

MS/531.6-15/04



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE ABOU-BAKR BELKAID DE TLEMCEM

FACULTE DES SCIENCES

Département de Physique

Inscrit Sous le N°
Date le	03 JUN 2012
Code	7537

Unité de recherche Matériaux et Energies Renouvelables

Mémoire de master

Spécialité : Physique Energétiques et Matériaux

THEME

Inscrit Sous le N°
Date le	13 JAN 2015
Code	563

Modélisation et Optimisation d'un système hybride photovoltaïque-éolien de puissance moyenne en vue d'alimenter une petite communauté

Présentée par : CHADEL Asma



Soutenue le 24 juin 2012 devant la commission d'examen

- Président :** Mr. N. BIBI TRIKI Professeur (U .A.B.Tlemcen)
- Examineurs :** Mme. N. GHELLAI Professeur (U .A.B.Tlemcen)
- Mr. A. KHERROUS Maitre de conférences A (U .A.B.Tlemcen)
- Encadreur :** Mr. A. CHERMITI Maitre de conférences A (U .A.B.Tlemcen)



Table des matières

<i>Introduction générale</i>	2
<i>Chapitre introductif : Energie renouvelable</i>	
I. Introduction.....	6
II. les énergies renouvelables, c'est quoi ?	6
III. Les cinq familles d'énergie renouvelable	6
III.1 L'énergie solaire	6
III.2 L'énergie éolienne	8
III.3 L'énergie hydraulique	8
III.4 L'énergie géothermique	9
III.5 L'énergie issue de la biomasse.....	9
IV. Les énergies renouvelables en Algérie	10
<i>Référence bibliographique</i>	12
<i>Chapitre I: Généralité sur les systèmes éoliens et photovoltaïques</i>	
I. Introduction.....	14
II. Généralité sur les systèmes éoliens	14
II.1 Historique [1]	15
II.2 Définition de l'énergie éolienne.....	16
II.3 Les différents types d'éoliennes	16
3.1 Les éoliennes à axe horizontal	16
3.2 Les éoliennes à axe vertical.....	18
II.4 Principe de fonctionnement	19
4.1 Éléments constitutifs d'un aérogénérateur (à axe horizontal) [1].	19
4.2 Bilan des forces sur une pale.....	21
II.5 Puissance fournie par un aérogénérateur.....	23



5.1	Energie disponible dans le vent [2].....	23
5.2	Loi de Betz.....	23
II.6	Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne	27
II.7	Critère de choix d'un potentiel éolien	29
7.1	Le vent	29
7.2	Gisement éolien en Algérie	30
7.3	La loi de distribution de weibull	31
7.4	Influence de la hauteur sur l'énergie éolienne	32
7.5	La puissance moyenne annuelle fournit par un aérogénérateur .	32
II.8	Avantages et inconvénients	33
III.	Généralité sur les systèmes photovoltaïque.....	33
III.1	La cellule Photovoltaïque: Historique [13].....	35
III.2	Principe de fonctionnement.....	36
III.3	Matériaux photovoltaïques	37
III.4	LE MODULE PHOTOVOLTAIQUE	39
4.1	Caractéristiques d'un module [17].....	39
III.6	Le panneau photovoltaïque [16].....	40
III.7	Avantages et inconvénients d'une installation PV	41
	<i>Référence Bibliographique</i>	42
	<i>Chapitre II: Modélisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque</i>	
I.	Modélisation d'un système hybride PV/éolien	45
II.	La modélisation du champ photovoltaïque	46
II.1	Modélisation d'une cellule solaire.....	46
II.2	Les caractéristiques I-V d'une cellule solaire	47
2.1	Le courant de court-circuit I_{cc}	48



2.2	La tension de circuit ouvert V_{co}	49
2.3	Le facteur de forme FF	49
2.4	Le rendement	49
II.3	Facteur limitant le rendement	50
3.1	Influence de l'ensoleillement et la température	50
3.2	Influence de la résistance série et la résistance parallèle	52
II.4	Groupement des cellules solaires	53
4.1	Module photovoltaïque	53
4.2	Panneau photovoltaïque	55
II.5	Modélisation du générateur PV	55
II.6	Potentiel solaire	56
III.	La modélisation d'une turbine éolienne	57
III.1	Modélisation de la distribution des vitesses du vent	57
III.2	La puissance moyenne annuelle fournit par aérogénérateur	62
IV.	Modélisation de la batterie	64
V.	Modélisation de l'onduleur	66
V.1	La puissance nominale	66
V.2	Le rendement	67
VI.	Conclusion	68
	<i>Référence bibliographique</i>	69

Chapitre III: Optimisation et dimensionnement de système hybride

PV/éolien

I.	Introduction	72
II.	Méthode de dimensionnement du système	72
II.1	Méthode des moyennes mensuelles annuelles	74



II.2	Méthode du mois le plus défavorable.....	74
II.3	Surfaces retenues des composants.....	74
II.4	Facteur d'autonomie	75
II.5	Taille de la batterie.....	75
II.4	Analyse économique du système.....	76
III.	Application dans un système hybride éolien/PV	76
III.1	Méthodologie adoptée	76
III.2	Besoins électriques journaliers de la charge	77
IV.	Résultats et discussion	78
IV.1	Méthode 1 : les moyennes mensuelles annuelles	79
IV.2	Méthode du mois le plus défavorable	80
V.	Conclusion	83
	<i>Référence bibliographique</i>	84
	Conclusion générale	86
	<i>Annexe 1</i>	89
	<i>Annexe 2</i>	90
	<i>Annexe 3</i>	91



Nomenclature

Symbole	Désignation	Unité
\vec{dr}	Largeur de la pale	m
l	La longueur de corde	m
L	La force de portance	N
D	La force de traînée	N
F_a	La poussée de rotation	N
F_t	La poussée axiale	N
\vec{dF}	Résultante des forces	N
dA	Surface du tronçon de pale	m ²
C_L	Coefficient de portance	--
C_D	Coefficient de traînée	--
C_z	Coefficient de portance suivant le plan de rotation	--
C_x	Coefficient de poussée	--
w	Module du vent apparent	
E_c	Energie cinétique	
m	Masse d'air	Kg
V	La vitesse du vent	m/s
ρ	La densité d'air	Kg/m ³
A	La surface	m ²
$P_{réc}$	Puissance récupérable	Watt
C_p	Coefficient de puissance	--
Ω	Vitesse angulaire du rotor de l'éolienne	rad/s
R	Rayon d'extrémité de la pale	m
V_d	La vitesse de démarrage	ms ⁻¹
V_n	La vitesse nominale	ms ⁻¹
V_m	La vitesse d'arrêt de la machine	ms ⁻¹



C	Paramètre d'échelle	ms ⁻¹
K	Paramètre de forme	--
\bar{V}	La vitesse moyenne du vent	ms ⁻¹
$\Gamma(x)$	La fonction Gamma	--
Z ₁	Hauteur de référence égale à 10 m au dessus de sol	m
Z ₂	Hauteur désirée au dessus de sol	m
Z ₀	Paramètre de rugosité du sol égale 0.01 m	m
P (V)	Fonction de puissance de l'aérogénérateur	Watt
f (V)	Fonction de distribution de la vitesse du vent	--
E _g	Energie de gap	--
ZCE	Zone de charge d'espace	--
V _{co}	Tension à vide	V
I _{cc}	Courant de court circuit	A
V _m	Tension au point de fonctionnement	V
I _m	Courant au point de fonctionnement	A
P _m	La puissance optimal	Watt
I _{ph}	Photo courant	A
I _D	Courant générer par la diode	A
I _{Rp}	Courant traversant R _p	A
R _p	Résistance parallèle de la cellule	Ω
V	Tension de la cellule	V
R _s	Résistance série de la cellule	Ω
I ₀	Courant de saturation	A
A	Facteur d'idéalité de la cellule	--
FF	Facteur de forme	--
η	Rendement énergétique	%
S	Surface de la cellule solaire	m ²
P _{in}	Flux incident	W/m ²

R_{Se}	Résistance série du module	Ω
R_{Pe}	Résistance parallèle du module	Ω
A_P	Nombre de module constituant le champ photovoltaïque.	
A_c	La surface totale de captation du générateur photovoltaïque	m^2
η_{gen}	Le rendement du générateur photovoltaïque	%
E_S	Irradiation solaire globale du lieu considéré	W/m^2
p	La puissance produite par un aérogénérateur	Watt
$C_{Bat(t)}$	La quantité de la charge de la batterie au temps (t)	Ah
$C_{Bat(t-1)}$	La quantité de la décharge de la batterie au temps (t)	Ah
η_{Bat}	Le rendement de la batterie	%
$C_{Bat\ max}$	La capacité de la batterie maximale	Ah
$C_{Bat\ min}$	La capacité de la batterie minimum	Ah
DOD	La profondeur de la charge	--
SOC	La valeur maximale de l'état de charge	--
VF	La force électromotrice	V
b	Une tension empirique	V
P_n	Puissance nominale de l'onduleur	Watt
P_{charge}	Puissance à la sortie de l'onduleur	Watt
η_{ond}	Le rendement de l'onduleur	%
A_{PV}	La surface du module photovoltaïque	m^2
A_{PV}	La surface de générateur éolien	m^2
R	Facteur d'autonomie	--
E_{pv}	Energie produite par le générateur PV	KWh/m^2
E_{el}	Energie produite par l'aérogénérateur	KWh/m^2
EL	Energie demandée par la charge à une heure t	Ah
C	Coût global du système hybride	DA
C_{pv}	Coût du système photovoltaïque	DA
C_{el}	Coût du générateur éolien	DA

Listes des figures

<i>Figure 1: Panneau solaire</i>	<i>7</i>
<i>Figure 2: L'éolienne</i>	<i>8</i>
<i>Figure 3: Energie géothermique.....</i>	<i>9</i>
<i>Figure 4: répartition des ressources renouvelable sur la production mondiale d'électricité en 2010 [** Source : ObservER, La production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde,]</i>	<i>10</i>
<i>Figure I. 1: Conversion de l'énergie cinétique du vent.....</i>	<i>16</i>
<i>Figure I. 2: hélice au vent, hélice sous le vent [5]</i>	<i>17</i>
<i>Figure I. 3: Technologies d'éoliennes.....</i>	<i>19</i>
<i>Figure I. 4: les composantes de l'aérogénérateur</i>	<i>20</i>
<i>Figure I. 5: Forces appliquées sur un élément de pale [6].....</i>	<i>22</i>
<i>Figure I. 6: L'écoulement axial de l'air</i>	<i>24</i>
<i>Figure I. 7 : Coefficient de puissance.....</i>	<i>25</i>
<i>Figure I. 8: coefficient de puissance en fonction de la vitesse normalisée λ pour différents types de turbines.....</i>	<i>26</i>
<i>Figure I. 9: Diagramme de la puissance sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent.....</i>	<i>28</i>
<i>Figure I. 10: Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 10 m du sol.....</i>	<i>31</i>
<i>Figure I. 11: Carte préliminaire des irradiations solaire de l'Algérie. [10]....</i>	<i>34</i>
<i>Figure I. 12: a) Structure de diode à jonction pn, b) diagramme de bande d'une jonction pn.....</i>	<i>36</i>
<i>Figure I. 13: Utilisation des Matériaux photovoltaïques (2003) [15].....</i>	<i>39</i>
<i>Figure I. 14: Cellule, module et panneau photovoltaïque</i>	<i>40</i>
<i>Figure II. 1: système hybride éolien –photovoltaïque.....</i>	<i>45</i>
<i>Figure II. 2: schéma électrique équivalent d'une cellule PV.....</i>	<i>46</i>
<i>Figure II. 3: la caractéristique d'une cellule solaire</i>	<i>48</i>
<i>Figure II. 4: influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $I=f(V)$</i>	<i>51</i>
<i>Figure II. 5: influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$</i>	<i>51</i>
<i>Figure II. 6: influence de R_S sur la caractéristique $I=f(V)$</i>	<i>52</i>
<i>Figure II. 7: influence de R_P sur la caractéristique $I=f(V)$</i>	<i>53</i>
<i>Figure II. 8: influence du flux sur la caractéristique $I= f(V)$ d'un module KD140GH-2PU.....</i>	<i>54</i>



<i>Figure II. 9: influence de la température sur la caractéristique $I = f(V)$ d'un module KD140GH-2PU</i>	<i>55</i>
<i>Figure II. 10: Représentation de l'irradiation moyenne</i>	<i>57</i>
<i>Figure II. 11: Représentation des vitesses moyennes mensuelles</i>	<i>58</i>
<i>Figure II. 12: Distributions de Weibull site de Tlemcen</i>	<i>59</i>
<i>Figure II. 13: Variation du paramètre k avec la hauteur</i>	<i>60</i>
<i>Figure II. 14: Variation du paramètre C avec la hauteur.....</i>	<i>60</i>
<i>Figure II. 15 : Variation de la puissance fournit par l'aérogénérateur en fonction de la vitesse de vent.....</i>	<i>63</i>
<i>Figure II. 16: Schéma électrique équivalent de nb élément de batterie en série</i>	<i>65</i>
<i>Figure II. 17: Variation de tension en mode de charge en fonction de l'état de charge.</i>	<i>66</i>
<i>Figure II. 18: Rendement de l'onduleur</i>	<i>67</i>
<i>Figure III. 1 : Surfaces des panneaux PV et de l'éolienne pour la première méthode.....</i>	<i>79</i>
<i>Figure III. 2: Coûts des panneaux PV et de l'éolienne pour la première méthode.....</i>	<i>80</i>
<i>Figure III. 3: Surfaces des panneaux PV et de l'éolienne pour la deuxième méthode.....</i>	<i>81</i>
<i>Figure III. 4: Coûts des panneaux PV et de l'éolienne et le cout total su système pour la deuxième méthode</i>	<i>81</i>



Liste des tableaux

<i>Tableau II. 1 : caractéristiques du générateur PV [13].....</i>	<i>54</i>
<i>Tableau II. 2: Irradiation solaire moyenne mensuelle</i>	<i>57</i>
<i>Tableau II. 3 : caractéristiques techniques d'IMEX-Blade 1300</i>	<i>59</i>
<i>Tableau II. 4: Caractéristiques du site de Tlemcen</i>	<i>61</i>
<i>Tableau II. 5: les paramètres de la batterie de plomb acier</i>	<i>65</i>
<i>Tableau III. 1 : Energies spécifiques mensuelles produites par les générateurs Photovoltaïque et éolien pour le site de Tlemcen et tailles nécessaires des deux générateurs</i>	<i>78</i>
<i>Tableau III. 2: Triplets optimaux déterminés du système hybride PV-éolien pour les deux méthodes</i>	<i>82</i>
<i>Tableau III. 3: Avantage et inconvénient de deux méthodes étudiées</i>	<i>83</i>



Introduction générale



Introduction générale

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures.

Le soleil, le vent, les chutes d'eau et la biomasse sont autant de ressources naturelles utilisables pour générer de l'énergie électrique, grâce à différentes technologies que l'on peut regrouper par filières économiques en fonction de la ressource considérée. Disponibles en quantité supérieure aux besoins énergétiques actuels de l'humanité, les ressources d'énergie renouvelable n'augmentent pas la quantité de gaz à effet de serre de l'atmosphère lors de leur exploitation. Elles représentent par ailleurs une chance pour plus de deux milliards de personnes, habitant des régions isolées, d'accéder à l'électricité. Pour la plus part située dans les pays du tiers monde dont l'Algérie, ou plus de 50% vivent encore sans électricité, 95% d'entre eux vivent dans la partie sud algérienne du fait des plus faibles revenus, de la présence des régions rudes et d'une faible densité de population.

La situation géographique de l'Algérie favorise le développement et l'épanouissement de l'utilisation de l'énergie solaire. En effet vu l'importance de l'intensité du rayonnement reçu ainsi la durée de l'ensoleillement qui

dépasse les dix heures par jour pendant plusieurs mois, notre pays couvre certains de ses besoins en énergie solaire.

La production d'électricité au moyen d'un système hybride combinant plusieurs sources d'énergies renouvelables est d'un grand intérêt pour les pays en développement, comme l'Algérie. L'Algérie possède de nombreuses régions isolées et éloignées des réseaux classiques de distribution d'électricité. Ainsi, l'extension de ces réseaux serait d'un coût financier exorbitant. Pour résoudre ce problème, l'exploitation du potentiel en énergies renouvelables dont dispose ce pays doit être une priorité.

Le rôle d'un système hybride (éolien – photovoltaïque) de production d'électricité sans interruption dans les régions isolées n'est pas seulement d'apporter « une puissance énergétique », mais un outil de développement social et économique des zones rurales. Le nombre de kilowattheures produit peut paraître insignifiant devant la capacité de production énergétique du pays, mais ces quelques dizaines ou centaines de kilowattheures peuvent ranimer tout l'espoir d'un village ou d'une communauté. Le générateur d'électricité d'origine hybride éolien – photovoltaïque avec un système de stockage est 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'intérêt de ce travail est de dimensionner et optimiser un système hybride photovoltaïque-éolien, en introduisant deux méthodes qui se basent sur les moyennes mensuelles annuelles et les moyennes du mois le plus défavorable de l'année.

A cet effet, nous avons fait dans notre étude :

En chapitre introductif, on définit les différents types d'énergies renouvelables et présentons leur intérêt.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Au premier chapitre, on fait une description générale, et le principe de fonctionnement de système éolien et photovoltaïque.

Le second chapitre présente la modélisation de chaque élément constituant le système hybride photovoltaïque - éolien (champ photovoltaïque, l'aérogénérateur, batterie, onduleur).

Le troisième chapitre est consacré à la simulation et optimisation de système hybride photovoltaïque-éolien pour le site de Tlemcen.

Finalement, nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale qui résume notre étude dans sa partie théorique et simulation des résultats.

Chapitre 0 :
Energie renouvelable



I. INTRODUCTION

L'épuisement des ressources fossiles, à plus ou moins long terme, et la flambée des cours du brut, la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre rendent urgentes la maîtrise des consommations et la diversification des sources d'énergie : l'utilisation et le développement des énergies renouvelables.

Dans ce chapitre d'introduction, nous définissons les différents types d'énergies renouvelables et présentons leur intérêt.

II. LES ENERGIES RENOUVENABLES, C'EST QUOI ?

Une énergie renouvelable est une énergie exploitable par l'Homme, sans que ses réserves ne s'épuisent car elles se renouvellent constamment de façon naturelle. En d'autres termes, sa vitesse de formation est beaucoup plus grande que sa vitesse d'utilisation.

Le Soleil est à l'origine de nombreuses énergies renouvelables. Son rayonnement constitue en lui-même une énergie exploitable. Ce rayonnement donne aussi naissance à d'autres formes d'énergie, ainsi le cycle de l'eau permet de créer de l'hydroélectricité, le vent est aussi exploité. La photosynthèse a aussi comme origine le soleil, elle crée différents matériaux exploitables énergétiquement, mais pas toujours renouvelables. La chaleur interne de la Terre est source d'énergie considérée comme renouvelable, la géothermie. La rotation des astres, système Terre-Lune, engendre des mouvements d'eau à la surface de la Terre, mouvements exploitables énergétiquement via l'énergie marémotrice.

III. LES CINQ FAMILLES D'ENERGIE RENOUVELABLE

III.1 L'énergie solaire

Le soleil est la principale source des différentes formes d'énergies renouvelables disponibles sur terre.

L'énergie solaire a directement pour origine l'activité du Soleil. Le Soleil émet un rayonnement électromagnétique dans lequel on trouve notamment les rayons cosmiques, gamma, X, la lumière visible, l'infrarouge, les micro-ondes et les ondes radios en fonction de la fréquence d'émission. Tous ces types de rayonnement électromagnétique émettent de l'énergie.

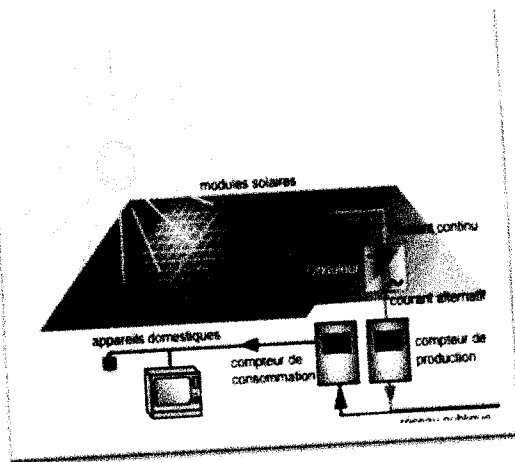


Figure 1: Panneau solaire

Un panneau solaire est un dispositif destiné à récupérer une partie de l'énergie du rayonnement solaire pour la convertir en une forme d'énergie utilisable par l'homme.

On distingue deux types de panneaux solaires : les panneaux solaires thermiques, appelés *capteurs solaires thermiques* ou simplement capteurs solaires, qui convertissent la lumière en chaleur récupérée et utilisée sous forme d'eau chaude ; les panneaux solaires photovoltaïques, appelés modules *photovoltaïques* ou simplement *panneaux solaires*, qui convertissent la lumière en électricité. [1]

Les panneaux solaires thermiques sont actuellement plus rentables économiquement que les modules photovoltaïques grâce à un prix beaucoup moins élevé et un rendement élevé avoisinant les 80 %, même si l'énergie qu'ils permettent de récupérer est obtenue sous une forme de moindre valeur (eau chaude à température sanitaire au lieu d'électricité) [3].

III.2 L'énergie éolienne

L'éolienne est un dispositif qui, en utilisant la force du vent, permet de produire de l'énergie. L'énergie du vent n'est pas une nouveauté. Elle a déjà été utilisée pour propulser les bateaux à voile, faire tourner les ailes des moulins pour moudre du blé ou pomper de l'eau et finalement, de nos jours, pour produire de l'électricité.

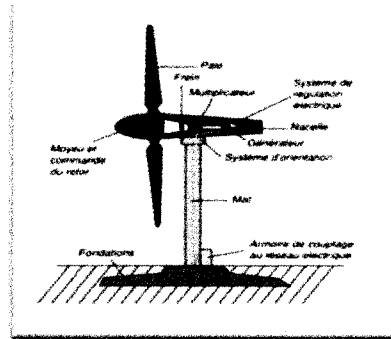


Figure 2: L'éolienne

III.3 L'énergie hydraulique

À l'instar de l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique tire son origine des phénomènes météorologiques et donc du Soleil. Ces phénomènes prélèvent de l'eau principalement dans les océans et en libèrent une partie sur les continents à des altitudes variables. On parle du cycle de l'eau pour décrire ces mouvements. De l'eau en altitude possède une énergie potentielle de pesanteur. Cette énergie peut être alors captée et transformée, lors des mouvements de l'eau qui retourne vers les océans.

L'énergie hydraulique peut être directement utilisée sous forme d'énergie mécanique, l'eau d'un ruisseau faisant tourner la roue d'un moulin à eau. Elle peut également être convertie en énergie hydroélectrique pour la production d'électricité, que cela soit via une centrale hydroélectrique ou marémotrice [3].

L'énergie hydroélectrique est une énergie électrique obtenue par conversion de l'énergie hydraulique des différents flux d'eau (fleuves, rivières, chutes d'eau, courants marins ...).

L'énergie marémotrice est issue des mouvements de l'eau créée par les marées, causées par l'effet conjugué des forces de gravitation de la Lune et du Soleil et récupérées en mer par des turbines marémotrices.

III.4 L'énergie géothermique

Le principe consiste à extraire l'énergie géothermique contenue dans le sol pour l'utiliser sous forme de chauffage ou pour la transformer en électricité. Dans les couches profondes, la chaleur de la Terre est produite par la radioactivité naturelle des roches qui constituent la croûte terrestre : c'est l'énergie nucléaire produite par la désintégration de l'uranium, du thorium et du potassium.

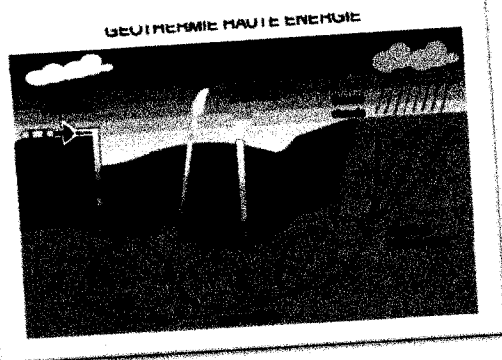


Figure 3: Energie géothermique

Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie profonde ne dépend pas des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent).

III.5 L'énergie issue de la biomasse

La biomasse, ensemble de la matière vivante, concerne les produits organiques végétaux et animaux utilisés pour l'énergie ou l'agriculture. Nous connaissons déjà le simple bois de feu en tant que plus ancienne source d'énergie. Les déchets ligneux sont aussi de la famille des bois et font partie de la « biomasse sèche ». D'un autre côté nous avons la « biomasse humide », déchets organiques agricoles, agro-alimentaire ou urbaine. Le tout peut être transformé en énergie ou engrais. La biomasse est la première énergie renouvelable en France [3].

Aujourd'hui, les énergies renouvelables représentent 13,5 % de la consommation totale d'énergie comptabilisée dans le monde et 18 % de la production mondiale d'électricité. La biomasse et les déchets assurent l'essentiel de cette production (7 %). La production électrique renouvelable provient principalement de l'hydraulique (83 %), le reste est encore très marginal.

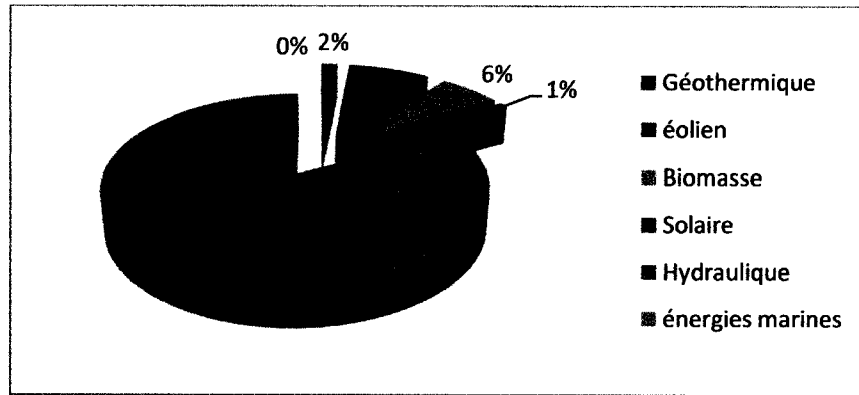


Figure 4: répartition des ressources renouvelables sur la production mondiale d'électricité en 2010 [** Source : ObservER, La production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde,]

IV. LES ENERGIES RENOUVELABLES EN ALGERIE

Dans notre pays, les énergies renouvelables n'ont pas connu le développement que permet leur disponibilité, et qu'impose leur importance pour le développement économique et social.

✦ L'énergie solaire:

L'une des préoccupations actuelles en Algérie est la revalorisation des terres agricoles dans les zones arides et semi-arides afin de parvenir à une autosuffisance alimentaire, freinant ainsi l'exode rural vers le nord et de fixer les populations.

Le gisement solaire exceptionnel qui couvre une superficie de 2.381.745Km², avec plus de 3000 heures d'ensoleillement par an. [2]

✦ L'énergie géothermique

Plus de deux cents (200) sources chaudes ont été inventoriées dans la partie Nord du Pays. Un tiers environ 33% d'entre elles ont des températures supérieures à 45°C. Il existe des sources à hautes températures pouvant atteindre 118°C à Biskra. [2]

✚ L'énergie hydraulique

Schématiquement, les ressources en eau de surface décroissent du nord au sud. On évalue actuellement les ressources utiles et renouvelables de l'ordre de 25 milliards de m³, dont environ 2/3 pour les ressources en surfaces. 103 sites de barrages ont été recensés. Plus de 50 barrages sont actuellement en exploitation. [2]

✚ Le potentiel de la biomasse

Potentiel des forêts : le potentiel actuel est évalué à environ 37 Millions de Tonnes équivalent pétrole MTEP. Le taux de récupération actuel est de l'ordre de 10%. [1]

Potentiel énergétique des déchets urbains et agricoles : 5 millions de tonnes de déchets urbains et agricoles ne sont pas recyclés. Ce potentiel représente un gisement de l'ordre de 1,33 millions de Tep/an. [1]

✚ Energie éolienne

En Algérie, la ressource éolienne varie beaucoup d'un endroit à un autre. Ceci est principalement dû à une topographie et un climat très diversifiés. La détermination du potentiel éolien en Algérie est primordiale et constitue un préalable nécessaire à toute étude de faisabilité d'installation d'éoliennes.

Référence bibliographique

[1] : DERGAL MALIKA « Pompage de l'eau à l'aide de l'énergie éolienne au service des zones rurales » thèse de Magistère université Abou-Bakr Belkaid de Tlemcen, 2008

[2] : SEMROUNI GHANIA « Les Energies Renouvelables, Les filières développées en Algérie » Séminaire sur les énergies renouvelables en Algérie Berlin, 11 juillet 2007

[3] : VIRGINIE PEETERS « Les énergies renouvelables », Février 2010

[4] : www.institut-solaire.com

chapitre I :

Généralité sur le système éolien photovoltaïque

I. INTRODUCTION

Pour un développement durable, le recours à l'utilisation des systèmes énergétiques à sources d'énergies renouvelables est devenu indispensable. Connaissant les problèmes rencontrés pour le transport de l'énergie électrique dans certaines zones enclavées ou éloignées ainsi que les coûts élevés à consentir, il serait plus judicieux d'envisager l'utilisation des énergies renouvelables. Les systèmes hybrides photovoltaïque-éolien sont très adaptés à ces problèmes quand les gisements solaire et éolien y sont importants.

Dans ce chapitre, on fera une description générale de ces systèmes et on exposera le principe de leur fonctionnement.

II. GENERALITE SUR LES SYSTEMES EOLIENS

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). L'énergie éolienne est devenue aujourd'hui une réalité. Elle est en plein développement en terme de puissance installée dans le monde .Plusieurs facteurs ont contribué et contribuent encore à son essor :

- L'énergie éolienne est propre : les éoliennes n'engendrent aucune pollution, elles ne rejettent aucune substance dangereuse dans l'environnement et n'engendrent aucun déchet.

- L'énergie éolienne est abondante : le vent est inépuisable, il constitue donc une véritable ressource renouvelable.

- L'énergie éolienne est prometteuse : l'énergie éolienne est actuellement la moins chère de toutes les énergies renouvelables existantes.

II.1 Historique [1]

L'idée d'exploiter l'énergie du vent date de l'antiquité, en effet d'anciennes civilisations ont connu l'exploitation de l'énergie du vent (les perses, les égyptiens et les chinois). A partir du 12ème siècle, les moulins à vent firent leur première apparition en Europe et au cours des siècles qui suivirent, cette «technologie » se répandit à travers le monde. Ces moulins à vent (aéromoteurs) étaient économiquement rentables et ils ont contribué au développement économique de l'Europe par la production de l'énergie mécanique (pompage d'eau, le meulage des grains ainsi que le sciage du bois etc...). A partir du 19ème siècle ces applications commencent à perdre leur intérêt, cela est dû à l'évolution technologique qu'a connue l'Europe pendant la révolution industrielle. Devant la montée de la combustion du charbon, l'éolien pratiquement disparu. Après le premier choc pétrolier, des efforts pour développer à nouveau l'énergie éolienne ont été consentis, et le monde occidental se mit une fois de plus à investir dans la ressource éolienne, cette fois-ci dans le but de produire de l'électricité. Vers le début des années 1980, les budgets de recherche et développement accordés à cette énergie « redécouverte » ont littéralement explosé dans certains pays comme l'Allemagne, les Etats-Unis, le Danemark et l'Espagne. Après une période de tâtonnement, il s'est révélé que la bonne stratégie consiste à augmenter progressivement la puissance des aérogénérateurs, en s'appuyant sur la création de marchés subventionnés donnant une base industrielle suffisante pour le développement de ce domaine. En plus des investissements dans le domaine éolien, certains pays ont adopté une législation incitative visant à promouvoir ce secteur. Dans certains pays, ces mesures étaient assez efficaces pour faire naître une véritable industrie éolienne.

Grâce aux améliorations technologiques qui ont permis des réductions de coûts, cette filière est aujourd'hui compétitive avec d'autres filières traditionnelles et occupe une part de plus en plus importante dans le bilan énergétique de nombreux pays.

II.2 Définition de l'énergie éolienne

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

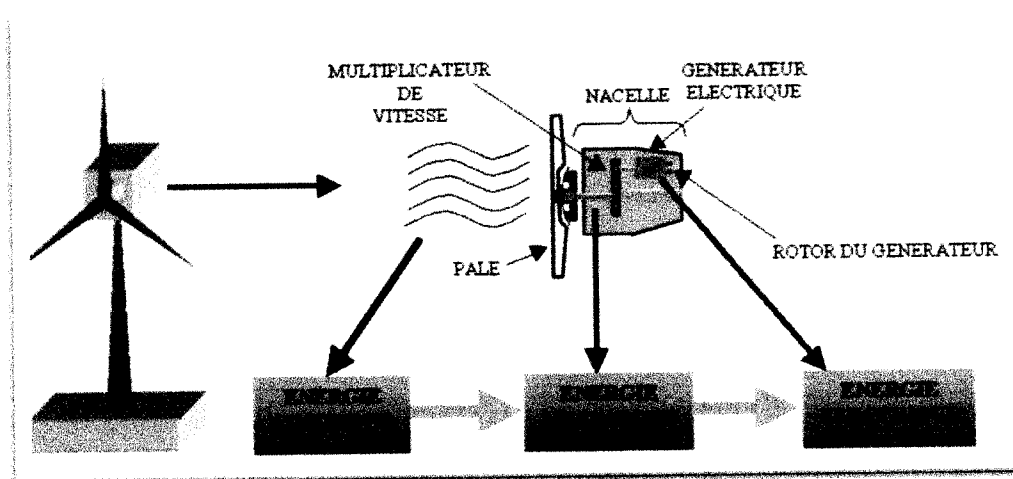


Figure I. 1: Conversion de l'énergie cinétique du vent

II.3 Les différents types d'éoliennes

Depuis le début de la technologie de l'énergie éolienne, des machines de plusieurs types et formes ont été créées et développées autour du monde, certaines de ces machines sont des modèles innovateurs qui ne sont pas commercialement acceptées. Quoique, il y ait plusieurs méthodes pour caractériser les turbines éoliennes, elles sont généralement classées en machines à axe horizontal et à axe vertical [3], en se basant sur leurs axes rotation.

3.1 Les éoliennes à axe horizontal

Ce sont les machines les plus répandues actuellement du fait de [1] :

- ❖ 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 multipales pour le pompage de l'eau.

- ❖ Elles ont un rendement élevé.
- ❖ Les éoliennes à axe horizontal (ou à hélice) sont de conception simple.

Sur la base du nombre de pâles que compte l'hélice, on peut distinguer deux groupes:

✦ *Eoliennes lentes "multipales"*

Elles sont, depuis longtemps, relativement répandues dans les campagnes, et servent quasi exclusivement au pompage de l'eau.

✦ *Eoliennes rapides; Aérogénérateurs*

Les éoliennes à rotation rapide, bi- ou tripales en général, constituent actuellement la catégorie des éoliennes en vogue, et sont essentiellement affectées à la production d'électricité, d'où leur nom le plus courant "d'aérogénérateurs". Les éoliennes rapides obtiennent des rendements élevés.

Parmi les machines à axe horizontal parallèle à la direction du vent, il faut encore différencier l'aérogénérateur dont l'hélice est en amont de la machine par rapport au vent « *hélice au vent* » et celle dont l'hélice est en aval de la machine par rapport au vent « *hélice sous le vent* ». [5]

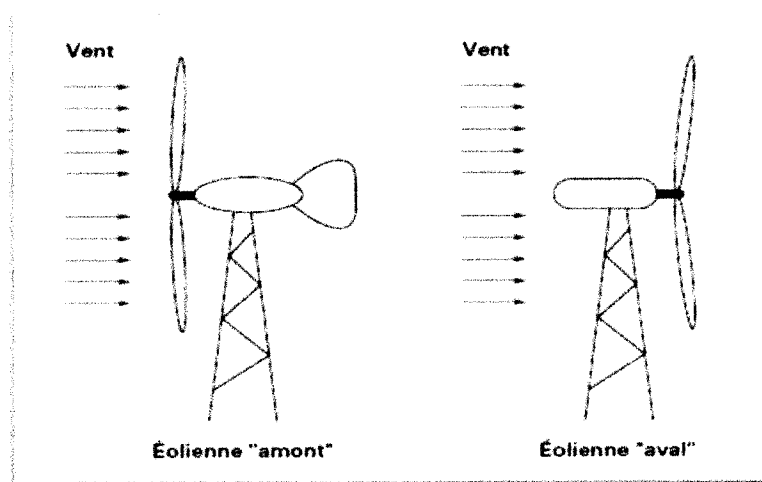


Figure I. 2: hélice au vent, hélice sous le vent [5]

3.2 Les éoliennes à axe vertical

Elles sont très peu mise en œuvre à nos jours car elles sont moins performantes que celles à axe horizontal. [3]

De par le fait que leur axe de rotation est vertical et toujours perpendiculaire à la direction du vent, elles sont les premières structures qui ont été 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.

Il existe deux types d'éoliennes à axe vertical :

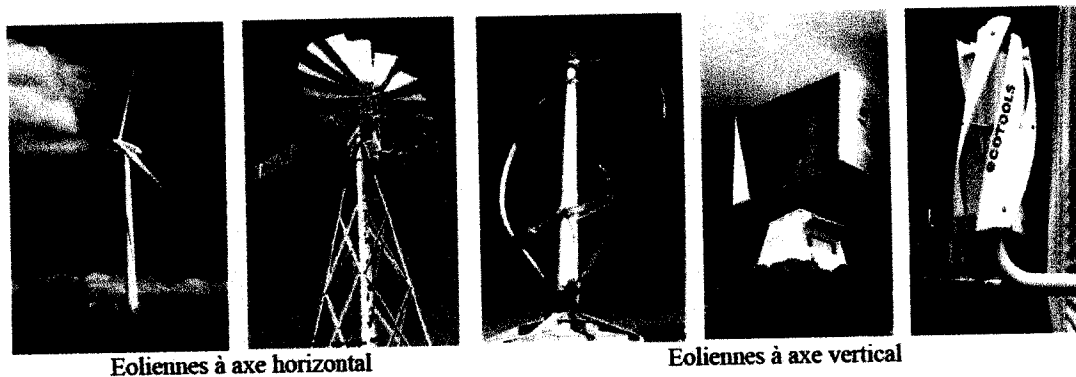
✦ Éolienne Savonius

Elle 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.

✦ Éolienne Darrieus

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.



Eoliennes à axe horizontal

Eoliennes à axe vertical

Figure I. 3: Technologies d'éoliennes

II.4 Principe de fonctionnement

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes [4]:

- ❖ 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. [4]

4.1 Éléments constitutifs d'un aérogénérateur (à axe horizontal) [1]

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.

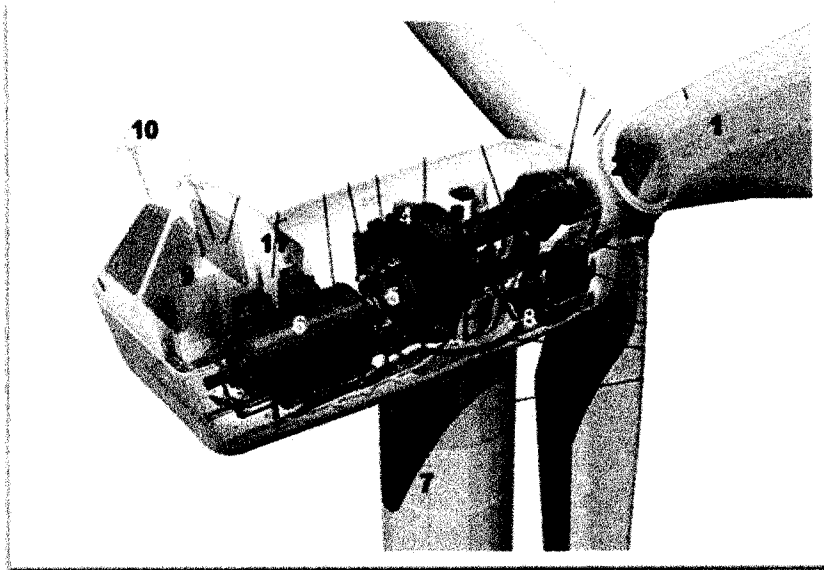


Figure 1. 4: les composantes de l'aérogénérateur

1. Les pales : ce 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.

4.2 Bilan des forces sur une pale

La figure I.5 représente la section longitudinale d'une pale d'aérogénérateur. L'action du vent relatif sur un profil aérodynamique engendre sur la section de pale de largeur \overrightarrow{dr} et de longueur de corde l une distance r de l'axe de rotation une force résultant \overrightarrow{dF} . [6]

Les deux forces principales agissant sur la pale sont la portance dD et la traîne dL . La force traîne agit parallèlement à la direction initiale du mouvement et la force portance agit perpendiculairement à elle.

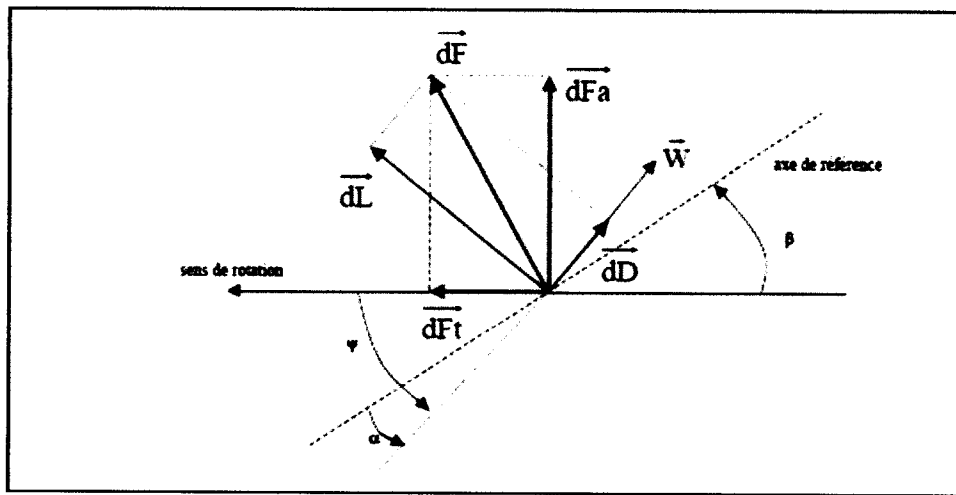


Figure I. 5: Forces appliquées sur un élément de pale [6]

On peut décomposer la force résultante \vec{dF} de la manière suivante :

- ☒ La pousse axiale \vec{dF}_a , perpendiculaire au plan de rotation.
- ☒ La pousse tangentielle \vec{dF}_t , dans la direction de rotation.

La force de portance : $L = \frac{1}{2} \rho w^2 dA C_L$ I.1

La force de traînée : $D = \frac{1}{2} \rho w^2 dA C_D$ I.2

La poussée axiale : $F_a = \frac{1}{2} S w^2 dA C_z$ I.3

La poussée de rotation: $F_t = \frac{1}{2} S w^2 dA C_x$ I.4

Avec

$dA = l(r). dr$: Surface du tronçon de pale

$l(r)$: longueur de la corde à la distance r de l'axe de rotation

C_L : coefficient de portance (sans dimension)

C_D : coefficient de traînée (sans dimension)

C_z : coefficient de portance suivant le plan de rotation

C_x : coefficient de poussée

W: module du vent apparent

Ces coefficients C_L et C_D dépendent du profil de la pale et de l'angle d'incidence α . Dans l'analyse du fonctionnement des turbines éoliennes on utilise le diagramme du rapport C_x/C_z en fonction de l'angle d'incidence α . Ce rapport reflète le rendement de conversion de l'énergie éolienne.

II.5 Puissance fournie par un aérogénérateur

5.1 Energie disponible dans le vent [2]

L'énergie du vent a la forme d'une énergie cinétique. L'énergie cinétique est caractérisée par l'équation suivante :

$$E_c = \frac{1}{2} mV^2 \quad \text{I.5}$$

Si cette énergie pouvait être complètement récupérée à l'aide d'un dispositif ayant la surface A ($A = \pi R^2$), situé perpendiculairement à la direction de la vitesse du vent

Le potentiel éolien moyen disponible sur un site est donnée par:

$$P_{dis} = \frac{1}{2} A\rho V^3 \quad \text{I.6}$$

Avec ρ : la densité d'air

5.2 Loi de Betz

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Betz, première personne ayant développé la théorie globale d'aéromoteur à axe horizontal, montre que l'énergie maximale susceptible d'être recueillie par un aérogénérateur ne peut dépasser en aucun cas 59% de l'énergie cinétique.

Prenant un rotor d'une éolienne dans un tube de courant :

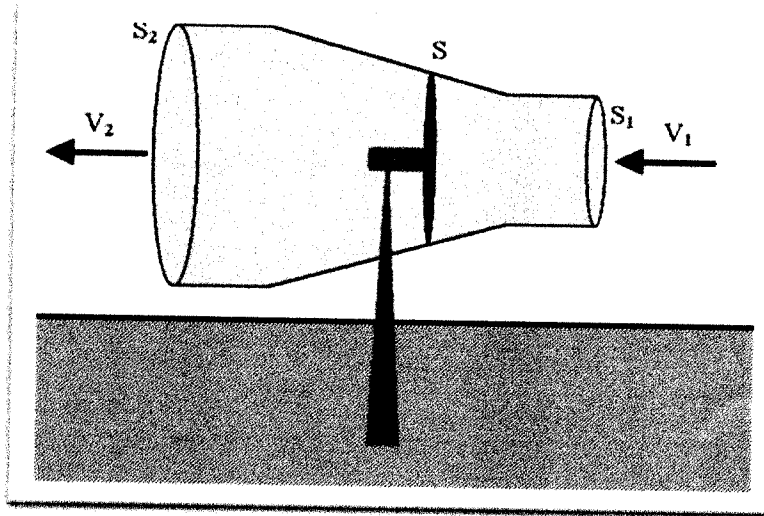


Figure I. 6: L'écoulement axial de l'air

- Avec :
- V_1 ; la vitesse du vent en amont
 - S_1 ; surface à l'entrée du tube de courant
 - V_2 ; la vitesse en aval
 - S_2 ; surface à l'aval du rotor
 - S ; surface du rotor

Soit $(V_1 + V_2) / 2$;

la masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales est :

$$m = \frac{\rho S (V_1 + V_2)}{2} \quad \text{I.7}$$

La puissance P_m alors extraite s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent (seconde loi de Newton) :

$$P_m = \frac{m(V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad \text{I.8}$$

Soit en remplaçant m par son expression

$$P_m = \frac{\rho S (V_1 + V_2)(V_1^2 - V_2^2)}{4} \quad \text{I.9}$$

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V_1 , la puissance P_{mt} correspondante serait alors :

$$P_{mt} = \rho S V_1^3 / 2 \quad \text{I.10}$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est alors :

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{(1 + (\frac{V_1}{V_2})) (1 - (\frac{V_1}{V_2})^2)}{2} \quad \text{I.11}$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus, on s'aperçoit que le ratio P_m/P_{mt} appelé aussi coefficient C_p présente un maxima de $16/27$ soit 0.59 . c'est cette limite théorique appelée limite de betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Ce coefficient de puissance permet de classer les différents types d'éolienne suivant leur nature. [2]

$$P_{rec} = 1/2 C_p \rho A V^3 \quad \text{I.12}$$

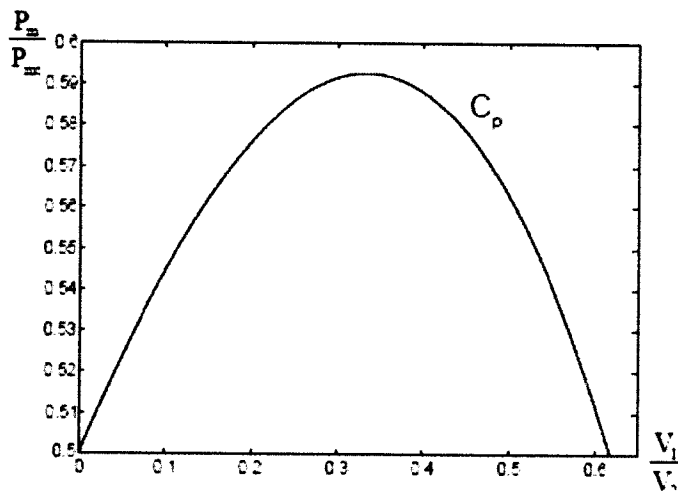


Figure I. 7 : Coefficient de puissance

Chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent

$$\lambda = \frac{R\Omega}{V} \tag{I.13}$$

Ω : Vitesse angulaire du rotor de l'éolien, R : rayon d'extrémité de la pale.

La puissance et le couple que la turbine peut capter sont définis à partir de cette puissance disponible par des coefficients $C_p(\lambda)$ et $C_t(\lambda)$ appelés respectivement, coefficient de puissance et coefficient de couple. Ces deux coefficients sont liés par la relation suivante : [2]

$$C_p(\lambda) = \lambda C_t(\lambda) \tag{I.14}$$

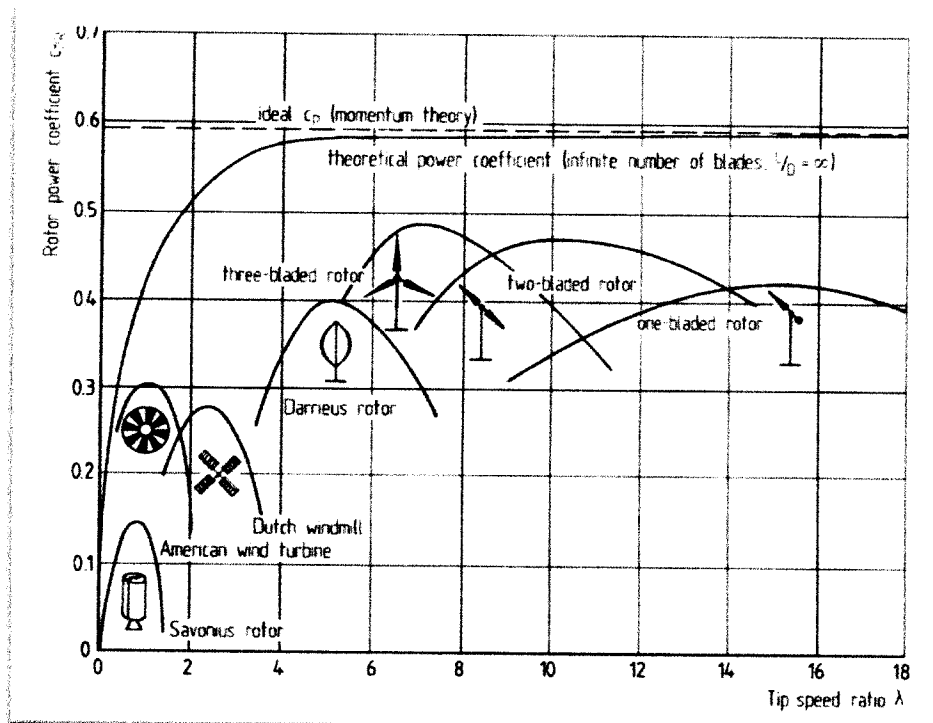


Figure I. 8: coefficient de puissance en fonction de la vitesse normalisée λ pour différents types de turbines

Des courbes typiques pour différents aérogénérateurs sont présentées sur la figure (I.8). En générale dans un premier temps, le coefficient de puissance augmente avec la vitesse normalisée, atteignant un maximum pour une certaine valeur de λ puis diminue même avec l'augmentation de la vitesse normalisée.

Ces variations de $C_p(\lambda)$, dépendant de plusieurs propriétés aérodynamiques, mais essentiellement de plusieurs éléments dans la conception du rotor, notamment, dans le nombre de pales utilisées

Il est donc à noter que les meilleurs éoliens à axe horizontal, bipale ou tripale, se situent à 60-50% de la limite de Betz [6] : on ne récupère donc globalement que 40% de l'énergie due au vent

II.6 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne

Une turbine éolienne est dimensionnée pour développer une puissance nominale P_n à partir d'une vitesse de vent nominale V_n . Pour des vitesses de vents supérieures à V_n , la turbine éolienne doit modifier ses paramètres aérodynamiques afin d'éviter les surcharges mécaniques (turbines, mat et structure), de sorte que la puissance récupérée par la turbine ne dépasse pas la puissance nominale pour laquelle l'éolienne a été conçue. Il y a d'autres grandeurs dimensionnantes: V_d la vitesse du vent à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie et V_m la vitesse maximale de vent au-delà de laquelle l'éolienne doit être stoppée pour des raisons de sûreté de fonctionnement.

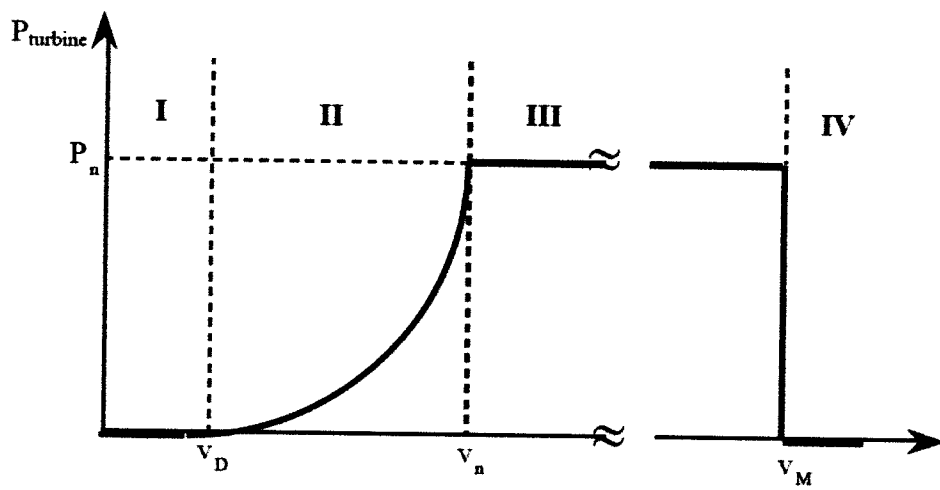


Figure I. 9: Diagramme de la puissance sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent

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 : [10]

- ✓ **la zone I** : où $P = 0$ (la turbine ne fonctionne pas),
- ✓ **La zone II** : dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent V_w ;
- ✓ **la zone III**: où généralement la vitesse de rotation est maintenue constante par un dispositif de régulation et où la puissance P_{turbine} fournie reste sensiblement égale à P_n ;
- ✓ **La zone IV**: dans laquelle le système de sûreté du fonctionnement arrête la rotation et le transfert de l'énergie.

La plupart des grandes turbines éoliennes utilisent deux principes de contrôle aérodynamique pour limiter la puissance extraite à la valeur de la puissance nominale de la génératrice : [19], [11]

1. Système « pitch » ou « à pas ou calage variable » qui permet d'ajuster la portance des pales à la vitesse du vent, principalement pour maintenir une puissance sensiblement constante dans la zone III de vitesses. [19]

2. Système « stall » ou à « décrochage aérodynamique », le plus 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 maximale n'est pas plate et chute plus vite. Il s'agit donc d'une solution passive et robuste (pas besoin de système d'orientation des pales).

D'autres systèmes de régulation, dans les petites éoliennes notamment, sont exploités :

- Basculement (relèvement) de l'axe, normalement horizontal;
- Pas variable par la pression du vent (modèle Airwind : les pales en fibre, se déforment et provoquent un décrochage);
- Déviation par rapport à l'axe du vent. La dérive se trouve légèrement décalée par rapport à l'axe de rotation vertical (qui permet normalement à la turbine d'être face au vent) et crée une force de déviation qui régule la puissance aérodynamique (la turbine reçoit un vent de travers).

II.7 Critère de choix d'un potentiel éolien

L'énergie cinétique du vent constitue une ressource énergétique inépuisable mais fluctuante. Pour toute installation d'une éolienne dans un endroit, il faut d'abord faire une étude des caractéristiques des sites :

- Quantifier la ressource éolienne sur les sites d'application.
- Estimer la puissance moyenne annuelle disponible sur ces sites.

7.1 Le vent

Le vent est généralement appliqué aux déplacements naturels horizontaux de l'atmosphère (mouvement d'air). Les mouvements de direction verticale sont appelés des courants. Les vents sont produits par les différences de pressions atmosphériques engendrées principalement par les gradients de température. Les variations de la distribution des pressions et des températures sont dues essentiellement à une distribution inégale de l'énergie solaire sur la surface de la terre, et aux différences des propriétés thermiques des surfaces des continents et des océans. Quand les températures de régions voisines deviennent inégales, l'air le plus chaud tend à s'écouler par dessus l'air le plus

froid (le plus lourd). La direction des vents générés de cette façon est généralement grandement modifiée par la force de Coriolis résultant de la rotation de la terre [1]

7.2 Gisement éolien en Algérie

En ce qui concerne l'Algérie, la ressource éolienne varie beaucoup d'un endroit à un autre. Ceci est principalement dû à une topographie et climat très diversifié. En effet, notre vaste pays se subdivise en deux grandes zones géographiques distinctes: -le nord méditerranéen est caractérisé par un littoral de 1200Km et un relief montagneux, représenté par deux chaînes montagneuses, l'atlas tellien et l'atlas saharien, entre lesquelles s'intercalent des plaines et des hauts plateaux de climat continental. -le sud, quand à lui, se caractérise par un climat saharien.

Le sud algérien est caractérisé par des vitesses de vent plus élevées que le nord, plus particulièrement le sud-ouest avec des vitesses supérieures à 4m/s et qui dépassent la valeur de 6m/s dans la région d'Adrar. Concernant le nord, on remarque globalement que la vitesse moyenne est peu élevée. On note cependant, l'existence de microclimats sur les sites côtiers d'Oran, Bejaia et Annaba, sur les hauts plateaux de Tiaret et El-Kheiter ainsi que dans la région délimitée par Bejaia au nord et Biskra au sud [18].

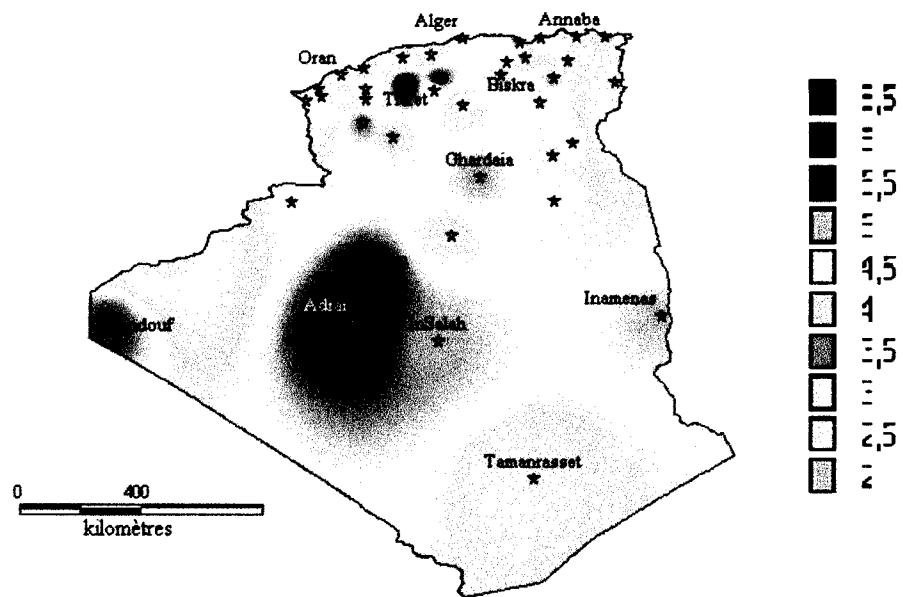


Figure I. 10: Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 10 m du sol

7.3 La loi de distribution de weibull

La connaissance de la loi de distribution de la vitesse du vent est importante pour de nombreuses applications de l'énergie éolienne.

Plusieurs fonctions de probabilité ont été utilisées pour identifier la distribution statistique convenable pour représenter les régimes du vent. Le modèle le plus utilisé est celui de la distribution de Weibull qui s'avère approprié à la représentation des propriétés statistiques du vent (Keller, 1992). [6]

La distribution de Weibull est un cas particulier de la loi de distribution gamma généralisée, elle peut être réduite en deux autres distributions théoriques: la distribution exponentielle (k=1) et la distribution de Rayleigh (k=2)

La forme mathématique de la distribution de Weibull est :

$$f(V) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right] \tag{I.15}$$

Avec C: paramètre d'échelle

K: paramètre de forme

La vitesse moyenne du vent est donnée par la distribution de Weibull :

$$\bar{V} = \int_0^{\infty} f(V)dV = C\Gamma \left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad \text{I.16}$$

Où Γ est la fonction Gamma, définie par (Avec $x > 0$)

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} \exp(-t) t^{x-1} dt \quad \text{I.17}$$

7.4 Influence de la hauteur sur l'énergie éolienne

On détermine la vitesse moyenne du vent à une hauteur quelconque du rotor, par la relation :

$$\bar{V} = V_1 \cdot \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^\alpha \quad \text{I.18}$$

Une approche intéressante de l'estimation de la fonction de distribution des vitesses de Weibull selon la hauteur au dessus du sol est donnée par C. G. JUSTUS et A. S. MIKHAIL (1976) qui donne la loi de puissance modifiée par le facteur d'échelle C_1 et de forme k_1 à une hauteur h_1 (10 mètres au dessus sol pour le cas présent) C_2 et k_2 à une hauteur plus grande h_2 [18].

$$C_2 = C_1 \cdot \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^{\alpha k} \quad \text{tel que} \quad \alpha k = \frac{x - 0.088 \cdot \log(C_1)}{1 - 0.088 \cdot \log(h_1/10)} \quad \text{I.19}$$

$$k_2 = \frac{k_1 \left[1 - 0.088 \cdot \log\left(\frac{h_1}{10}\right)\right]}{\left[1 - 0.088 \cdot \log\left(\frac{h_2}{10}\right)\right]} \quad \text{I.20}$$

7.5 La puissance moyenne annuelle fournit par un aérogénérateur

La puissance moyenne produite par un aérogénérateur peut être évaluée en combinant sa courbe de puissance avec la distribution de la vitesse du vent sélectionnée .Elle est donnée par

$$\bar{P} = \int_0^{\infty} P(V)f(V)dV \quad \text{I.21}$$

$P(V)$: Fonction de puissance de l'aérogénérateur.

$f(V)$: Fonction de distribution de la vitesse du vent.

II.8 Avantages et inconvénients**✦ Avantages**

Le premier des avantages est évidemment pouvoir produire de l'énergie grâce à une source naturelle et inépuisable : le vent.

L'énergie primaire d'origine éolienne est renouvelable.

L'énergie éolienne est prometteuse : l'énergie éolienne est actuellement la moins chère de toutes les énergies renouvelables existantes. Une étude faite en 2003 sur l'état de l'art de l'éolien montre que le coût à cette époque du kilowattheure (kWh) d'origine éolien était de 3.79 cent € [11].

✦ Inconvénients

Le vent n'est exploitable que 20% du temps en moyenne. Il souffle pendant des durées très variables.

L'énergie électrique n'est pas stockable, on peut cependant la transformer en énergie électrochimique dans des accumulateurs. Ce stockage est coûteux.

Les riverains déplorent le bruit des éoliennes qui peut être d'origine mécanique ou d'origine aérodynamique.

III. GENERALITE SUR LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUE

Le soleil reste jusqu'à présent la plus importante source d'énergie malgré la distance considérable qui le sépare de la terre ($150 * 10^6$ km). La puissance émise par le soleil sous forme de rayonnement est estimée à $90 * 10^{15}$ GW, alors que la couche terrestre n'arrive à recevoir que $180 * 10^6$ GW. Avant d'arriver à la terre, le rayonnement solaire subit de considérables modifications, dues principalement aux phénomènes d'absorption et de diffusion. Aussi, on introduit la notion de l'éclairement qui est la densité de puissance reçue par une surface soumise à un flux lumineux, dans les conditions atmosphériques optimales. Cette densité de puissance atteint 1 kW/m^2 pour un site situé au niveau de la mer [12]. Cette énergie est disponible en abondance sur toute la

surface terrestre, et ce, malgré une atténuation importante à la traversée de l'atmosphère; la quantité qui reste est encore assez importante, quand elle arrive au sol. On peut ainsi compter sur 1000 W/m² crête dans les zones tempérées et jusqu' à 1400 W/m² lorsque l'atmosphère est faiblement polluée. [12] L'Algérie dispose d'environ 3200 heures d'ensoleillement par an, bénéficiant d'une situation climatique favorable à l'application des techniques solaires.

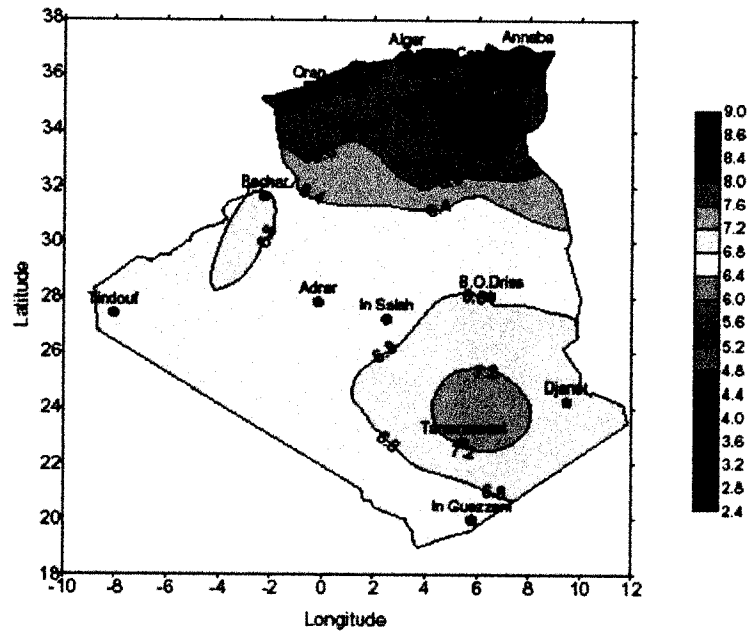
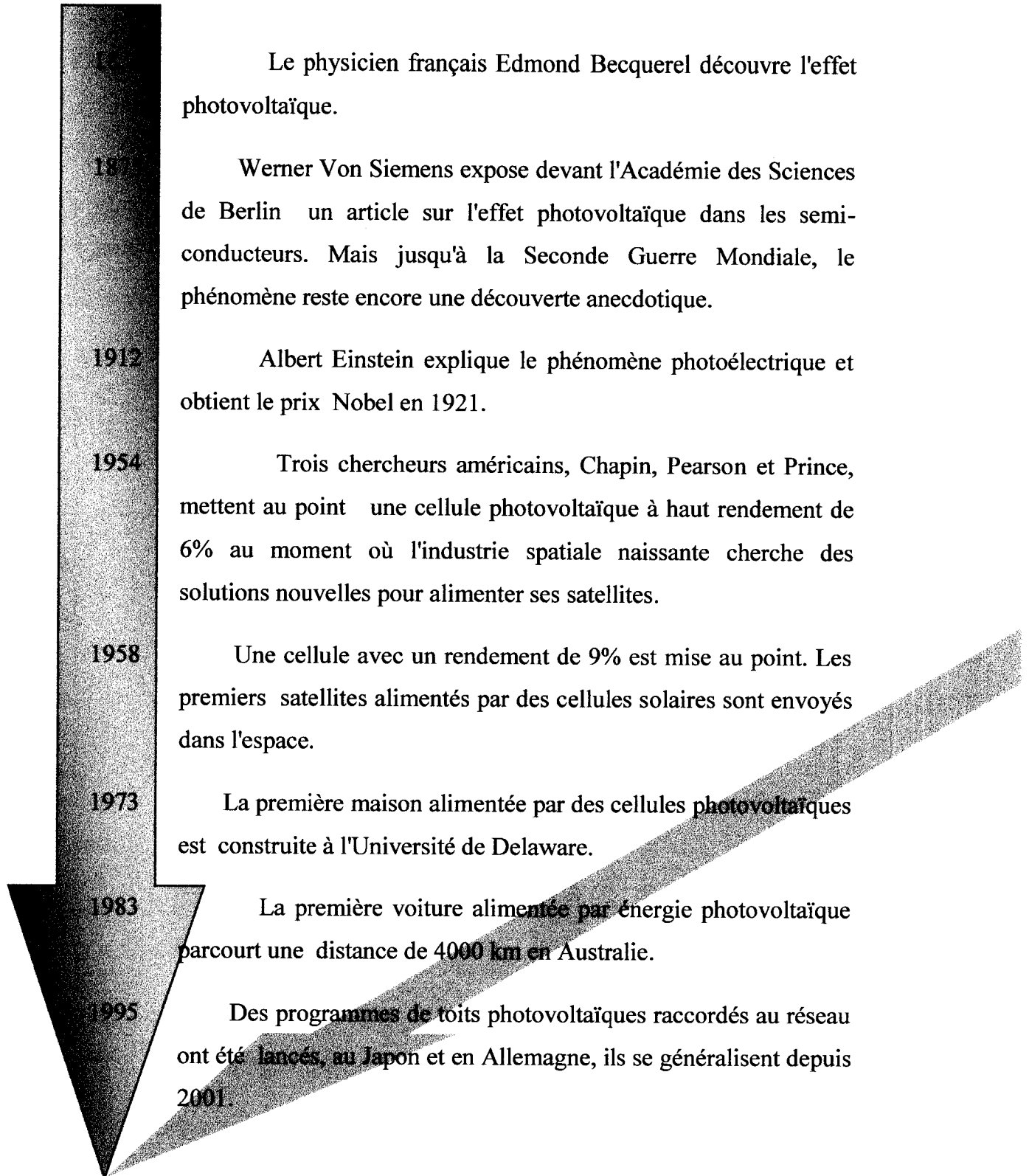


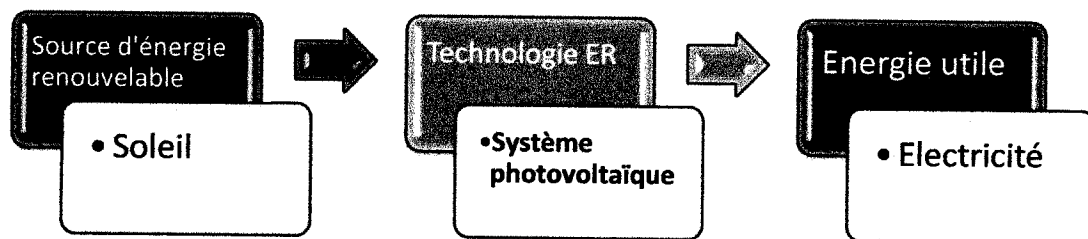
Figure I. 11: Carte préliminaire des irradiances solaire de l'Algérie. [10]

III.1 La cellule Photovoltaïque: Historique [13]



III.2 Principe de fonctionnement

La cellule solaire est un moyen de conversion de la lumière en énergie électrique par un processus appelé <effet photovoltaïque>.



La structure la plus simple d'une cellule photovoltaïque comporte une jonction entre deux zones dopées différemment du même matériau (homojonction) ou entre deux matériaux différents (hétérojonction). Le but de la structure photovoltaïque, c'est de créer un champ électrique interne.

La jonction p-n de ces deux matériaux fonctionne comme une diode. Si les photons ont une énergie très supérieure à l'énergie de gap 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 phonons au réseau cristallin puis perdu en chaleur et l'électron prendra un niveau stable dans la bande de conduction. Si les photons ont une énergie inférieure à l'énergie de gap E_g , ils ne seront pas absorbés et leurs énergies ne contribuent pas à la conversion photovoltaïque. [14]

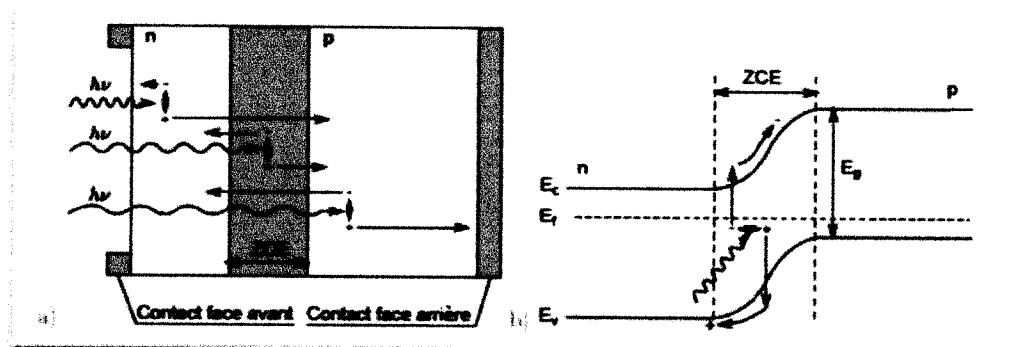


Figure I. 12: a) Structure de diode à jonction pn, b) diagramme de bande d'une jonction pn

Les photons incidents créent des porteurs dans les zones de n et p et dans la zone de charge d'espace. Les porteurs de la charge auront un comportement différent suivant la région :

Dans la zone n ou p les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace sont envoyés par le champ électrique dans la zone p (pour les trous) ou dans la zone n (pour les électrons) où ils seront majoritaires ; on aura un photo-courant de diffusion.

Dans la zone de charge d'espace, les paires électrons /trous créées par les photons incidents sont dissociés par le champ électrique : les électrons vont aller vers la région n, les trous vers la région p. on aura un photo-courant de génération.

III.3 Matériaux photovoltaïques

Il existe plusieurs familles de cellules photovoltaïques. Actuellement, les plus répandues sur le marché ce sont les cellules au silicium cristallin et les cellules à couches minces. D'autres sont au stade de la recherche et développement.

↓ Le Silicium monocristallin

La technologie monocristalline, plus chère, utilise des barres pures de silicium également employées dans la fabrication des puces électroniques. Le Si monocristallin est obtenu par des procédés industriels tels que le tirage CZ (Czockralski) ou la purification par fusion de zone (FZ). Ce type de matériau, qui présente d'excellentes qualités électroniques, permet la fabrication de cellules conventionnelles à haut rendement (~18%) [15] mais il est très coûteux.

↓ Le silicium multicristallin

Ces cellules, grâce à leur potentiel de gain de productivité, se sont aujourd'hui imposées : elles représentent 54.9 % de l'ensemble de la production mondiale en 2003. L'avantage de ces cellules par rapport au silicium

monocristallin est qu'elles produisent peu de déchets de coupe et nécessitent 2 à 3 fois moins d'énergie pour leur fabrication, leurs rendements est de 13% jusqu'à 20% en labo. [15]

✦ Silicium amorphe hydrogéné (a-Si : H)

On trouve également le silicium dans une forme amorphe (non cristallin), sa structure atomique est désordonnée. Sous cette forme, il possède un coefficient d'absorption de la lumière environ mille fois supérieur au silicium cristallin. Une couche de 0.3 mm est donc suffisante pour absorber l'intégrité du spectre visible. Son rendement est faible de l'ordre de 5 à 6 % par contre son prix est peu élevé. [13]

✦ Silicium à couches minces

La cellule est obtenue par diffusion d'une couche mince de silicium amorphe sur un substrat de verre. Le rendement de ces cellules est proche de 17% en laboratoire. Des progrès continuent avec les matériaux semi-conducteurs Arséniure de gallium (AsGa), Séléniure de cuivre et d'indium (CIS). [15]

✦ Matériaux organiques

La recherche de cellules solaires à base de matériaux organiques ou des polymères est motivée par les avantages qu'elles présentent tels que leur faible coût, une matière première illimitée, facilité de mise en œuvre, technologie basse température, grande surface utile, dispositifs souples.

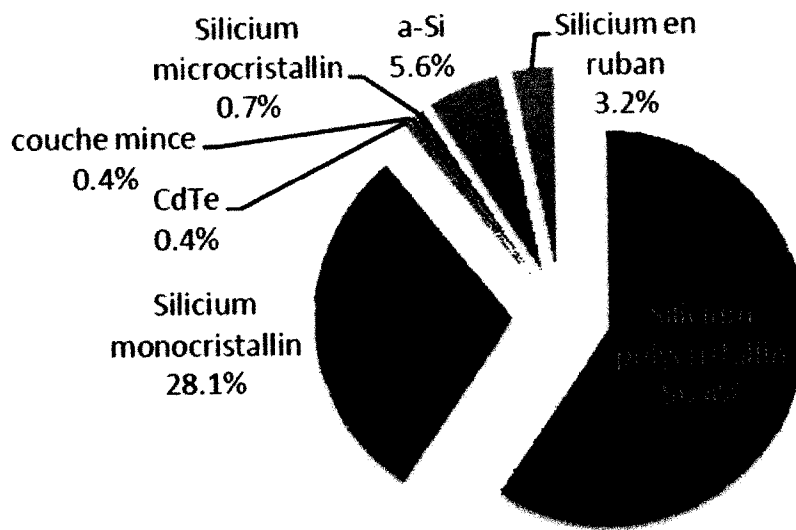


Figure I. 13: Utilisation des Matériaux photovoltaïques (2003) [15]

III.4 LE MODULE PHOTOVOLTAÏQUE

Les puissances demandées par les charges couramment utilisées nécessitent conjointement des tensions supérieures à celles que peuvent fournir les cellules élémentaires, il faut donc envisager des groupements. Pour cela les cellules sont assemblées pour former un module. La connections en série de plusieurs cellules augmente la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la même tension. [16]

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.

4.1 Caractéristiques d'un module [17]

Voici la description des paramètres d'un module :

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

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

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

Rendement maximal : rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.

Facteur de forme : rapport entre la puissance optimale P_m et la puissance maximal que peut avoir la cellule : $V_{CO} \cdot I_{CC}$.

III.6 Le panneau photovoltaïque [16]

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.

La quantité d'électricité dans l'ensemble des composants du panneau PV dépend :

- De la taille du panneau
- De l'ensoleillement du lieu d'utilisateur
- De la saison d'utilisation

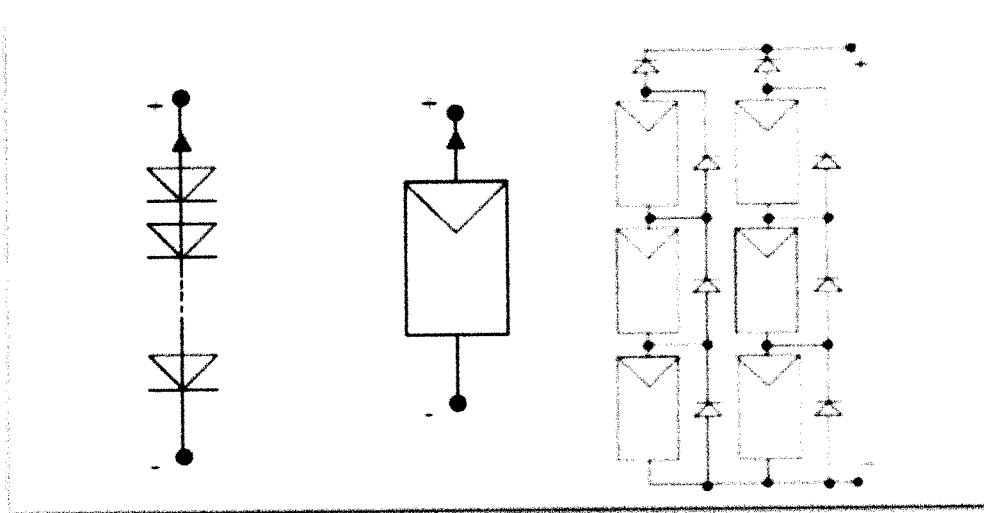


Figure I. 14: Cellule, module et panneau photovoltaïque

III.7 Avantages et inconvénients d'une installation PV**✦ Avantages**

- Son carburant est gratuit : Le soleil est la seule ressource dont a besoin un panneau solaire. Et le soleil brillera jusqu'à la fin des temps. De plus, la plupart des cellules photovoltaïques sont fabriquées à base de silicium, un matériau abondant et non toxique (second matériau le plus abondant sur Terre).
- L'énergie solaire photovoltaïque ne génère ni bruit, ni émissions nocives, ni gaz polluants.
- Les modules photovoltaïques sont recyclables et les matériaux utilisés pour leur production (silicium, verre, aluminium, etc.) peuvent être réutilisés.
- L'énergie solaire photovoltaïque fournit de l'électricité aux zones rurales les plus isolées (systèmes autonomes)...

✦ Inconvénients

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru. La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulation associés soient judicieusement choisis

Référence Bibliographique

- [1]: PAUL GIPE « *Le grand livre de l'éolien* », Edition le Moniteur 2007
- [2]: MAHRI ZINE LABIDINE « *Etude dynamique et optimisation des pales d'un aérogénérateur* » thèse de doctorat Université Mentouri (Constantine)
- [3]: Energie éolienne, Théorie, conception et calcul pratique des installations, Désiré le Gourières, Edition EYROLLES, 1980.
- [4]: A. DAVIGNY « *Participation aux services système de fermes d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie* » thèse de doctorat Université de Lille, Décembre 2007
- [5]: M. LOPEZ « *Contribution a l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée* » thèse de doctorat Université de Pris-Sud 11,
- [6]: D. MALIKA « *Pompage de l'eau à l'aide de l'énergie éolienne au service des zones rurales* » thèse de Magistère université Abou-Bakr Belkaid de Tlemcen, 2008
- [7]: O. GERGAUD « *Participation aux services système de fermes d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie* » thèse de doctorat Université de Lille, Décembre 2007
- [8]: Olivier GERGAUD « *Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur* » thèse de doctorat de l'école normale supérieure de CACHAN, 2002
- [9]: SEMROUNI GHANIA « *Les Energies Renouvelables, Les filières développées en Algérie* » Séminaire sur les énergies renouvelables en Algérie Berlin, 11 juillet 2007

- [10]: A. MIRECKI « *Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance* », thèse préparée au laboratoire d'Électrotechnique et d'Electronique Industriel de l'ENSEEIH, Unité de Mixte de recherche CNRS N° 5828
- [11]: H. BELGHITRI « *Modélisation, Simulation et optimisation d'un Système hybride éolien-photovoltaïque* » thèse de magister Université Abou-Bakr Belkaid de Tlemcen, Décembre 2007.
- [12]: LABOURET, P.CUMUNEL, J-P.BRAUN « *Cellules Solaires Les Bases de L'énergie Photovoltaïque* », Dunod, Paris 2001
- [13]: M. BEAUDHUIN « *Étude expérimentale et numérique de la précipitation d'impuretés et de la formation des grains dans le silicium photovoltaïque* », thèse de doctorat de L'Institut polytechnique de Grenoble, Décembre 2009
- [14]: N. OLEKSIY « *Simulation, fabrication et analyse de cellule photovoltaïque à contacts arrières interdigites* » thèse de doctorat à l'institut national des sciences appliquées de Lyons
- [15]: M. PETIBON Stéphane « *Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques* » thèse doctorat de l'université de Toulouse, Janvier 2009
- [16]: I. VECHIU « *Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome* » thèse doctorat de l'université du HAVRE, Décembre 2005
- [17]: R. MAOUADJ « *Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah* » thèse de magister Université de Tlemcen, 2005
- [18]: N. Kasbadji Merzouk « *Evaluation du gisement énergétique éolien contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie* » Thèse de doctorat, Université de Tlemcen, 2006
- [19]: www.dewi.de
- [20]: www.energies-renouvelables.org

Chapitre II :

Modélisation d'un système hybride photovoltaïque éolien

I. MODELISATION D'UN SYSTEME HYBRIDE PV/EOLIEN

Les systèmes d'énergie hybrides associent au moins deux technologies complémentaires. Les sources d'énergie renouvelable, comme l'éolienne et photovoltaïque, ne délivrent pas une puissance constante. Leur association avec des sources classiques permet d'obtenir une production électrique continue. 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.

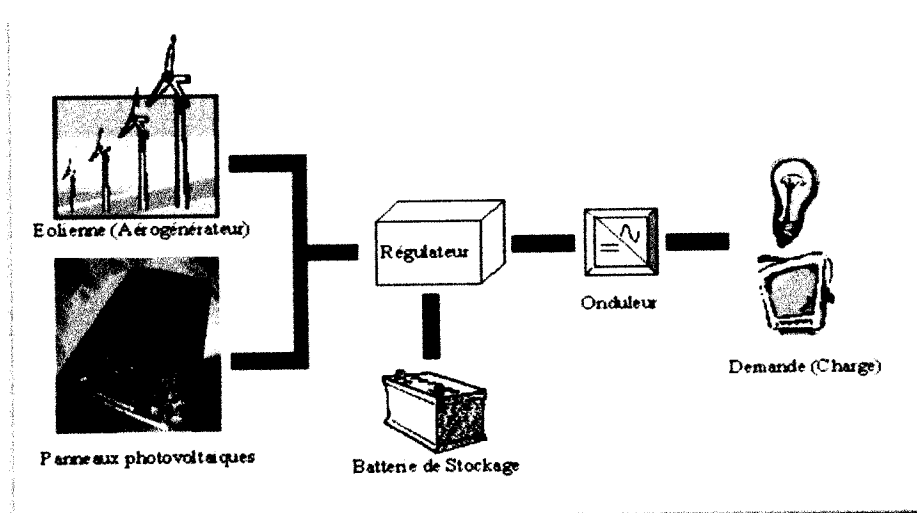


Figure II. 1: système hybride éolien –photovoltaïque

↓ Éléments 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.

II. LA MODELISATION DU CHAMP PHOTOVOLTAÏQUE

II.1 Modélisation d'une cellule solaire

Le schéma équivalent de la cellule solaire réel pour un flux incident et une température fixe, est le suivant [1]:

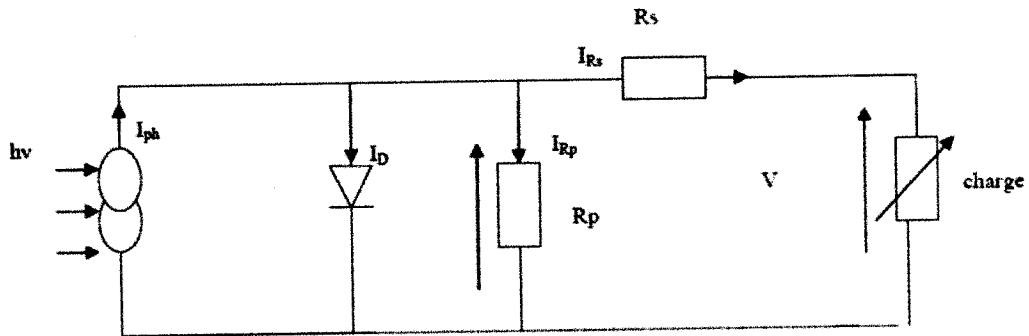


Figure II. 2: schéma électrique équivalent d'une cellule PV

R_s est une résistance série

R_p est une résistance parallèle

D'après Kirchhoff, la relation entre la tension et le courant du générateur photovoltaïque est donnée par la formule suivante:

$$I = I_{ph} - I_D - I_{Rp} \quad \text{II.1}$$

I_{ph} , le photocourant est directement dépendant de l'ensoleillement et de la température des panneaux et peut se mettre sous la forme :

$$I_{ph} = qg(L_n + L_p) \quad \text{II.2}$$

Tel que L_n et L_p : la longueur de diffusion des porteurs de charges respectivement électron, trou.

I_D : courant de polarisation de la jonction PN, est donné par l'expression :

$$I_D = I_0 \left(\exp^{\frac{qV_D}{AKT}} - 1 \right) \quad \text{II.3}$$

I_{Rp} : courant traversant R_p , si R_p est très grande, il devient très faible est indépendant de la tension :

$$I_{Rp} = \frac{V_D}{R_p} = \frac{V+R_S I}{R_p} \quad \text{II.4}$$

Avec ; I_0 : le courant de saturation

K : constante de Boltzmann

T : température absolu de la cellule

q : la charge de l'électron

A : facteur d'idéalité de la cellule qui dépend des mécanismes de recombinaisons dans la zone de charge d'espace. Pour les cellules actuellement commercialisées au silicium : $A=1$

Remplaçons dans les équations, l'équation caractéristique devient :

$$I = I_{ph} - I_0 \left(\exp^{\frac{q(V+R_S I)}{AKT}} - 1 \right) - \frac{V+R_S I}{R_p} \quad \text{II.5}$$

II.2 Les caractéristiques I-V d'une cellule solaire

La figure montre la caractéristique courant-tension (I-V) de la cellule qui présente comment la cellule photovoltaïque réagit à toutes les charges possibles sous des conditions particulières d'ensoleillement (1000W/m^2) et de température (25°C).

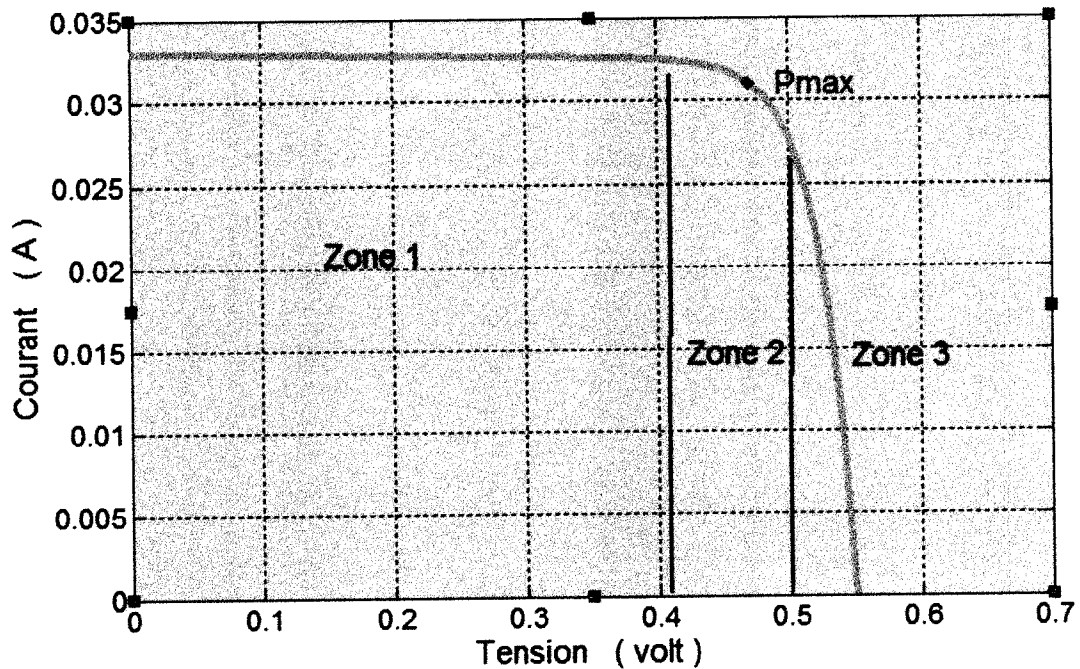


Figure II. 3: la caractéristique d'une cellule solaire

On distingue trois zones de fonctionnement :

- L'intervalle où, dans une cellule solaire, est considérée en tant que source courant ; comme le courant est constant alors la tension est variable (Zone 1).
- L'intervalle où, dans une cellule solaire, n'est ni considéré comme source de courant ni une source de tension (Zone 2).
- L'intervalle où, dans une cellule solaire, est considéré comme une source tension, comme la tension est variable, le courant est constant (Zone 3).

On peut obtenir à partir de cette caractéristique certains paramètres qui vont nous renseigner sur les phénomènes physiques mis en jeu dans la cellule.

2.1 Le courant de court-circuit I_{cc}

Il s'agit du courant lorsque le potentiel appliqué à la cellule est nul. C'est le plus grand courant que la cellule peut fournir. Celui-ci est fonction de la

température, de la longueur d'onde du rayonnement, de la surface active de la cellule, de la mobilité des porteurs et est linéairement dépendant de l'intensité lumineuse reçue.

2.2 La tension de circuit ouvert V_{co}

Elle représente la tension aux bornes de la cellule sous éclairage sans circuit de charge, V_{co} est donnée par la relation :

$$V_{CO} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_{CC}}{I_S} - 1 \right) \quad \text{II.6}$$

2.3 Le facteur de forme FF

Il s'agit d'un rapport qui rend compte de la qualité de la forme de la caractéristique courant-tension. Il est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{CC}V_{CO}} = \frac{I_{max}V_{max}}{I_{CC}V_{CO}} \quad \text{II.7}$$

Où I_{max} et V_{max} représente le couple intensité-tension pour lequel la puissance délivrée par la cellule est maximale. Le facteur de forme pour une cellule de bonne qualité est supérieur à 0.7% et il diminue avec l'augmentation de la température de la cellule [12].

2.4 Le rendement

Il est défini par le rapport entre l'énergie maximale délivrée par la cellule P_{max} et l'énergie lumineuse incidente P_{in} :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{FF * I_{CC} * V_{CO}}{P_{in}} \quad \text{II.8}$$

L'efficacité maximale de conversion d'une cellule n'a de signification que pour une distribution spectrale et une intensité donnée.

II.3 Facteur limitant le rendement

3.1 Influence de l'ensoleillement et la température

✦ L'ensoleillement

L'énergie électrique produite par une cellule photovoltaïque dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface. La figure II.4 représente la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque solaire en fonction de l'éclairement, à une température ambiante constante. On remarque que la tension V_{\max} correspondant à la puissance maximale ne varie que très peu en fonction de l'éclairement, contrairement au courant I_{\max} qui augmente fortement avec l'éclairement.

✦ Température

Les caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque dépendent de la température de la jonction au niveau de la surface exposée. Les courbes, présentées dans la figure II.5, représentent l'évolution du courant et de la tension en fonction de la température de jonction de la cellule, les autres conditions extérieures (éclairement) restant fixes : Lorsque la température augmente, la tension diminue alors que le courant augmente.

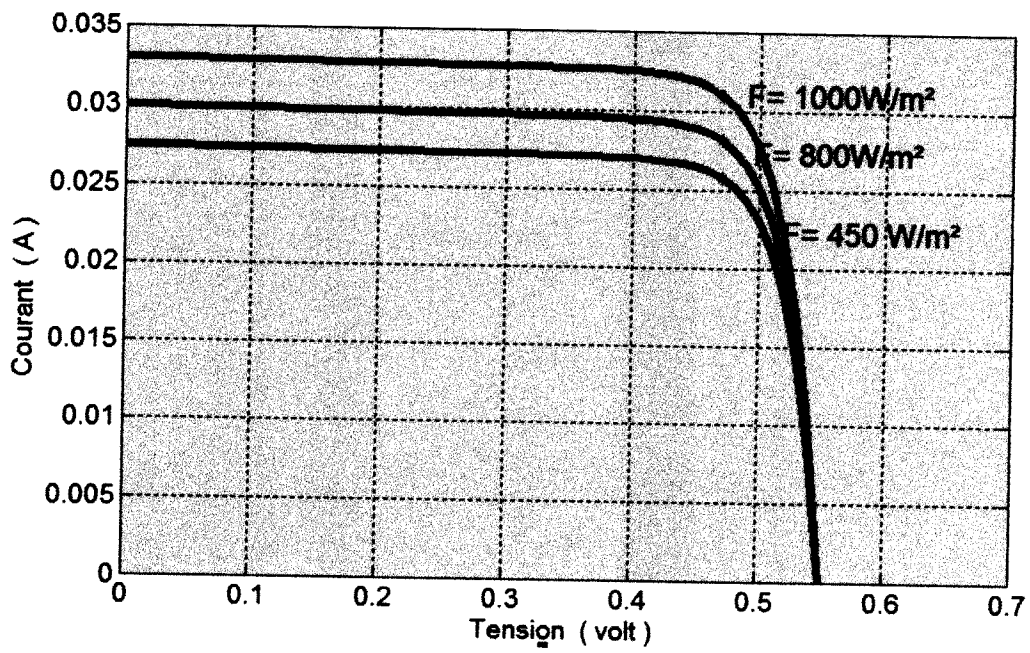


Figure II. 4: influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $I=f(V)$

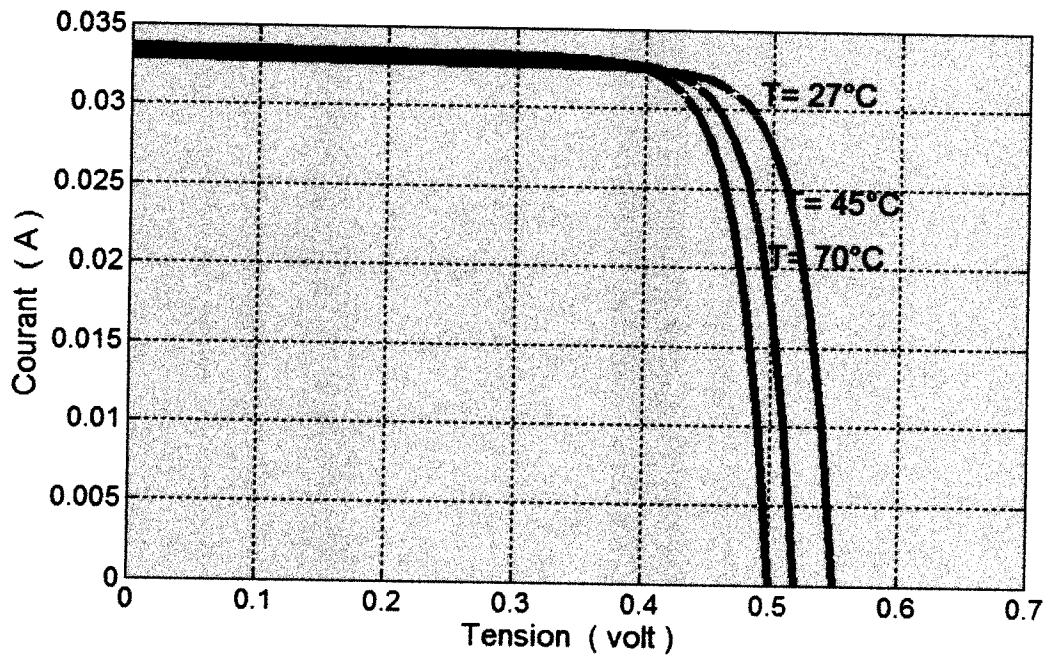


Figure II. 5: influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$

3.2 Influence de la résistance série et la résistance parallèle

✚ Résistance série

L'influence de R_s sur les caractéristiques d'une cellule est très importante aux forts niveaux de polarisation (au voisinage de V_{CO}) [2]. La technologie actuelle essaye de minimiser la valeur de R_s par un contrôle de la région éclairée, de la géométrie de la cellule et de la concentration d'impuretés.

✚ Résistance parallèle

La résistance parallèle (ou shunt) caractérise les pertes par recombinaison dues aux épaisseurs des régions N et P et de la zone de charge et d'espace. R_p est donc liée directement au processus de fabrication, l'existence de défaut de structures et aux états de surface. R_p affecte aussi la caractéristique $I=f(v)$ son influence est très important pour les faible niveaux de polarisation (au voisinage de I_{CC}). [2]

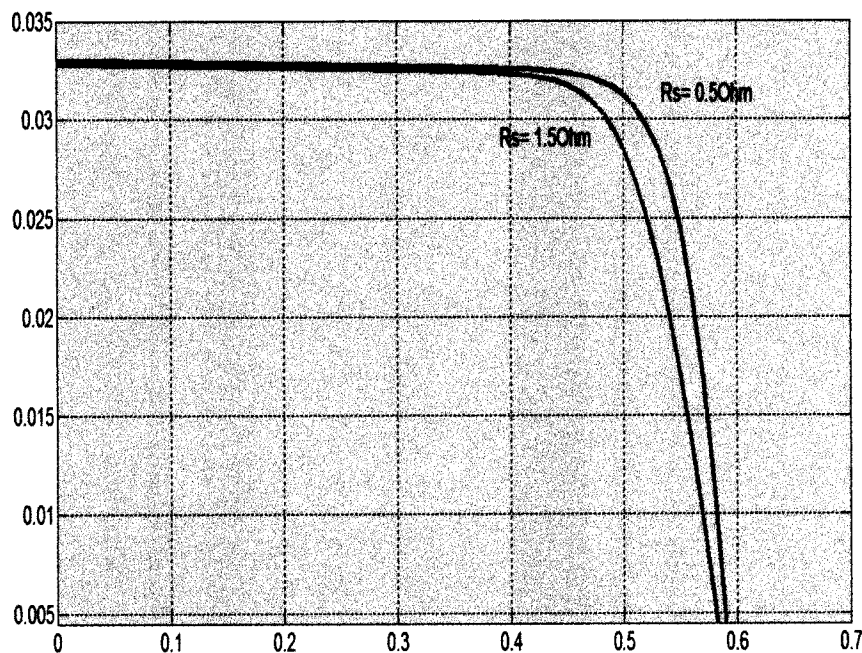


Figure II. 6: influence de R_S sur la caractéristique $I=f(V)$

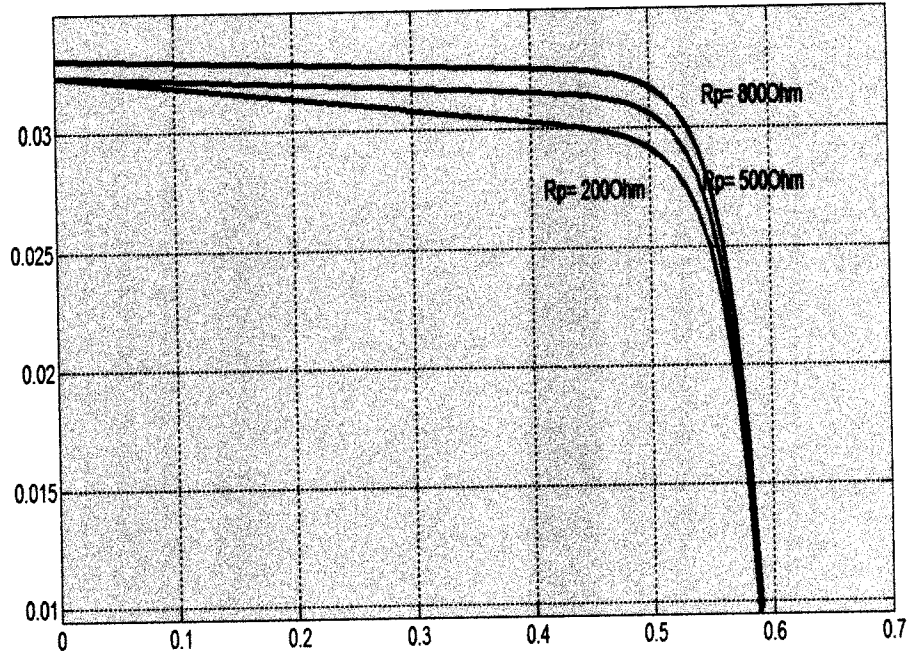


Figure II. 7: influence de R_P sur la caractéristique $I=f(V)$

II.4 Groupement des cellules solaires

4.1 Module photovoltaïque

Le modèle utilisé pour simuler les performances du module PV (groupement en série de n cellule identiques) est déduit du modèle de la caractéristique d'une cellule solaire par l'équation suivante [3]:

$$I' = I_{ph} - I_0 \left(\exp \frac{q(V'+R_{se}I')}{nAKT} - 1 \right) - \frac{V'+R_{se}I'}{R_{pe}} \quad \text{II.10}$$

Avec R_{Se} et R_{Pe} résistance série et parallèle du module défini par :

$$R_{Se}=n R_S \quad \text{et} \quad R_{Pe}=n R_P \quad V'=n V \quad \text{II.11}$$

Nous avons choisis le module photovoltaïque du type **KD140GH-2PU** de marque **KYOCERA** dont les caractéristiques techniques sont résumées par le tableau II.1.

Type de module PV	KD140GH-2PU
Puissance maximale	140 W
Tension maximale	1000 V
Tension de circuit ouvert	22.1 V
Courant de court circuit	8.68 A
Rendement	13.9 %
Nombres de cellule par module	
	36
Dimensions (longueur*largeur*épaisseur)	
	1500*668*46 mm
Poids	
	12.5 kg

Tableau II. 1 : caractéristiques du générateur PV [13]

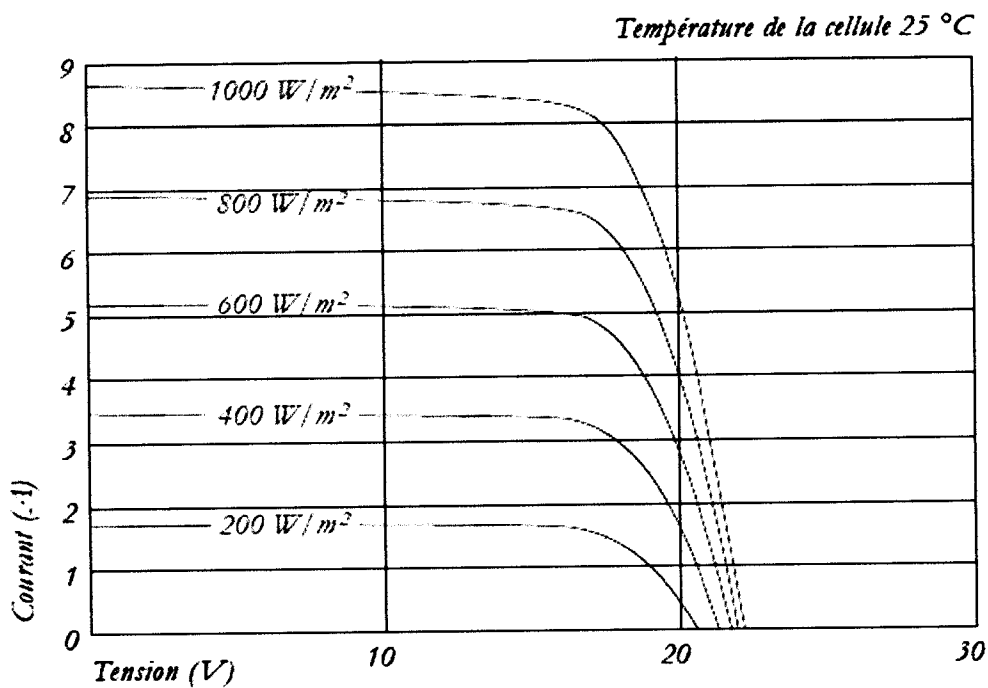


Figure II. 8: influence du flux sur la caractéristique $I=f(V)$ d'un module KD140GH-2PU

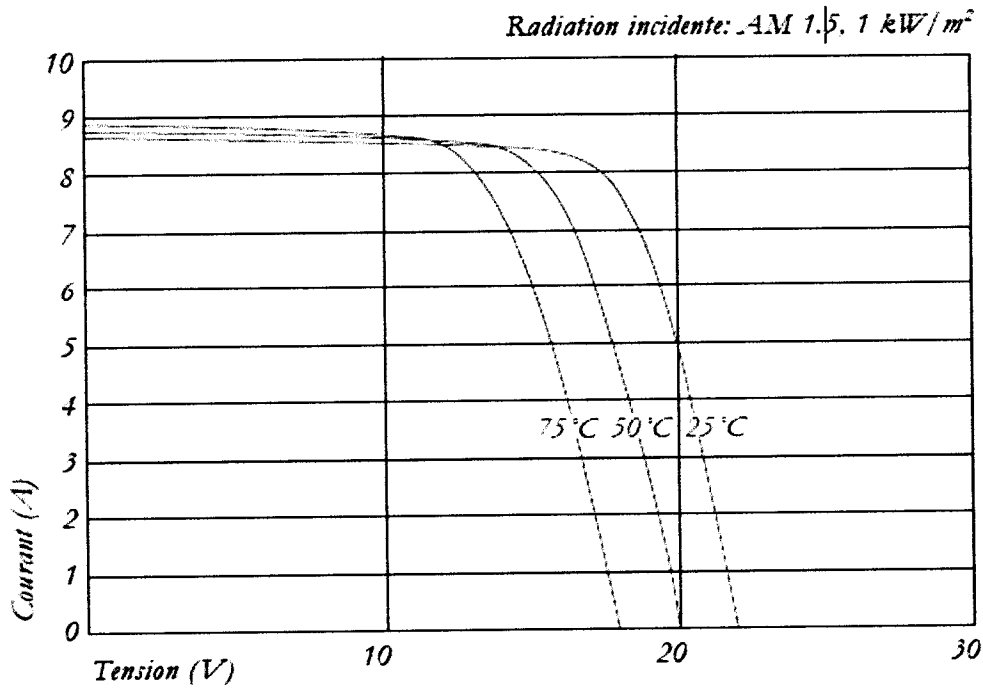


Figure II. 9: influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$ d'un module KD140GH-2PU

4.2 Panneau photovoltaïque

La modélisation d'un panneau composé N_s modules en série et N_p modules en parallèle est [3]:

$$I = N_p \cdot I_{ph} - N_p \cdot I_0 \left(\exp \frac{q(V+R_{se}I)}{nAKTN_s} - 1 \right) - N_p \cdot \frac{V+R_{se}I}{R_{pe}} \quad \text{II.12}$$

Avec R_{se} et R_{pe} résistance série et parallèle du module défini par :

$$R_{se} = n \frac{N_s}{N_p} R_s \quad \text{et} \quad R_{pe} = n \frac{N_s}{N_p} R_p \quad \text{II.13}$$

II.5 Modélisation du générateur PV

La puissance 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, elle est exprimée par la relation donnée par [4] :

$$P_{gen} = \eta_{gen} * A_c * E_S \quad \text{II.14}$$

Tel que :

A_c : La surface totale de captation du générateur photovoltaïque (m²).

η_{gen} : Le rendement du générateur photovoltaïque.

E_S : Irradiation solaire globale du lieu considéré (W/m²).

Le rendement d'un générateur photovoltaïque est calculé par l'équation suivante [12]:

$$\eta_{gen} = \eta_{mod} * \eta_{dc/ac} * N_{mod} * P_f \quad \text{II.15}$$

$$\eta_{mod} = \eta_{ref} \{1 - \beta(T_c - T_{ref})\} \quad \text{II.16}$$

Avec ; β : coefficient tenant compte de la variation du rendement du module photovoltaïque en fonction de la température, qui est pris à 0.0045°C, [12]

η_{ref} : rendement de référence du générateur photovoltaïque,

$\eta_{dc/ac}$: rendement du convertisseur CC/CA (ce rendement est à égale à 0,95) [4],

T_c : température de la cellule °C,

P_f : facteur de remplissage du module, égale à 0,9. [4]

II.6 Potentiel solaire

Pour évaluer le potentiel solaire du site, des mesures de l'irradiation solaire (irra) ont été prises sur le site de Tlemcen par l'ONM. La moyenne mensuelle du rayonnement quotidienne sur l'horizontale pour chacun des douze mois de l'année est donnée dans le tableau II.2 et le diagramme II.10 :

Mois	Jan	fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aou	Sep	Oct	Nov	Déc	Irra. moy
Irra Moy	127.4	162.7	156.9	172	167	231.6	239.7	216.7	194.4	182.1	128.8	177.1	179.7

Tableau II. 2: Irradiation solaire moyenne mensuelle

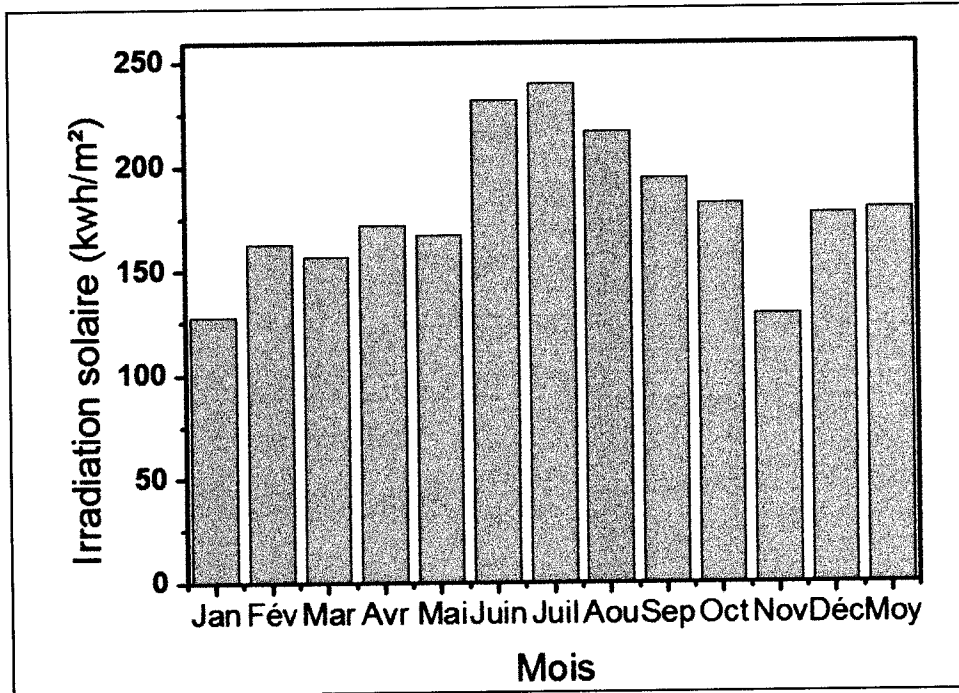


Figure II. 10: Représentation de l'irradiation moyenne

On observe sur le profil annuel d'irradiation pour le lieu envisagé qu'il existe une variation saisonnière marquée au niveau de l'irradiation solaire (plus importante en été).

III. LA MODELISATION D'UNE TURBINE EOLIENNE

III.1 Modélisation de la distribution des vitesses du vent

La distribution la plus utilisée, pour modéliser la vitesse du vent est la distribution de Weibull à deux paramètres, qui prend en compte l'asymétrie des données empiriques [5]. Elle est donnée par :

$$f(V) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right] \quad \text{II.17}$$

$f(V)$: Fonction de distribution de la vitesse du vent

k : est le facteur de forme et C : est le facteur d'échelle

La distribution de Weibull a été appliquée au site de Tlemcen : Généralement les vitesses sont mesurées des stations de l'ONM (Office National de la Météorologie). L'évolution de la vitesse moyenne mensuelle du vent sur le site de Tlemcen est présentée sur la figure ci-dessous :

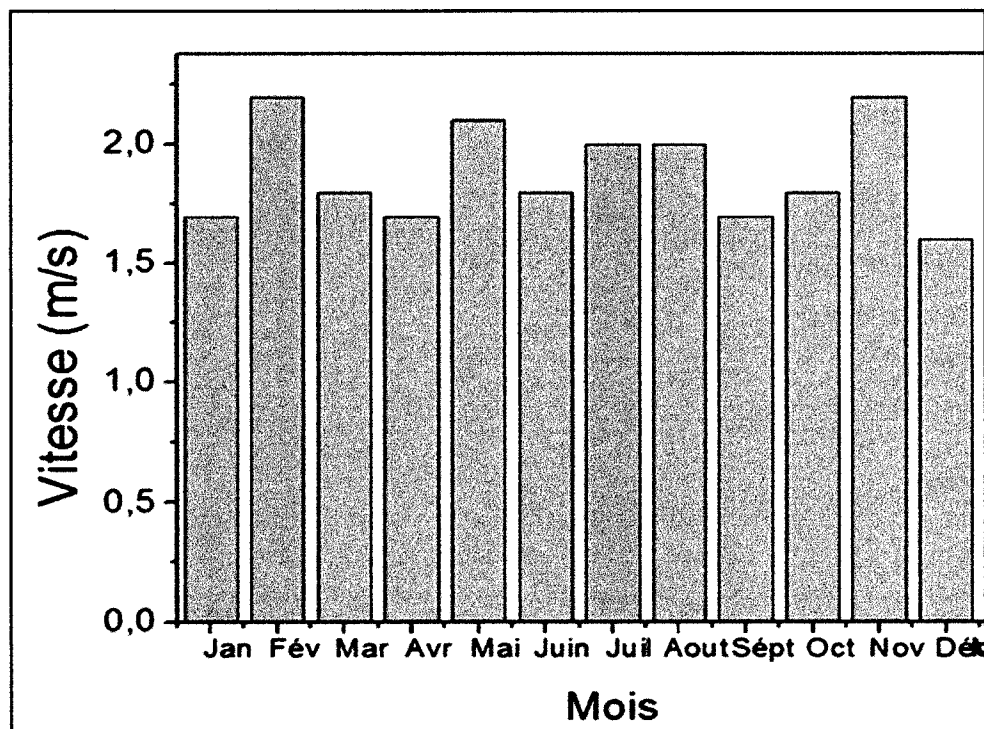


Figure II. 11: Représentation des vitesses moyennes mensuelles

Quand on veut utiliser l'énergie éolienne, il faut savoir quelles sont les places appropriées. La vitesse de vent de site de Tlemcen varie sensiblement d'un mois à un autre.

Pour illustrer l'étude, une turbine est choisie de marque IMEX-Blade 1300. C'est une turbine à axe vertical (intègre les deux technologies Darrieus et Savonius) dont les caractéristiques techniques sont résumées par le tableau II.3.

1300	1	2	14
------	---	---	----

Tableau II. 3 : caractéristiques techniques d'IMEX-Blade 1300

La distribution de Weibull caractérisée par le paramètre de forme (k) et d'échelle (C) a été appliquée au site de Tlemcen :

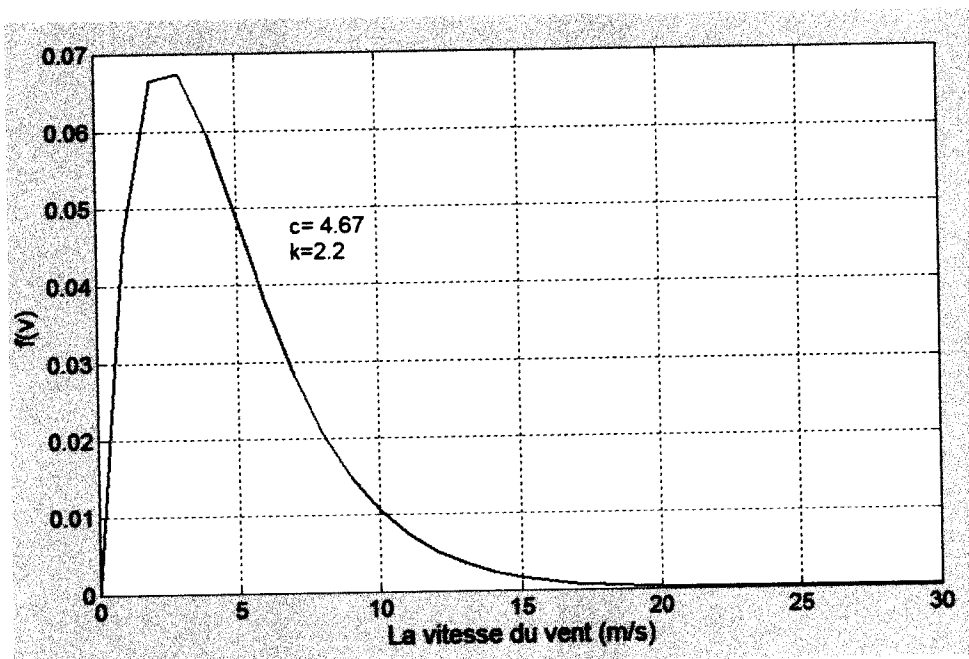


Figure II. 12: Distributions de Weibull site de Tlemcen

On constate que la courbe est une asymétrique et atteint un maximum pour une certaine valeur de la vitesse de vent et qu'elle décroît avec l'augmentation de la vitesse jusqu'à s'annuler complètement.

Toutefois les aérogénérateurs sont tous presque installés à des hauteurs supérieures à 10m (typiquement de 12 à 30 m). Pour cela il est intéressant de connaître la vitesse moyenne du vent à des altitudes plus élevées et extrapoler K et C en utilisant les équations déjà citées avant. (éq. I.19, I.20)

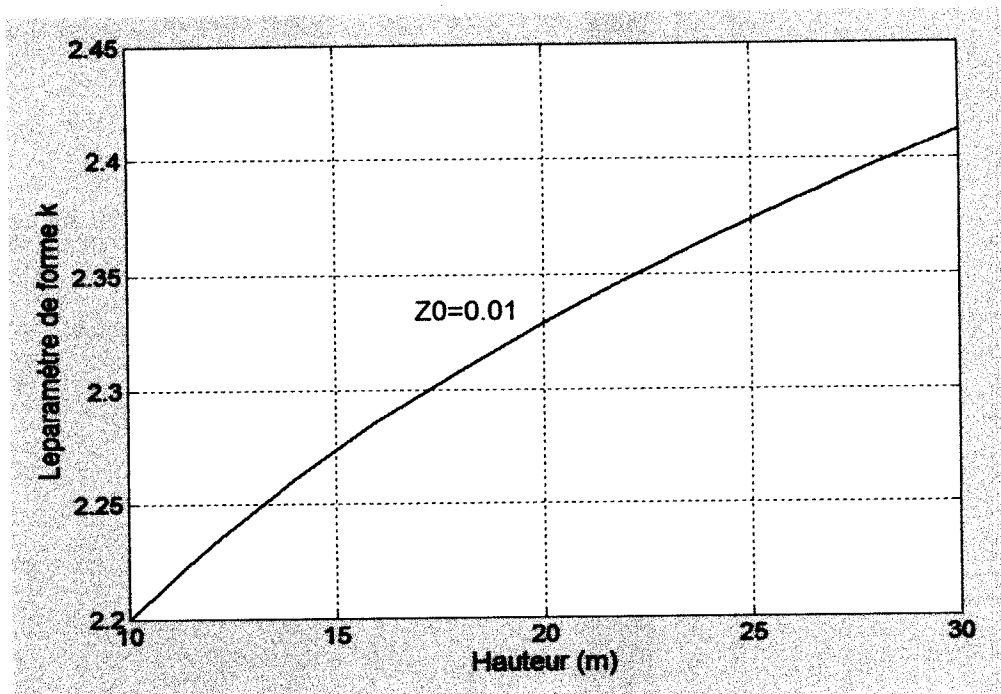


Figure II. 13: Variation du paramètre k avec la hauteur

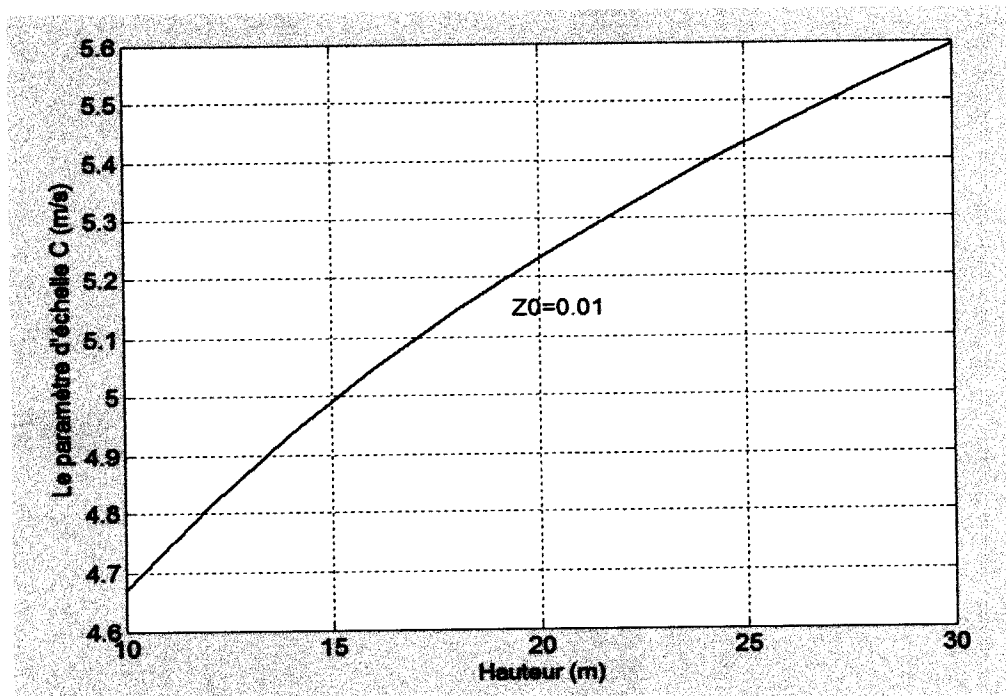


Figure II. 14: Variation du paramètre C avec la hauteur

L'extrapolation verticale du paramètre de forme k montre que celui-ci augmente avec la hauteur (Figure II.13) pour une rugosité de 0.01 mètres ce qui est logique.

Par contre l'extrapolation verticale du paramètre d'échelle C avec la hauteur (Figure II.14) montre un changement rapide près du sol où l'effet des frottements au sol se manifeste. Ce dernier est faible pour faible rugosité, et augmente avec rugosité du sol grande.

Le tracé de la vitesse moyenne (Figure II.13) en fonction de la hauteur (Figure II.14) montre que la vitesse moyenne ne cesse d'augmenter avec la hauteur parce que le site de Tlemcen est un terrain plat et espacé. La vitesse moyenne du vent augmente sans cesse même au delà de 30 mètres, à l'inverse d'un site montagneux où la vitesse moyenne du vent atteint un seuil de stabilité rapidement à cause des obstacles.

Site	K	C
Tlemcen	2.2	4.67

Tableau II. 4: Caractéristiques du site de Tlemcen

III.2 La puissance moyenne annuelle fournit par aéro-générateur

Étant donné que [6]:

- ✓ la vitesse du vent est variable
- ✓ et que chaque machine éolienne est caractérisée par la vitesse de démarrage V_D , une vitesse nominale V_N et une vitesse d'arrêt V_M spécifiques, la puissance éolienne utilisable est donnée par la relation suivante [7] :

$$\begin{cases} \alpha + \beta V_d + \gamma V_d^2 = 0 \\ \alpha + \beta V_n + \gamma V_n^2 = P_n \\ \alpha + \beta(V_d + V_n) + \gamma(V_d + V_n)^3 = P_n \left(\frac{(V_d + V_n)}{V_n} \right)^3 \end{cases} \quad \text{II.18}$$

Avec α, β et γ déterminés par les conditions suivantes :

$$\bar{P} = \int_0^\infty P(V)f(V)dV \quad \text{II.19}$$

$$P(V) = \begin{cases} 0 & \text{Si } V < V_d \\ \alpha + \beta V + \gamma V^2 & \text{Si } V_d < V < V_n \\ P_n & \text{Si } V_n < V < V_m \\ 0 & \text{Si } V > V_m \end{cases} \quad \text{II.20}$$

$P(V)$: Fonction de puissance de l'aéro-générateur

$f(V)$: Fonction de distribution de la vitesse du vent

$$f(V) = \left(\frac{k}{C}\right) \left(\frac{V}{C}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{V}{C}\right)^k\right] \quad \text{II.21}$$

k : est le facteur de forme et C : est le facteur d'échelle

On obtient après intégration de la relation :

$$\bar{P} = \int_{v_i}^{v_n} (\alpha + \beta V + \gamma V^2) \frac{k_1}{C_1} \left(\frac{V}{C_1}\right)^{k_1-1} \exp\left[-\left(\frac{V}{C_1}\right)^{k_1}\right] dV + \int_{v_i}^{v_n} P_n \frac{k_1}{C_1} \left(\frac{V}{C_1}\right)^{k_1-1} \exp\left[-\left(\frac{V}{C_1}\right)^{k_1}\right] dV \quad \text{II.22}$$

Donc l'expression finale donnant la puissance produite par un aérogénérateur est :

$$\bar{P} = \int_{v_i}^{v_n} (\alpha + \beta V + \gamma V^2) \frac{k_1}{C_1} \left(\frac{V}{C_1}\right)^{k_1-1} \exp\left[-\left(\frac{V}{C_1}\right)^{k_1}\right] dV + P_n \left[\exp\left[-\left(\frac{v_n}{C_1}\right)^{k_1}\right] - \exp\left[-\left(\frac{v_m}{C_1}\right)^{k_1}\right] \right] \quad \text{II.23}$$

La courbe de puissance de l'aérogénérateur choisi est donnée par la figure ci-dessous. Elle est utilisée pour calculer la puissance horaire produite.

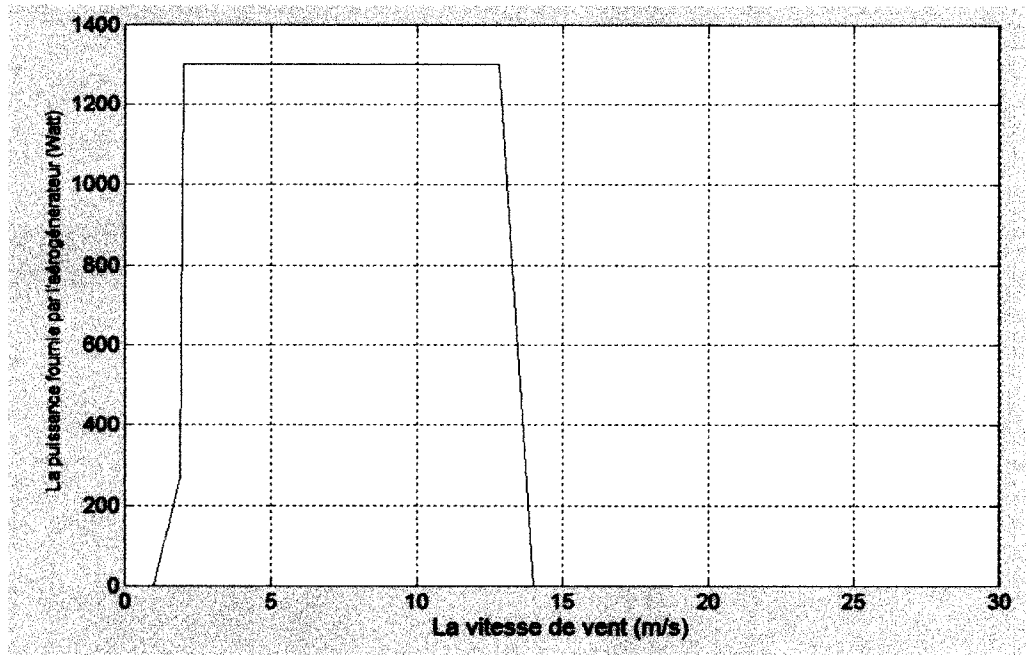


Figure II. 15 : Variation de la puissance fournie par l'éolien en fonction de la vitesse de vent

IV. MODELISATION DE LA BATTERIE

Les paramètres électriques suivants sont employés pour caractériser une batterie [11] :

- la capacité nominale C_{batmax} est le nombre maximal d'ampères-heures (Ah) qui peut être extraite de la batterie, dans des conditions de décharge prédéterminées.
- l'état de charge SOC (State of charge) à l'instant t est le rapport entre la capacité présente et la capacité nominal à l'instant t :
 $SOC(t) = C_{bat}(t) / C_{batmax}(t)$ ($0 \leq SOC \leq 1$).
 Si $SOC=1$, la batterie est totalement chargée. Si $SOC=0$, la batterie est totalement déchargée.
- Le régime de charge (ou décharge) est le paramètre qui reflète le rapport entre la capacité nominale d'une batterie et le courant auquel celle-ci est chargée (ou déchargée).

Dans le but de prévenir les décharges profondes la charge de l'accumulateur est maintenue dans une certaine plage [8]. Cette plage est définie par :

$$C_{batmin}(t) \leq C_{bat}(t) \leq C_{batmax}(t) \quad \text{II.24}$$

Avec $C_{batmin} = DOD \cdot C_{bat}$

DOD est la profondeur de décharge de la batterie, pris égal à 0,5.

Les processus de charge et de décharge de la batterie sont donnés respectivement par :

$$C_{bat}(t) = C_{bat}(t-1) + [(P_{tot}(t) - P_{cha}(t)) + P_{ge}(t)] \eta_{ac/de} \eta_{cha} \Delta t \quad \text{II.25}$$

$$C_{bat}(t) = C_{bat}(t-1) + (P_{tot}(t) - P_{cha}(t)) \Delta t / \eta_{ac/de} \eta_{decha} \quad \text{II.26}$$

Où : η_{cha} : est le rendement pendant la charge de la batterie

η_{decha} : est le rendement pendant la décharge de la charge

$C_{bat}(t)$ est la capacité C_{bat} de la batterie à l'instant t

$C_{bat}(t - 1)$ est la capacité C_{bat} de la batterie à l'instant $t-1$

Lorsque $t=0$, $C_{bat}(t - 1)$ est la capacité initiale de la batterie.

Le modèle suivant, décrit la relation entre le voltage, courant et l'état de charge .Ce modèle basé sur le schéma électrique de la figure suivant :

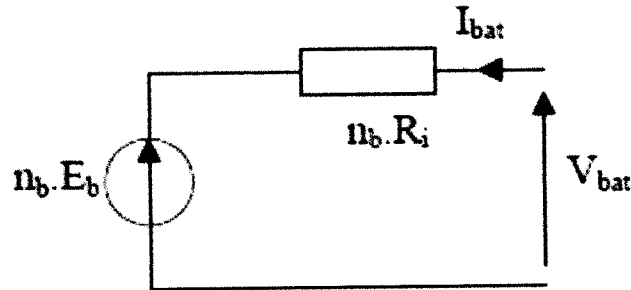


Figure II. 16: Schéma électrique équivalent de n_b élément de batterie en série

Pour n_b batteries en série, nous pouvons écrire l'équation [9]:

$$V_{co}(t) = VF + b \cdot \log(SOC(t)). \quad \text{II.27}$$

Où VF est la force électromotrice, b est une tension empirique

Pour une batterie de plomb acier, les paramètres sont regroupés dans le tableau suivant [8]:

Paramètre	Mode de charge	Mode de décharge
VF	13.250 V	12.662 V
B	0.810	0.724

Tableau II. 5: les paramètres de la batterie de plomb acier

La variation de V_{co} en fonction de l'état de charge (SOC) est représentée par la figure suivante :

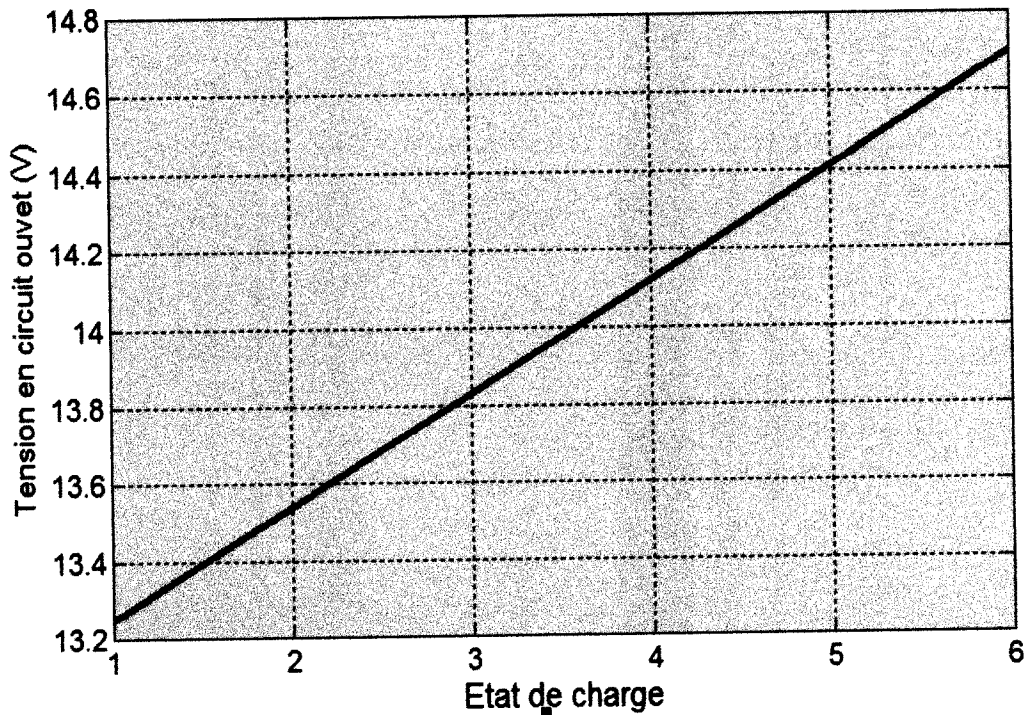


Figure II. 17: Variation de tension en mode de charge en fonction de l'état de charge.

V. MODELISATION DE L'ONDULEUR

Un onduleur est un dispositif d'électronique de puissance permettant de délivrer des tensions et des courants alternatifs à partir d'une source d'énergie électrique continue. C'est la fonction inverse d'un redresseur. L'onduleur est un convertisseur de type continu/alternatif.

V.1 La puissance nominale

C'est la puissance exprimée en VA que le convertisseur est capable de délivrer en fonctionnement permanent. Théoriquement, le choix de la puissance à délivrer doit être la somme des puissances des équipements installés ou à installer, mais en pratique, il est rare que tous les appareils fonctionnent en même temps et le choix de la puissance nominale résultera de la valeur maximale du profil moyen de la consommation [1].

V.2 Le rendement

C'est un critère très important, car il influe sur le dimensionnement du champ PV et de la batterie. Celui-ci varie en fonction du taux de charge (rapport de la puissance de sortie et de la puissance nominale), ainsi que la variation de ce rendement varie d'un onduleur à un autre. Le rendement de l'onduleur est aussi donné entre l'énergie consommée par la charge et l'énergie fournie par la source continue [1].

$$\eta_{ond} = a(1 - \exp(b \cdot T_{charge})) \quad \text{II.28}$$

Où a,b sont des constantes (a= 0.9559 ; b= -6.9164)

T_{charge} : taux de charge donné par :

$$T_{charge} = \left(\frac{P_{sortie}}{P_n} = \frac{P_{charge}}{P_n} \right) \quad \text{II.29}$$

P_n : la puissance nominale de l'onduleur.

P_{charge} : puissance à la sortie de l'onduleur (puissance de la charge).

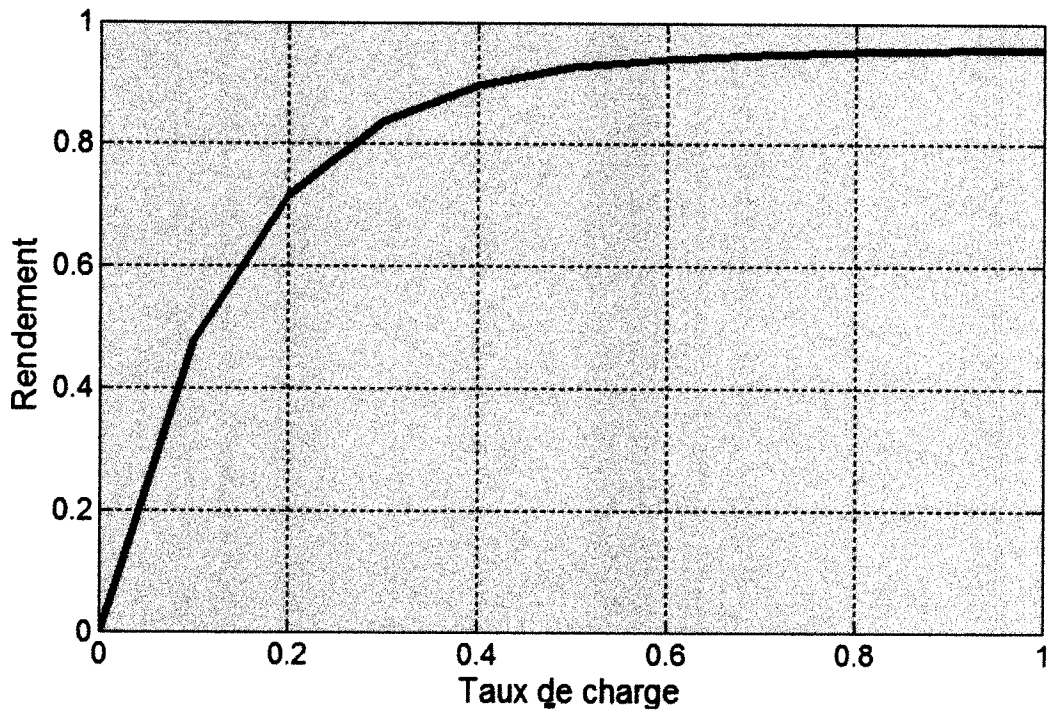


Figure II. 18: Rendement de l'onduleur

VI. CONCLUSION

La modélisation de chaque composant du système hybride photovoltaïque-éolienne complet (champ photovoltaïque, éolienne, onduleur, stockage batteries) est une étape essentielle permet d'introduire un certain nombre de modèles puis évaluer la caractéristique de chaque élément de l'installation ainsi les paramètres constituants.

Référence bibliographique

[1]: M. Belhadj « *Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome* » thèse de magister Université de Bechar, 2008.

[2]: F Benyarou « *conversion des énergies* » document de cours (EN01), Université de Tlemcen 2001-2002

[3]: N.Benmeddah « *Modélisation d'un panneau photovoltaïque* » Mémoire de DES, université de Tlemcen ,1999

[4]: Musseli, M.Notton, G.& Louche, A. « *Design of hybrid-photovoltaic power generator, with optimization of energy management* », Solar Energy, vol65, No 3, 1999, pp.143-157.

[5]: A. Kaabeche, M. Belhamel, R. Ibtouen, S. Moussa et M. R. Benhaddadi « *Optimisation d'un système hybride (éolien-photovoltaïque) totalement autonome* » Revue des énergies renouvelables Vol. 9 N°3 (2006) 199-209.

[6]: L. MERAD, B. BENYOUCEF et Jean Pierre CHARLES « *Etude technico économique d'un système hybride (aérogénérateur et moteur diesel) pour la production d'électricité* » (18) Afrique SCIENCE 02(2) (2006) 187 – 197 ISSN 1813-548X Mai 2006.

[7]: R. Maouedj1, S. Bousalem2 et B. Benyoucef2 « *Optimisation d'un système de pompage éolien Application aux sites sahariens* » Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°2 (2008) 239– 250 239 Juin 2008)

[8]: Olivier GERGAUD « *Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur* » thèse de doctorat de l'école normale supérieure de CACHAN, 2002

[9]: Chaurey, C and S Deambi. 1992, « *Battery storage Power systems: an overview* ».Renewable Energy 2 (3):227-235.

[10]: A. Zerga, F. Benyarou et B. Benyousef « *Optimisation du rendement d'une cellule solaire NP au silicium monocristallin* » *Revue Energie Renouvelable : physique Energétique* (1998 pp.95-100).

[11]: F. Beghdadi « *Modélisation et simulation des performances d'une installation hybride de conversion d'énergies renouvelables* » thèse de magister Université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2011.

[12]: Lonel. Vechiu « *Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome* » thèse de Doctorat Université du Havre, 2005.

[13]: www.kyocerasolar.de

[14]: www.imex-cgi.fr

Chapitre III:

Optimisation et dimensionnement de système

Chapitre III:

hybride PV éolien

I. INTRODUCTION

L'étude de dimensionnement est toujours confrontée par deux critères essentiels qui sont le gisement solaire, le gisement éolien et la demande de l'énergie. Cette gestion d'énergie s'appuie sur l'intelligence des dispositifs de régulation et de contrôle utilisés.

Nous présentons dans ce travail une méthode qui permet de déterminer le triplet optimal (facteur de charge, nombre de modules PV, nombre de générateur éolien) qui correspond à un bon fonctionnement du système avec un coût minimal d'un système hybride photovoltaïque/éolien. 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 (défini comme étant le mois qui nécessite la plus grande utilisation de la surface du générateur photovoltaïque/éolien).

II. METHODE DE DIMENSIONNEMENT DU SYSTEME

L'énergie mensuelle produite par le système par unité de surface est notée $E_{pv,m}$ (kWh/m²) pour le photovoltaïque et $E_{el,m}$ (kWh/m²) pour l'éolien (où m représente le n° du mois de l'année). L'énergie électrique produite par un générateur photovoltaïque est donnée par [1]:

$$E_{pv} = \eta_{gen} * A_c * E_s * P_f \quad \text{III.1}$$

Où : A_c représente la surface totale du générateur photovoltaïque (m²), η_{gen} est le rendement du générateur photovoltaïque, E_s est l'irradiation solaire sur plan incliné (kWh/m²) et $P_f = 0.9$ représente le facteur de remplissage du module.

La puissance produite par le générateur éolien est exprimée par :

$$P_{el} = 1/2 C_p \rho A V^3 \quad \text{III.2}$$

où A est la surface traversée par le vent (m^2); $\rho = 1.225kg/m^3$ est la densité de l'air; V (m/s) est la vitesse du vent et C_p est le coefficient de performance de la turbine éolienne, il ne peut théoriquement pas dépasser la limite de Betz soit : $C_{p-limite} = 0.593$.

Le mois le plus défavorable est en 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:

$$A_i = \max \left(\frac{E_{L,m}}{E_{i,m}} \right) \quad \text{III.3}$$

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:

$$E_{pv} . A_{pv} + E_{el} . A_{el} = EL \quad \text{III.4}$$

$$\text{Avec} \quad E_{pv} . A_{pv} = f . EL \quad \text{III.5}$$

$$E_{el} . A_{el} = (1 - f) . EL \quad \text{III.6}$$

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 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.

II.1 Méthode des moyennes mensuelles annuelles

Dans cette méthode, la taille du générateur photovoltaïque et éolien est tirée des valeurs moyennes annuelles de chaque contribution nommée $\overline{E_{pv}}$, $\overline{E_{el}}$ (pour un mois). De la même manière, la charge est représentée par la valeur moyenne mensuelle annuelle. Par conséquent, les surfaces respectives des deux générateurs sont données par [2]:

$$A_{pv} = f \cdot \left(\frac{\overline{E_L}}{\overline{E_{pv}}} \right) \quad \text{III.7}$$

$$A_{el} = (1 - f) \cdot \left(\frac{\overline{E_L}}{\overline{E_{el}}} \right) \quad \text{III.8}$$

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

II.2 Méthode du mois le plus défavorable

Pour cette méthode, le dimensionnement des composants de chacun des deux systèmes 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 [2]:

$$A_{pv} = f \cdot \max \left(\frac{E_{L,m}}{E_{pv,m}} \right) \quad \text{III.9}$$

$$A_{el} = (1 - f) \cdot \max \left(\frac{E_{L,m}}{E_{el,m}} \right) \quad \text{III.10}$$

Dans notre cas, E_L est constante.

II.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 par les équations précédemment mentionnées. La taille (surface) réelle est calculée selon la surface de l'unité du composant ;

$$A_{i,r} = ENT \left(\frac{A_i}{A_{i,u}} \right) \cdot A_{i,u} \quad \text{III.11}$$

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

II.4 Facteur d'autonomie

Le facteur d'autonomie R est défini comme étant égal à 1 moins le rapport du nombre total d'heures où on a le déficit (HDC) au nombre total H_{tot} d'heures de fonctionnement.

$$R = 1 - \frac{HDC}{H_{tot}} \quad \text{III.12}$$

Pour un fonctionnement annuel, $H_{tot} = 8760$ heures.

II.5 Taille de la batterie

La taille de la batterie de stockage est déterminée à partir de la charge demandée maximale $E_{L,max}$ (charge mensuelle maximale). La capacité de la batterie de stockage peut être exprimée par:

$$C_{bat} = \frac{E_{L,max} * 1000H * \Delta t}{V_{sys} * N_m} \quad \text{III.13}$$

Où : V_{sys} est la tension du système; N_m le nombre de jours du mois le plus défavorable; Δt représente la durée relative en jours à l'autonomie demandée, qui est définie par le concepteur.

La capacité réelle de la batterie est déterminée à partir de la capacité d'une unité de batterie $C_{bat,u}$ comme pour le cas des surfaces des générateurs photovoltaïque et éolien.

$$C_{bat} = ENT \left(\frac{C_{bat}}{C_{bat,u}} \right) \cdot C_{bat,u} \quad \text{III.14}$$

II.4 Analyse économique du système

La méthode de dimensionnement consiste à déterminer le triplet optimal (f , A_{pv} , A_{el}) qui correspond à un bon fonctionnement du système avec un coût minimal. C'est pour cela que nous avons évalué le coût de chaque configuration. Une telle analyse nécessite des données précises sur le prix des différents éléments du système.

Pour simplifier, seulement les coûts capitaux des composantes C_i sont considérés dans cette étude (on n'a pas tenu compte du coût des câbles et les autres accessoires). Le coût total du système est donné par la relation suivante :

$$C_{tot} = C_{pv} + C_{el} + C_b \quad \text{III.15}$$

III. APPLICATION DANS UN SYSTEME HYBRIDE EOLIEN/PV

Dans cette étape de calcul, nous appliquons notre méthode pour déterminer la taille de système photovoltaïque A_{pv} et la surface de l'aérogénérateur A_{el} ; elle dépend essentiellement des données climatiques et/ou de l'estimation du nombre de jours consécutifs de faibles ressources climatiques (vent, irradiation solaire etc...), qui correspond à un bon fonctionnement du système avec un coût minimal.

III.1 Méthodologie adoptée

La méthode adoptée pour ce cas étudié est la suivante :

- Les données climatiques qui sont l'irradiation solaire et la vitesse du vent
- Le choix d'un profil de consommation d'énergie électrique représentatif du site.
- La détermination du mois le plus défavorable
- La simulation du fonctionnement du système pour chaque mois de toute l'année avec la détermination de la taille des composantes du générateur SEH, en utilisant les deux méthodes (les moyennes mensuelles du mois le plus défavorable).

- la détermination du triplet optimal (f , A_{pv} , A_{el}) qui correspond à un bon fonctionnement du système avec un coût minimal.

L'optimisation d'une installation hybride photovoltaïque-éolien nécessite au préalable l'acquisition de certaines données relatives aux équipements existants:

a) Les paramètres du module Photovoltaïque :

- Le coût de module Photovoltaïque: 18500 DA.
- La surface S_{pv} $S=1,2 \text{ m}^2$

b) Les paramètres de l'aérogénérateur :

- La puissance nominale 1300 watts.
- Le coût est de 60000DA.
- surface S_{el} est de $0,65 \text{ m}^2$

c) Les paramètres de la batterie :

- La capacité nominale 235(Ah).
- Le minimum de charge 20%.
- Le coût de la batterie est de 13000 DA.

III.2 Besoins électriques journaliers de la charge

La consommation journalière adoptée dans cette étude est considérée identique pour tous les jours de l'année de l'ordre de 2kWh et correspond au profil de consommation d'une petite agglomération située à Tlemcen.

IV. RESULTATS ET DISCUSSION

La méthode de dimensionnement présentée dans ce travail est utilisée pour calculer la taille de module photovoltaïque et la surfaces de l'aérogénérateur dans un système hybride photovoltaïque-éolien de production d'électricité totalement autonome au site de Tlemcen. Des données mensuelles de la vitesse du vent et de l'irradiation solaire mesurée par L'ONM du site de Tlemcen de l'année 2011 (office National de la Météorologie de Tlemcen) [figure II.10 et figure II.11]. La consommation journalière adoptée dans cette étude est de l'ordre de 2 kWh par jour.

Le tableau 1 montre la production énergétique mensuelle des composants du système hybride étudié et la taille de chaque composant nécessaire pour satisfaire la charge de consommation considérée.

Mois	Irradiation mensuelle (kWh/m ²)	E _{pv} mensuelle (KWh/m ²)	E _{el} mensuelle (KWh/m ²)	EL (kWh)	A _{pv} (m ²)	A _{el} (m ²)
Janvier	127.4	4.78	12.38	62	13.1	5.1
Février	162.72	6.106	18.57	60	9.9	3.2
Mars	156.96	5.89	13.54	62	10.53	4.57
Avril	172.08	6.45	12.38	60	9.3	4.8
Mai	167.04	6.26	17.02	62	9.37	3.65
Juin	231.60	8.86	13.54	60	6.75	4.4
Juillet	239.760	8.99	17.02	62	7.00	3.71
Aout	216.72	8.13	11.99	62	7.62	5.1
Septembre	194.40	7.29	13.54	60	8.2	4.4
Octobre	182.16	6.83	17.41	62	9.15	3.59
Novembre	128.88	4.83	11.60	60	12.4	5.1
Décembre	177.12	6.64	13.54	62	9.36	4.57
Moyenne Mensuelle	179.72	6.74	14.377	61.667	9.15	4.289

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

IV.1 Méthode 1 : les moyennes mensuelles annuelles

Dans cette méthode, nous avons déterminé les surfaces des panneaux photovoltaïques et de l'aérogénérateur à partir des équations III.7 et III.8.

Les résultats de simulation pour la première méthode sont donnés dans les figures (les valeurs numériques de ces résultats sont données dans l'annexe 2) suivantes :

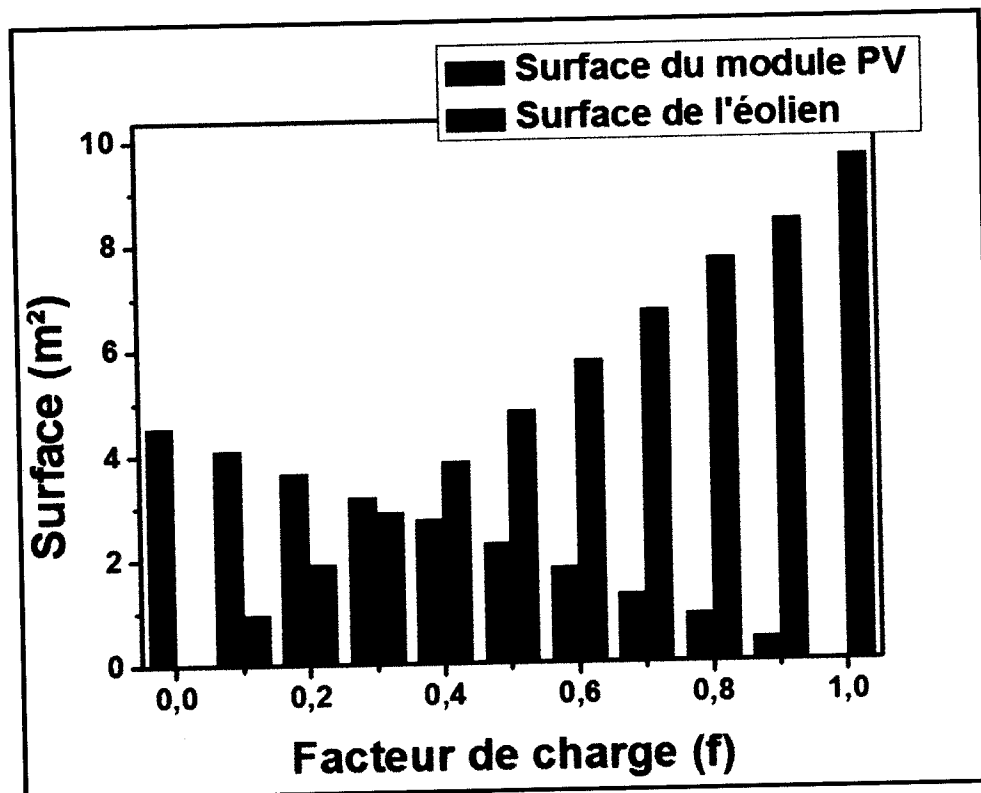


Figure III. 1 : Surfaces des panneaux PV et de l'éolienne pour la première méthode

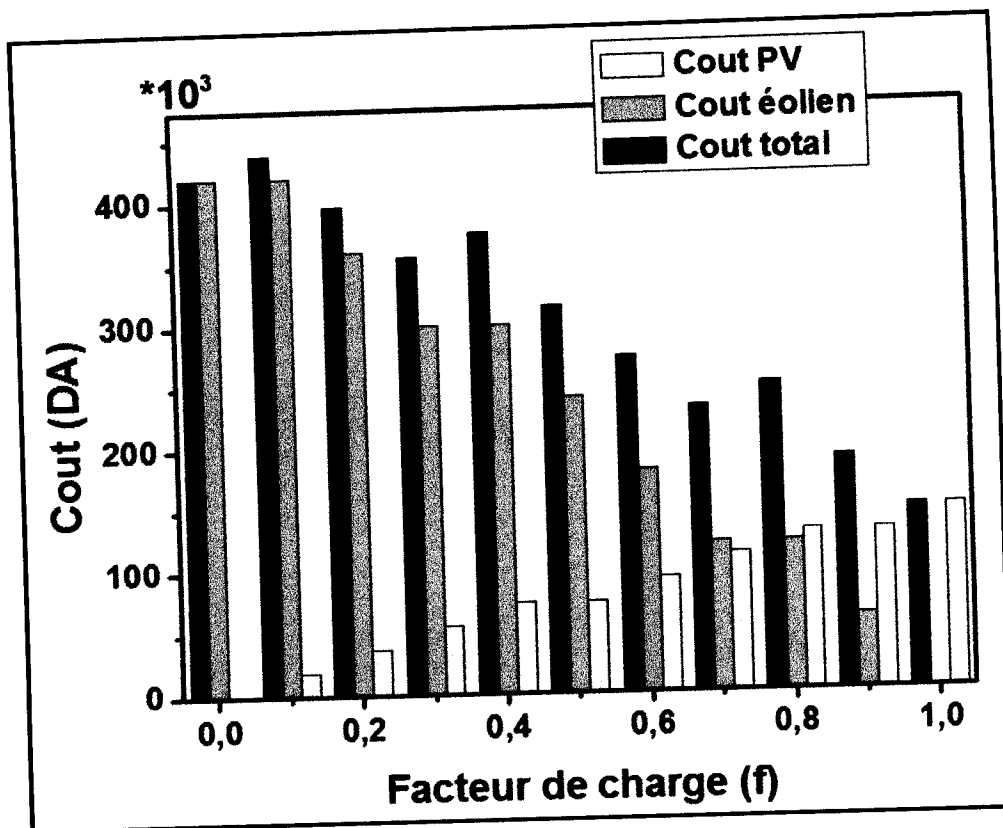


Figure III. 2: Coûts des panneaux PV et de l'éolienne pour la première méthode

Ces résultats montrent que la configuration avec un système photovoltaïque seul ($f=1$ avec 8 modules photovoltaïques ayant un coût de 148000 DA) est plus économique qu'un système éolien pur ($f=0$ avec 7 générateurs éoliens ayant un coût de 420000 DA). Quant au système hybride, le plus économique est celui qui présente $f=0,9$ (7 modules photovoltaïques et un générateur éolien) avec un coût de 189500 DA.

D'après la relation III.13, la capacité de stockage nécessaire est d'environ 9kWh (4 batteries). Elles exigent un coût d'environ 52000 DA. À partir de ces résultats le triplet optimal pour la première méthode est (0,9, 7, 1) avec une capacité de stockage de 9kWh avec un coût total de 241500 DA.

IV.2 Méthode du mois le plus défavorable

Le mois le plus défavorable est défini comme étant le mois qui nécessite la plus grande utilisation de la surface du générateur photovoltaïque/éolien. On constate, d'après le tableau III.1, que le mois le plus défavorable est le mois de janvier pour les deux sources d'énergies solaire et éolienne.

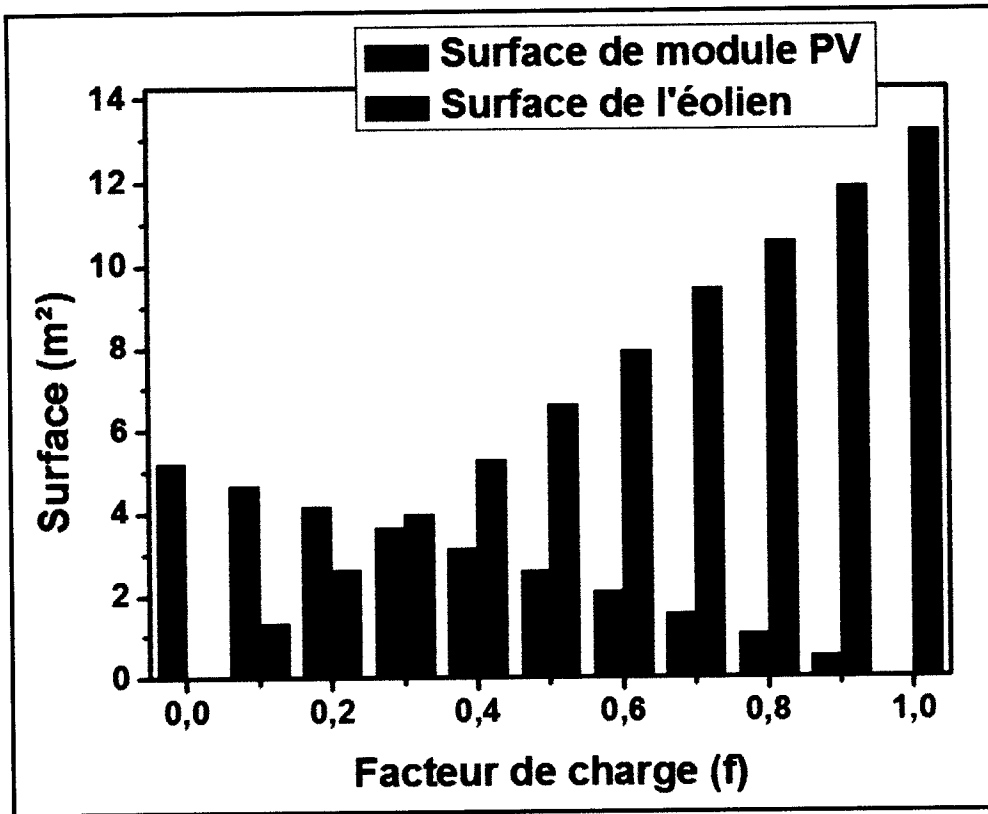


Figure III. 3: Surfaces des panneaux PV et de l'éolienne pour la deuxième méthode

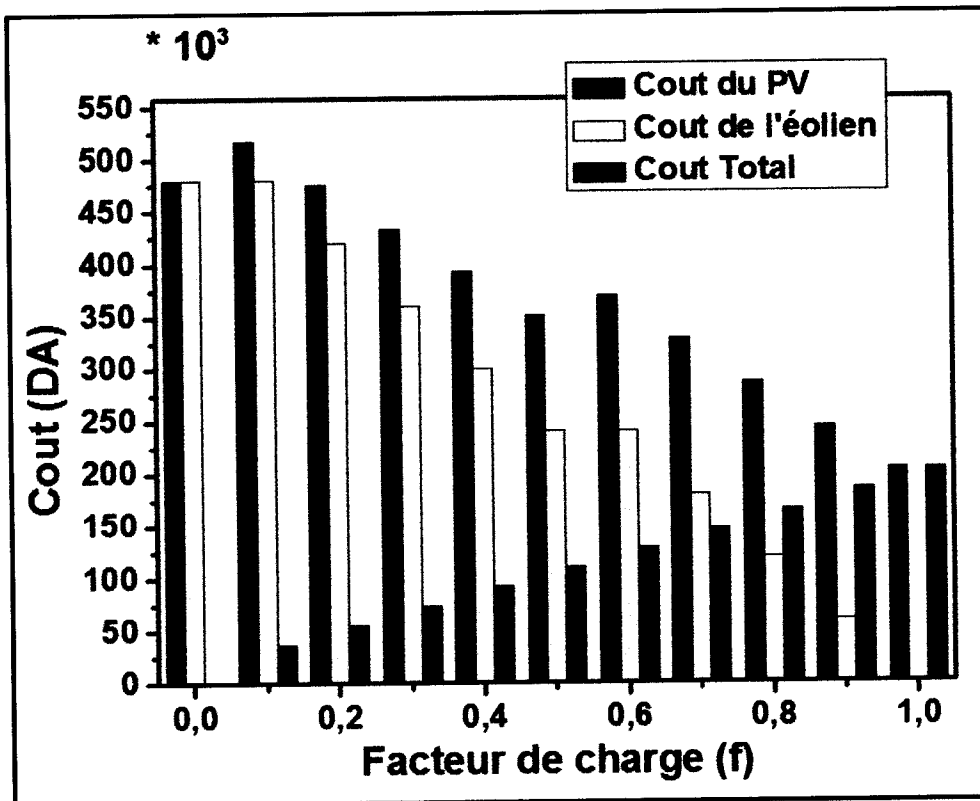


Figure III. 4: Coûts des panneaux PV et de l'éolienne et le cout total su système pour la deuxième méthode

Méthode	Avantages	Inconvénients
<i>la moyenne des valeurs mensuelles annuelles</i>	Réduit le coût total du système	Cette méthode doit exiger des données mensuelle et annuelle du site de l'installation.
<i>la méthode du mois le plus défavorable</i>	Ne nécessite pas de données météo (endroit isolé).	Un cout de système plus élevé

Tableau III. 3: Avantage et inconvénient de deux méthodes étudiées

V. CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons présenté une méthode de dimensionnement optimal du système hybride photovoltaïque-éolien basée sur les résultats d'une simulation utilisant une année de référence de la vitesse du vent et l'irradiation solaire globale journalière et une profile de charge identique pour tous les jours de l'année pour une petite agglomération au Tlemcen.

D'après les résultats de simulation, nous avons trouvé que le triplet optimal (facteur de charge, nombre de modules PV, nombre de générateur éolien) pour couvrir les besoins de la charge du système hybride photovoltaïque-éolien est de (0.9, 7, 1) avec un cout total de 189500DA.

Nous avons montré que l'utilisation d'un système éolien comme système d'appoint avec un système photovoltaïque augmente le coût du système hybride pour le site de Tlemcen.

Les résultats de l'optimisation du système avec la deuxième méthode sont représentés dans la figures III.3 et la figure III.4 (les valeurs numériques de ces résultats sont données dans l'annexe 3).

Les résultats illustrés dans la figure III.3 et la figure III.4 montrent que le coût du système est relativement élevé. La configuration la plus économique du système indiquant aussi un système photovoltaïque seule ($f=1$ avec 11 modules photovoltaïques ayant un coût de 203500 DA). Quant au système hybride, le plus économique est celui qui a le facteur $f=0.9$ (avec 10 modules photovoltaïques et un générateur éolien) avec un cout de 245000 DA.

D'après la relation III.13, la capacité de stockage nécessaire est d'environ 9kWh (4 batteries). Elles exigent un cout d'environ 52000 DA.

À partir de ces résultats le triplet optimal pour la deuxième méthode est (0.9, 10, 1) avec une capacité de stockage de 9kWh avec un cout total de 297000 DA.

	Méthode 1				Méthode 2			
	F	N _{PV}	N _{el}	Cout (DA)	f	N _{PV}	N _{el}	Cout (DA)
Configuration économique	1	8	0	148000	1	11	0	203500
Système hybride	0.9	7	1	189500	0.9	10	1	245000

Tableau III. 2: Triplets optimaux déterminés du système hybride PV-éolien pour les deux méthodes

La méthodologie présentée pour le dimensionnement et l'optimisation du système hybride utilisant les deux méthodes 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.

A partir de nos résultats, on constate qu'il y a une tendance économique favorable pour l'usage de système photovoltaïque sur l'éolien, parce que l'énergie solaire domine largement l'énergie éolienne pour le site de Tlemcen.

Référence bibliographique

[1]: M.A. ElHadidy, « *Performance Evaluation of Hybrid (Wind/Solar/Diesel) Power Systems* », *Renewable Energy*, Vol. 26, pp. 401 – 413, 2002.

[2]: H. Belmili, N. Matidji, et al « *Sizing a (photovoltaic/wind) Hybrid System* » Group of research: Hybrid system, Unit of Development of Solar Equipments (UDSE) National road N°: 11 Bou-Ismaïl LP 365, Tipaza 42415, Electronic Department, University Saad Dehleb Blida, Algiers.

[3]: 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.

[4]: A. El Khadimi, L. Bchir et A. Zeroual « *Analyse technico économique d'un système hybride (photovoltaïque/éolien) autonome pour le site d'Adrar* » *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 9, N°3 (2006) 127 - 134

Conclusion générale



Conclusion générale

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.

Notre étude a porté sur l'analyse d'un système hybride photovoltaïque-éolien de petite puissance destinée à une petite agglomération située dans une zone montagneuse aux environs de la ville de Tlemcen.

L'objectif était de déterminer le triplet optimal (facteur de charge, nombre de modules photovoltaïques, nombre de générateurs éoliens) qui correspond à un bon fonctionnement du système avec un coût minimal d'un système hybride photovoltaïque-éolien après avoir calculé la puissance mensuelle produite par le générateur éolien et par le générateur photovoltaïque pour une période d'analyse de l'année 2011 au site de Tlemcen.

Deux méthodes sont développées pour ce type de système. La taille des générateurs, photovoltaïques et éoliens, sont déterminées à partir des valeurs moyennes mensuelles des contributions de chaque composant dans la première méthode. Et dans la seconde méthode, la détermination des tailles de ces deux composants du système est basée sur le mois le plus défavorable.

Dans une première étape, nous avons défini les différents types d'énergies renouvelables et nous avons présenté leur intérêt ; par la suite nous avons étudié le principe de conversion énergétique et évalué l'apport de chaque composant du système hybride photovoltaïque-éolien.

Dans la partie de la modélisation on a présenté séparément les modèles respectifs de chaque partie du système hybride.

Dans la dernière partie nous avons développé un programme de simulation qui nous a permis de déterminer le triplet optimal (f , A_{pv} , A_{el}) avec un cout minimal.

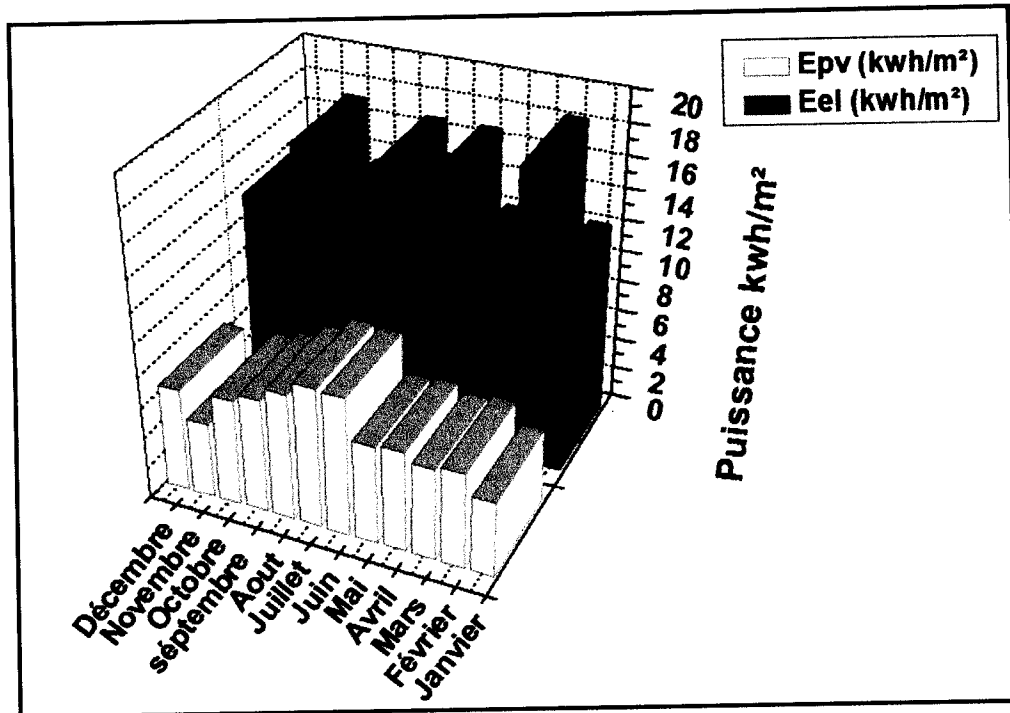
Les résultats de simulation, nous ont donnés un triplet optimal de valeurs respectives ($f=0.9$, $A_{pv}=7$, $A_{el}=1$) pour couvrir les besoins de la charge du système hybride photovoltaïque-éolien. La capacité de stockage avoisine les 9kWh pour une couverture de 7 jours. Le coût total capitalisé est estimé à 241500DA.

Nos résultats montrent que la photovoltaïque présente une variante plus favorable dans le site de Tlemcen relativement à l'éolien et cela par les deux méthodes utilisées. La méthode du mois le plus défavorable présente un coût du système plus élevé par rapport à celle de la moyenne des valeurs mensuelles annuelles, cela est du à la meilleure fiabilité que présente le système déduit de cette méthode.

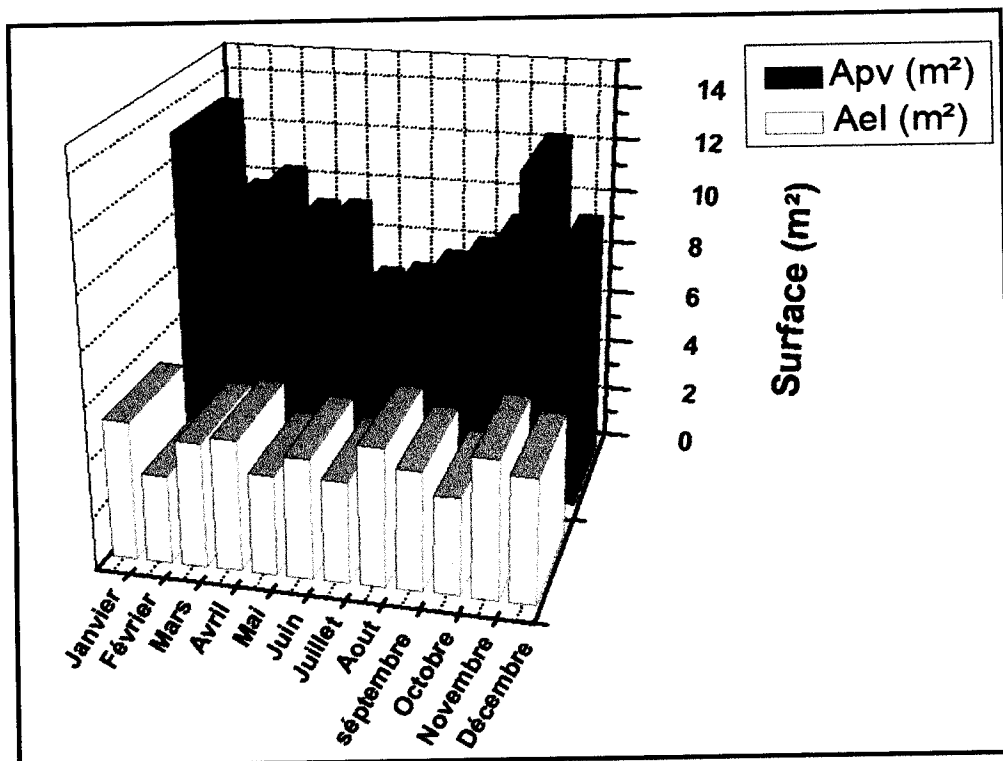
Pour contribuer à la solution aux problèmes d'énergie, il est intéressant de développer des sources décentralisées de ces énergies et de répertorier les sites dont les gisements énergétiques (de tous types) sont susceptibles d'être exploités. Pour satisfaire la demande et minimiser les coûts, les systèmes hybrides, combinant l'action simultanée de plusieurs sources, peuvent constituer un moyen très économique pour promouvoir l'électrification rurale qui est une source de développement local et un facteur de stabilisation des populations à proximité de leurs terres.

Annexe

Annexe 1



Energie produite par le module PV et par l'éolienne



Surfaces des panneaux PV et de l'éolienne nécessaire pour chaque mois

Annexe 3

<i>f = 1 ⇒ 100 % PV et f = 0 ⇒ 100 % Eolien</i>							
f	Apv (m ²)	Modules PV (Nb)	Coût PV (DA)	Ael (m ²)	Générateur éolien (Nb)	Coût Eolien (DA)	Coût total PV + éolien
1	13.2	11	203500	0	0	0	203500
0.9	11.88	10	185000	0.52	1	60000	245000
0.8	10.56	9	166500	1.04	2	120000	286500
0.7	9.42	8	148000	1.56	3	180000	328000
0.6	7.92	7	129500	2.08	4	240000	369500
0.5	6.6	6	111000	2.6	4	240000	351000
0.4	5.28	5	92500	3.12	5	300000	392500
0.3	3.96	4	74000	3.64	6	360000	434000
0.2	2.64	3	55500	4.16	7	420000	475500
0.1	1.32	2	37000	4.68	8	480000	517000
0	0	0	0	5.2	8	480000	480000
Cbat= 9kWh, Cb= 52000 DA							

Méthode 2 - Dimensionnement selon le mois le plus défavorable

Résumé

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

L'Algérie a fourni un grand effort pour l'électrification rurale et saharienne. En effet, le taux d'électrification national était en 2001 égal à 96%. Malgré ce taux élevé, il existe toujours des foyers épars dont l'électrification, par extension du réseau conventionnel, reste très coûteuse. Le système hybride de production d'électricité (éolien - photovoltaïque), totalement autonome, est une solution pour ce genre de problème.

Nous présentons dans ce travail, d'une part, une méthode qui permet de déterminer la taille et l'optimisation d'un système hybride photovoltaïque-éolien de moyenne puissance, et d'autre part, nous déterminons la configuration technico-économique optimale par deux méthodes différentes : celle de la moyenne mensuelle annuelle et celle du mois le plus défavorable.

Mots clés : Energie solaire - Energie éolienne - Système hybride (PV-éolien) - Dimensionnement - Optimisation.

Abstract

The exploitation of renewable resources has been a great rise in industrialized countries and even in some underdeveloped countries.

Algeria is in a great effort to provide rural electrification and Saharan Africa. Indeed, the national electrification rate for the year 2001 is 96%. Despite the high rate, there are still scattered to their homes electrification through the extension of the conventional network is very expensive. The hybrid power generation (wind - PV) is completely autonomous solution for this problem.

In this paper we present a method that permits to determine the size and the optimization of a photovoltaic-wind hybrid system; and the optimal technico-economic configuration using two methods.

Keywords: Solar energy- Wind energy- Hybrid system (wind-PV) – Optimization - Sizing

ملخص

إن استعمال الموارد المتجددة عرف تطورا كبيرا في البلدان المصنعة وأيضا في بعض الدول السائرة في طريق النمو. وفرت الجزائر جهدا كبيرا للكهرباء القروية والصحراوية. و بالفعل، النسبة الوطنية لسنة 2001 هي 96% وبالرغم من هذه النسبة المرتفعة، يوجد دائما بؤر متعثرة وبالتالي تكون كهربتها بتمديد الشبكة مكلفة جدا.

النظام الهجين للإنتاج الكهرباء) ريحي-كهر وشمسي (يكون بالكامل ذاتيا ويكون هو الحل المثالي لهذا النوع من المشاكل.

نقدم في هذا البحث، من جهة، طريقة تسمح بإيجاد مساحة المولد كهروشمسي - هوائي. و من جهة أخرى نحدد المنهج الاقتصادي باستعمال طريقتين.

المصطلحات: النظام الهجين (ريحي-كهروشمسي) - الطاقة الشمسية - الطاقة الهوائية