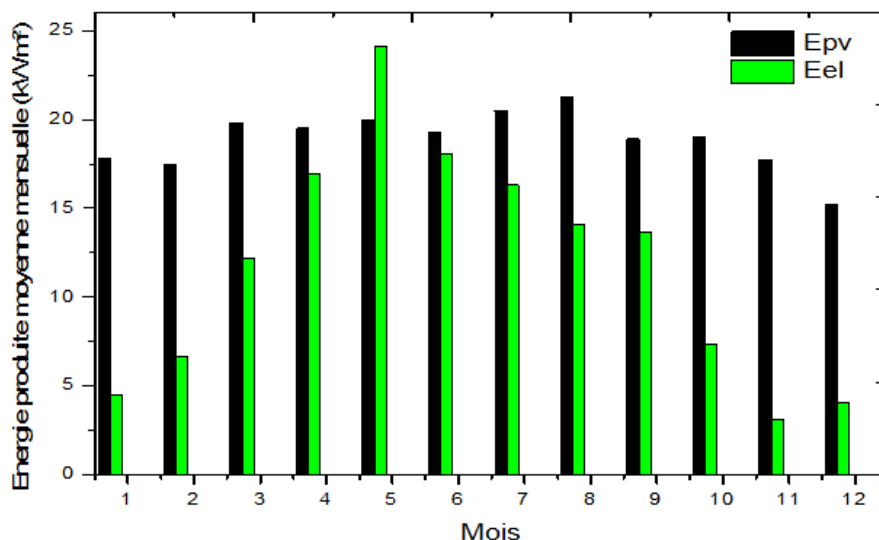


Figure III.6 : Energies moyennes mensuelles produites par les générateurs photovoltaïque et éolienne

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 (2) illustre les différentes configurations possibles du couplage du système photovoltaïque avec le système éolien et le coût de chaque configuration.

Tableau 2: Méthode 1 - Dimensionnement selon la moyenne mensuelle annuelle

$f = 1 \Rightarrow 100\% \text{ PV}$ et $f = 0 \Rightarrow 100\% \text{ Eolien}$.

F	Apv (m²)	Modules PV (Nb)	Ael (m²)	Générateur éolien (Nb)	Coût PV (£)	Coût éolien (£)	Coût total PV + éolien (£)
1	1.2	4	0	0	235.12	0	235.12
0.9	1.2	4	0.65	1	235.12	327	562.12
0.8	0.9	3	0.65	1	176.34	327	503.34
0.7	0.9	3	1.3	2	176.34	654	830.34
0.6	0.9	3	1.3	2	176.34	654	830.34
0.5	0.6	2	1.3	2	117.56	654	771.56
0.4	0.6	2	1.95	3	117.56	981	1098.56
0.3	0.3	1	1.95	3	58.78	981	1039.78
0.2	0.3	1	2.6	4	58.78	1308	1366.78
0.1	0.3	1	2.6	4	58.78	1308	1366.78
0	0	0	3.25	5	0	1635	1635

La figure III.7 représente l'énergie produite par les générateurs photovoltaïque et éolien

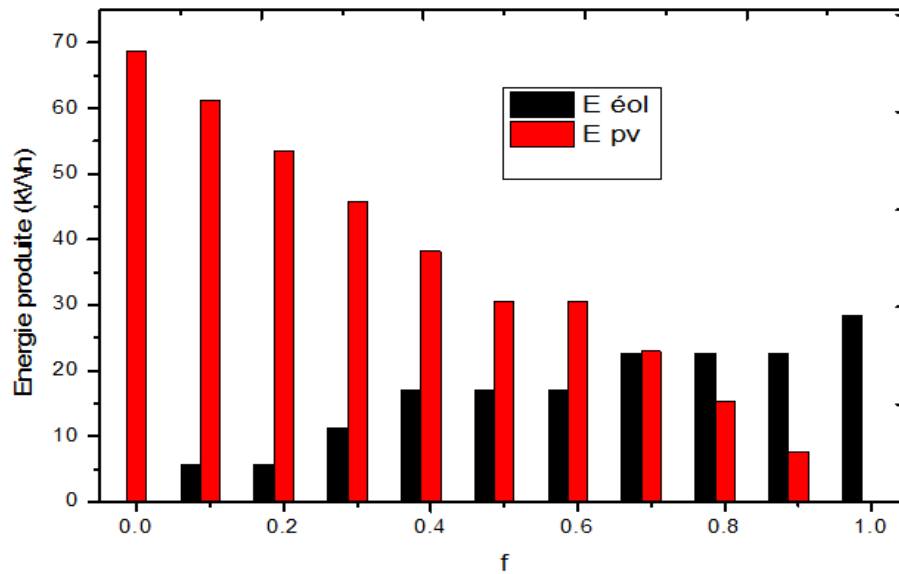


Figure III.7 : Energies mensuelles annuelles produites par le système hybride (PV-éolien)
Utilisé

La figure (III.8) représente les coûts du système hybride (PV-éolien) :

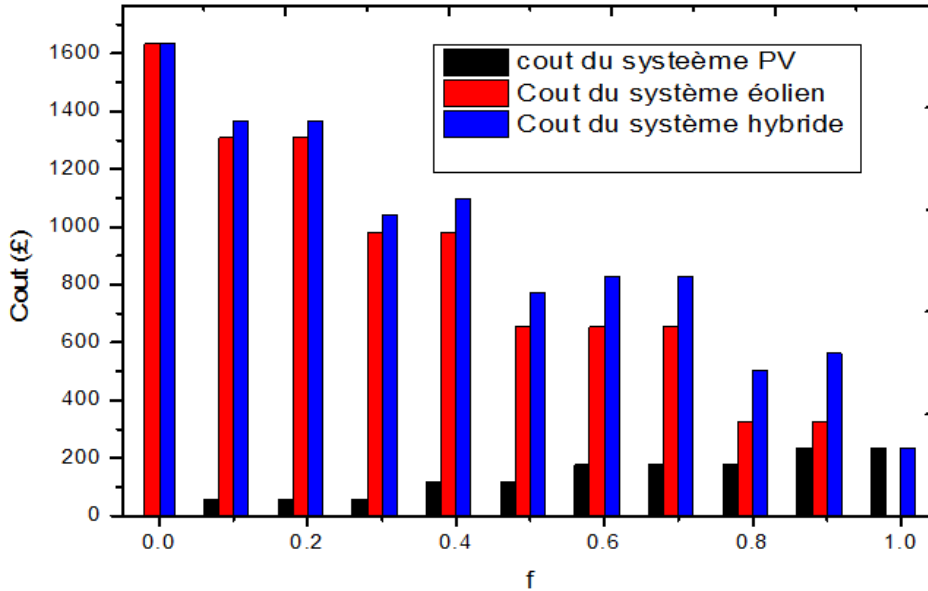


Figure III.8 : Coût du système hybride (PV-éolien).

Le **tableau (3)** représente les différentes combinaisons entre le système photovoltaïque et le système éolien :

Tableau 3: Méthode 2 - Dimensionnement selon le mois 'décembre' le plus défavorable.

F	Apv (m ²)	Modules PV (Nb)	Ael (m ²)	Générateur éolien (Nb)	Coût PV (£)	Coût éolien (£)	Coût total PV + éolien (£)
1	1.5	5	0	0	293.9	0	293.9
0.9	1.2	4	0.65	1	235.12	327	562.12
0.8	1.2	4	1.3	2	235.12	654	889.12
0.7	1.2	4	1.95	3	235.12	981	1216.12
0.6	0.9	3	2.6	4	176.34	1308	1484.34
0.5	0.9	3	2.6	4	176.34	1308	1484.34
0.4	0.9	3	3.25	5	176.34	1635	1811.34
0.3	0.6	2	3.9	6	117.56	1962	2079.56
0.2	0.3	1	4.55	7	58.78	2289	2347.78
0.1	0.3	1	5.2	8	58.78	2616	2674.78
0	0	0	5.85	9	0	2943	2943

Les figures III.9 et III. 10 présentent respectivement l'énergie produite par le système (PV-éolien) du mois le plus défavorable ainsi que son coût:

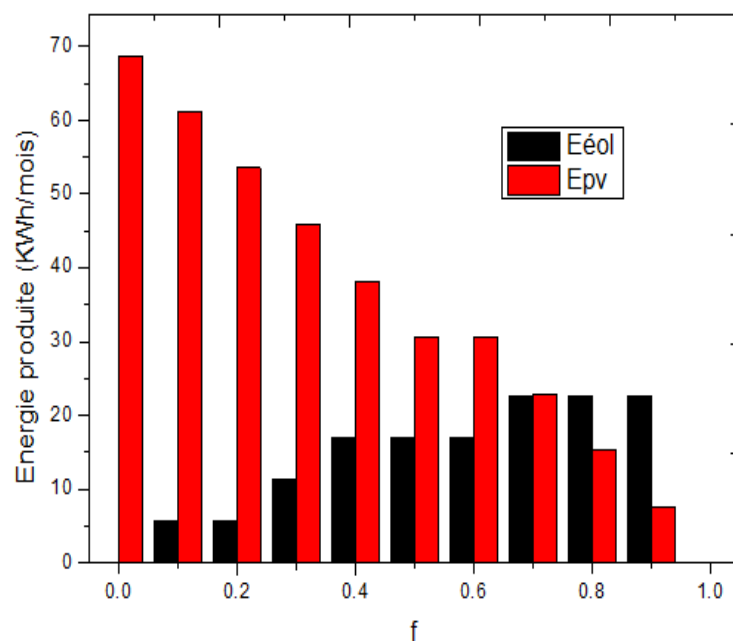


Figure III.9 : Energie produite par le système (PV-éolien) du mois le plus défavorable

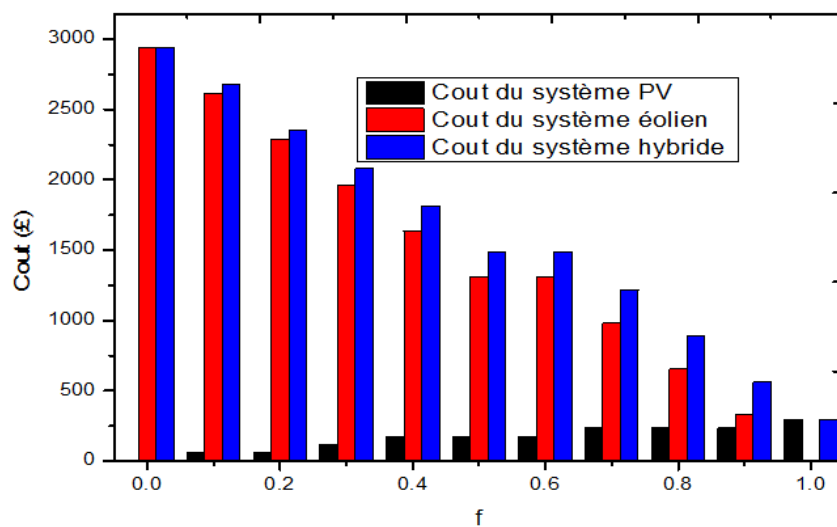


Figure III.10 : Coût du système pour le mois le plus défavorable.

L'organigramme des méthodes utilisé

Pour appliquer les deux méthodes, un programme de simulation est développé dont l'organigramme est donné par la figure (III.11).

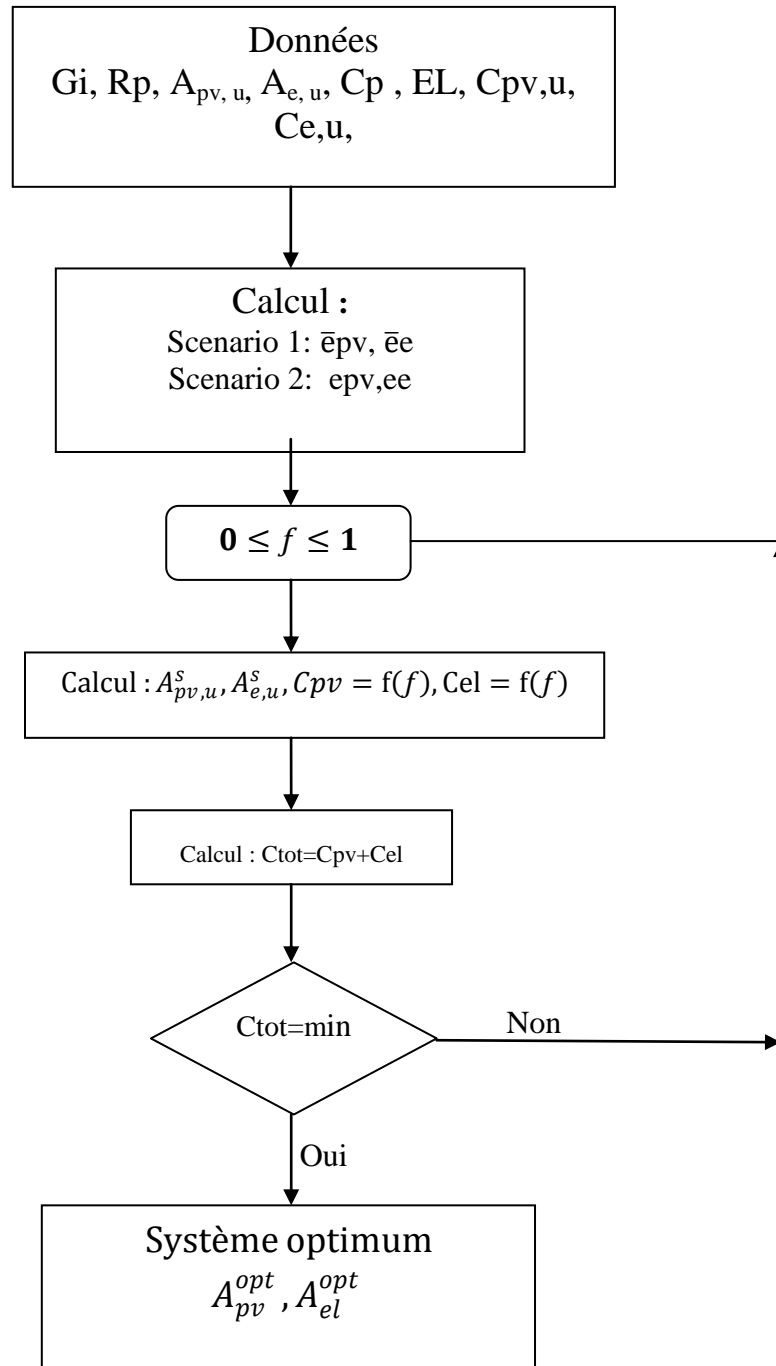


Figure III.11: Organigramme de simulation du système hybride

III.7.1 Procédure

Nous avons déterminé la configuration économique optimale de la composante renouvelable. La variation de la fraction f d'un pas de 0.1 ($0 \leq f \leq 1$) et pour chaque valeur de f la surface des composantes renouvelables est calculée, respectivement à partir des équations (14, 15) et (16, 17), en utilisant les deux méthodes. Puis, nous avons déterminé la surface retenue à partir de l'équation (18). En tenant compte des coûts des composantes renouvelables, nous avons déterminé le triplet optimal (f , A_{pv} , A_e).

III.7.2 Résultats et discussions

Les résultats obtenus de la simulation par la première méthode sont représentés dans le tableau 2 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.

Ces résultats montrent que la configuration avec système photovoltaïque seul ($f = 1$ avec 4 modules photovoltaïques ayant un coût de **235.12 £**) est celle la plus économique. Pour le système éolien pur, les résultats montrent que la charge est alimentée totalement avec un coût plus élevé (**1635 £**) avec 5 éoliennes. Quant au système hybride, le plus économique est celui qui présente $f = 0,5$ (deux modules photovoltaïques et deux générateurs éoliens) avec un coût de **771.56 £** (Tableau 2).

Pour la deuxième méthode, les résultats illustrés dans le tableau 3 montrent que le coût du système est relativement élevé et la configuration photovoltaïque seule présente aussi la Configuration optimale, mais avec 5 modules photovoltaïques avec un coût de **293.9 £**.

Pour le système éolien pur, les résultats montrent que la charge est alimentée totalement avec un coût plus élevé (**2943 £**) avec 9 éoliennes. Quant au système hybride, le plus économique est celui qui a le facteur $f = 0,9$, avec 4 Module photovoltaïque et un seul générateur éolien.

Un point important à retenir dans cette étude est que le générateur photovoltaïque présente une option favorable économiquement pour ce type de charge à Ouargla.

III.8. CONCLUSION

Pour le site de Ouargla et une charge particulière telle que définie dans cette étude, le système d'énergie Photovoltaïque seul a un impact économique plus favorable par rapport à système d'énergie éolien.

La méthodologie présentée pour le dimensionnement et l'optimisation du système hybride Utilisant les deux scénarios montre que la méthode du mois le plus défavorable donne un coût du système plus élevé par rapport à celle de la moyenne des valeurs mensuelles par an. Cela est dû à la fiabilité que présente le système déduit de la première méthode.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Les travaux présentés dans ce mémoire concernent, d'une façon générale, l'étude, la modélisation et la simulation de systèmes de production d'électricité autonome, à partir de ressources renouvelables mixtes (photovoltaïque et éolienne).

Pour le site de Ouargla et une charge fixe telle que définie dans cette étude, le système photovoltaïque seul a un impact économique plus favorable par rapport à celui éolien. La méthodologie présentée pour le dimensionnement et l'optimisation du système hybride utilisant les deux scénarios montre que la méthode du mois le plus défavorable donne un coût du système plus élevé par rapport à celle de la moyenne des valeurs mensuelles par an. Cela est dû à la fiabilité que présente le système déduit de la première méthode.

Les résultats obtenus de la simulation par la méthode des moyens mensuels montre que le système hybride, le plus économique est celui qui présente $f = 0,5$ (deux modules photovoltaïques et deux générateurs éoliens) avec un coût de 771.56 £

Par contre la méthode du mois le plus défavorable montre que le système hybride, le plus économique est celui qui présente $f = 0,9$ (4 Module photovoltaïque et un seul générateur éolien) avec un coût de 562.12 £.

*Références
bibliographiques*

Références bibliographiques

- [1] O.DERUELLE, Thèse de Doctorat en sciences, Université de Paris XI ; pp.9-12, 2002.
- [2] A.LABOURET, M.VILLOZ, « Energie solaire photovoltaïque », Edition Dunod, Paris, 2006.
- [3] C. ZIDANI, F. BENYAROU et B. BENYOUCEF, « Simulations de la position apparente du soleil et estimation des énergies solaires incidents sur un capteur plan photovoltaïque pour la ville de Tlemcen (Algérie) », Revue énergies renouvelables, Vol.6, pp.69-76, 2003.
- [4] F. LASNIER, T.G. ANGEL, « Photovoltaic Engineering Handbook », IOP Publishing Ltd. 1980. ISBN 0-85274-311-4.
- [5] F.Z.ZERHOUNI, « Adaptation Optimale d'une Charge à un Générateur Photovoltaïque », Mémoire de Magister, Institut d'Electronique, USTO, 1996.
- [6] B. FLECHE, D. DELAGNES, « Energie solaire photovoltaïque », STI ELT Approche générale, Juin 2007.
- [7] HASSINI née BELGHITRI HOUDA, «modelisation, simulation et optimisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque», université Abou-bakr belkaid de Tlemcen, 2010.
- [8] Energie éolienne, Théorie, conception et calcul pratique des installations, Désiré Le Gourières, Edition EYROLLES, 1980.
- [9] N. Laverdure, D. Roye, S. Bacha, R. Belhomme, "Technologie des systèmes éoliens – Intégration dans les réseaux électriques", la Revue 3EL, no. 39, 2004.
- [10] <http://oooxygene.alwaysdata.net/eolienne.html>.
- [11] Soltane Belakhal, 'Conception et Commande des machines à aimants permanents dédiés aux énergies renouvelables', thèse de doctorat, Constantine, 2010.
- [12] L.Khattache, 'Etude et commande d'un système éolien à base d'une machine électrique à double alimentée ', mémoire de magister, Batna, 2007.
- [13] Guidelines to Renewable Energies, Edition 2007.
- [14] 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.

- [15] B. BOURGESM, « Improvement in Solar Declinaison Computation », Solar Energy, Vol. 35, N°4, pp. 367 - 369, 1985.
- [16] 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, Maroc, 1998.
- [17] F. POITIERS, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne (machine asynchrone à cage autonome, machine asynchrone à double alimentation reliée aux réseaux) », Thèse de Doctorat, Université de Nantes, France, 2003.
- [18] V. ROGEZ, « Modélisation simplifiée de sources de production décentralisée pour des études de dynamique des réseaux. Application à l'intégration d'une production éolienne dans un réseaux de distribution insulaire », Thèse de Doctorat, Université d'Artois, France, 2004.
- [19] S. EL AIMANI, « modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans réseaux de moyenne tension », Thèse de Doctorat, Université Lille, France, 2004.
- [20] I. CRUZ, F. ARIAS, F. AVIA, L. M. ARRIBAS, R. P. FIFFE, « Assessment of different energy storage systems for wind energy integration », European Wind Energy Conference, 2001.
- [21] F. FAURE, « Suspension magnétique pour volant d'inertie », Thèse de Doctorat, INPG, France, 2003.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] l'Office National de la Météorologie 'O.N.M.' du site de Ouargla
- [25] H.G. Beyer and C. Langer, "A Method for the Identification of Configurations of PV/Wind Hybrid Systems for the Reliable Supply of Small Loads", Solar Energy, Vol. 57, pp. 381-391, 1996.

- [26] C. Protopopoulou, B.J. Brinkworth and R.H. Marshall, "*Sizing and Techno-Economical Optimization for Hybrid Solar Photovoltaic/Wind Power Systems with Battery Storage*", Int. J. Energy Res., Vol. 21, pp. 465-479, 1997.
- [27] 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, 1998.
- [28] Ministère de l'Energie et des Mines, "*L'Energie Eolienne au Maroc, Gisement - Dimensionnement*", C.D.E.R, Royaume du Maroc, 1986.
- [29] M.A. ElHadidy, 'Performance Evaluation of Hybrid (Wind/Solar/Diesel) Power Systems', Renewable Energy, Vol. 26, pp. 401 – 413, 2002.
- [30] C.T. Kiranoudis, N.G. Voros and Zb. Maroulis, '*Short Cut Design of Wind Farms*', Energy Policy, Vol. 29, pp. 567 – 578, 2001.
- [31] A.N. Celik, 'Optimisation and Techno-economic Analysis of Autonomous Photovoltaic-Wind Hybrid Energy Systems in Comparison to Single Photovoltaic and Wind Systems', Energy Conversion and Management, Vol. 43, pp. 2453 – 2468, 2002.

Annexes

Annexe A**I.2.3 Rayonnement solaire**

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du Rayonnement solaire disponible dans un site donné et au cours d'une période donnée. Son Évaluation peut se faire à partir des données de l'irradiation solaire globale. Pour effectuer le dimensionnement le plus exact possible, compte tenu des demandes en énergie à satisfaire, l'étude du gisement est le point de départ de toute investigation. Cette étude est très indispensable dans le domaine de l'énergie solaire afin de simuler le fonctionnement probable du système énergétique de s'assurer de son intérêt et de sa faisabilité.

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

$$E_{ph} = h/C\lambda \quad (I.1)$$

Dans laquelle :

λ : Longueur d'onde (m) ;

h : Constante de Planck ;

C : Vitesse de la lumière (m/s).

D'après l'équation (I.1), l'énergie transportée par un photon est inversement proportionnelle à sa longueur d'onde, c'-a-d 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 [7]. L'énergie totale transportée par le rayonnement solaire sur une distance soleil-terre est de l'ordre de $1350W/m^2$ (AM0) dans l'espace hors atmosphère terrestre (Voir Figure. I.3).

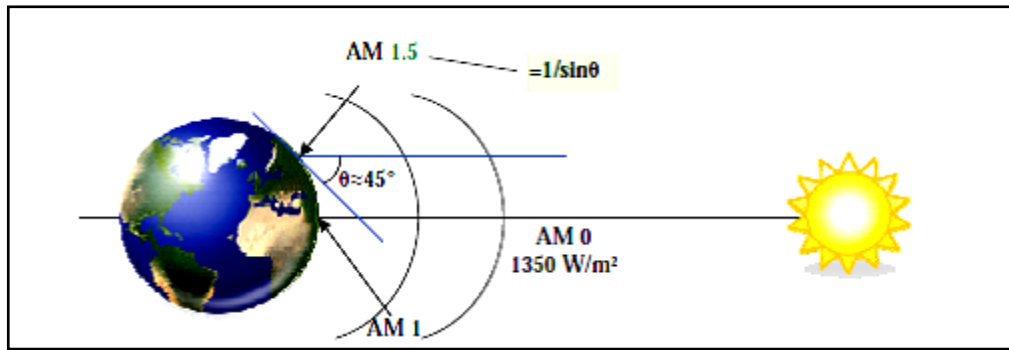


Figure. I.3 : Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM. [7]

I.2.4 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.2.4.1 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 [8].

❖ 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 [8].

I.2.4.2 Déclinaison δ

C'est l'angle formé par le vecteur Soleil Terre avec le plan équatorial. Elle est due à l'inclinaison de l'axe des pôles terrestre par rapport au plan écliptique, ce qui est traduit par les différentes saisons. Elle varie au cours de l'année entre $-23,45^\circ$ et $+23,45^\circ$. Elle est nulle aux équinoxes de printemps (21 mars) et d'automne (23 septembre), et maximale aux solstices d'été (22 juin) et d'hiver (22 décembre) [10].

La variation journalière de la déclinaison est d'environ de $0,5^\circ$. Elle est calculée par une équation simple approximative [4] :

$$\delta = 23,45 \cdot \sin(2\pi 284 + n) / 365 \quad (\text{I.2})$$

Ou par une série de Fourier [4] :

$$\delta = (0,006918 - 0,399912 \cos\beta + 0,070257 \sin\beta - 0,00678 \cos 2\beta + 0,000907 \sin 2\beta - 0,002697 \cos 3\beta + 0,00148 \sin 3\beta) 180^\circ / \pi \quad (\text{I.3})$$

1.2.4.3 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:

$$H = 15 \cdot (TSV - 12) \quad (\text{I.4})$$

Avec :

- $T = TL - DE + ((Et + 4\lambda) / 60)$
- $Et = 9,87 \cdot \sin 2N - 7,35 \cos N - 1,5 \sin N$
- $N = 360 / 365 \cdot (N - 81)$
- $D = +1$ pour l'Algérie.

DE : Décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich ;

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

TL : Temps légal = temps donné par une montre ;

Et : Correction de l'équation du temps ;

λ : Longitude du lieu.

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

On prend:

* $H > 0$ après midi.

* $H < 0$ le matin.

* $H = 0$ midi TSV.

I.2.4.4 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.

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

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 :

$$ET = 0,258 \cos x - 7,416 \sin x - 3,648 \cos 2x - 9,228 \sin 2x \quad (I.6)$$

Avec :

$$x = 360(N-1)/365.25 \quad (I.7)$$

Où l'angle x est défini en fonction du numéro du jour .

Le décompte commence à partir du 1er janvier où $N=1$.

I.2.4.5 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 :

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

Avec:

δ : Déclinaison du soleil ;

H : L'angle horaire du soleil ;

ϕ : Latitude du lieu .

Cette équation peut être écrite sous la forme suivante:

$$\sin h = \cos \delta \cos \phi (\cos H + \tan \delta \tan \phi) \quad (I.9)$$

On pose:

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

Alors l'équation (I.8) devient comme suit:

$$\sin h = \cos \delta \cos \phi (\cos H - T) \quad (\text{I.10})$$

Le cas des deux points « pôles » étant écartés, la résolution de $\sin h = 0$ est équivalente à la résolution de $\cos H = T$.

$$\cos H = T \Rightarrow \cos H = -\operatorname{tg} \delta \operatorname{tg} \phi = T$$

Si $|T| > 1 \Leftrightarrow |\phi| + |\delta| > 90^\circ$

($\sin h$) ne peut pas être nul. Quel que soit H . On ne peut pas parler de lever ou de coucher du soleil dans ce cas. Si T est négatif : $T < -1 \Leftrightarrow |\phi + \delta| > 90^\circ$

$$\Leftrightarrow \sin h > 0$$

$$\Leftrightarrow h > 0.$$

Le soleil est toute la journée au-dessus de l'horizon: "Jour polaire"

Si T est positif:

$$T > -1 \Leftrightarrow |\phi + \delta| < 90^\circ$$

$$\Leftrightarrow \sin h < 0$$

$$\Leftrightarrow h > 0.$$

Le soleil est toute la journée au-dessous de l'horizon: « Nuit polaire »

$$\text{Si } |T| \leq 1 \Leftrightarrow |\phi| + |\delta| \leq 90^\circ$$

L'équation $\sin h = 0$ deux racines, un pour le lever et l'autre pour le coucher.

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

$$H_c = \arccos(-\operatorname{tg} \delta \operatorname{tg} \phi)$$

$$H_L = -H_c$$

$$D_j = (H_c - H_L) = 2/15. \arccos T \quad (\text{I.11})$$

Avec:

$$T = (-\operatorname{tg} \delta \operatorname{tg} \phi)$$

I.2.4.6 Durée d'insolation *DIS* d'un capteur (α ,)

La durée d'insolation (*DIS*) 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.

$$\cos(i) = A \cdot \sin(H) + B \cdot \cos(H) + C \quad (\text{I.12})$$

Avec :

$$A = A' \cos(\delta) \quad A' = \sin(\alpha) \cos(\gamma)$$

$$B = B' \cos(\delta) \quad B' = \cos(\alpha) \cos(\gamma) \sin(\phi) + \sin(\gamma) \cos(\phi)$$

$$C = C' \sin(\delta) \quad C' = -\cos(\alpha) \cos(\gamma) \cos(\phi) + \sin(\gamma) \sin(\phi)$$

Le lever HL , et le coucher Hc , du soleil sur un capteur sont définis pour :

$$i = \pm 90^\circ \Rightarrow \cos(i) = 0$$

$$\Rightarrow A \sin(H) + B \cos(H) + C = 0$$

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

$$HL' = \rho(\alpha) \arccos(B'/D') - \arccos((-C')/D' \operatorname{tg}(\delta))$$

$$Hc' = \rho(\alpha) \arccos(B'/D') + \arccos((-C')/D' \operatorname{tg}(\delta))$$

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

$$\rho(\alpha) = \operatorname{Sgn} \alpha$$

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

$$DIS = (H2 - H1) / 15 \quad (\text{I.13})$$

Avec :

$$H1 = HL' \text{ Si } |HL'| \leq |HL|$$

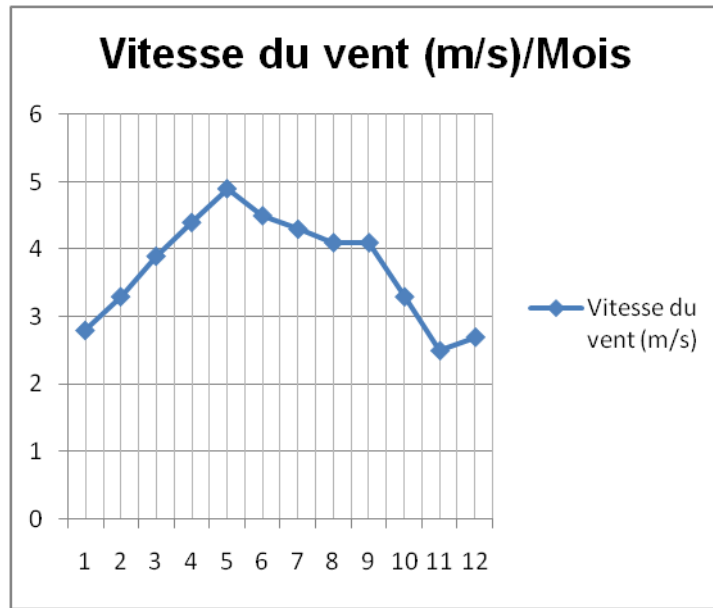
$$H1 = HL' \text{ Si } |HL'| \geq |HL|$$

$$H2 = Hc' \text{ Si } |Hc'| \leq |Hc|$$

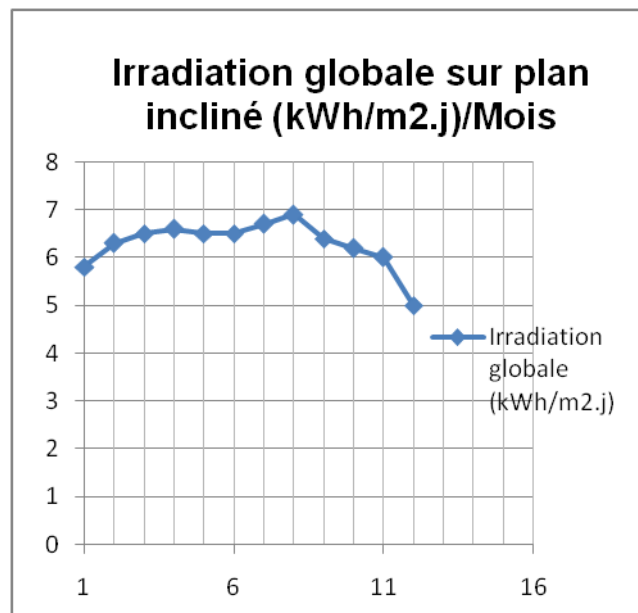
$$H2 = Hc' \text{ Si } |Hc'| \geq |Hc|$$

Annexe B**Tableau 1 :** Caractéristique géographique et la Vitesse moyenne mensuelle du vent du site d'Ouargla

Mois	Vitesse du vent (m/s)
1	2.8
2	3.3
3	3.9
4	4.4
5	4.9
6	4.5
7	4.3
8	4.1
9	4.1
10	3.3
11	2.5
12	2.7

**Fig. 1:** vitesse moyenne mensuelle du vent du site d'Ouargla.**Tableau 2:** Irradiation globale moyenne mensuelle du site d'Ouargla.

Mois	Irradiation globale (kWh/m ² .j)
1	5.8
2	6.3
3	6.5
4	6.6
5	6.5
6	6.5
7	6.7
8	6.9
9	6.4
10	6.2
11	6
12	5

**Fig. 2:** Irradiation globale moyenne mensuelle du site d'Ouargla.