REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Département du Génie Electrique

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Automatique

Spécialité : Automatique et Syetèmes

Etude des performances d'une installation photovoltaïque autonome hybride pour l'électrification d'un site rural au sud d'Algérie

---

Présenté par :

Mr. HADJ AMEUR Mohamed el Mahdi

Mr. BRAHIM BELHAOUARI Merwan

Proposé et Dirigé par :

Dr. YAHIAOUI Adel

Promotion 2020

Remerciements

En préambule à ce mémoire nous remercions ALLAH qui nous a armé de patience et de courage durant ces longues années d'étude.

Nous souhaitons adresser nos remerciements les plus sincères d'abord à M. BENREKIA Fayçal (Rabbi yarhmou) qui nous a énormément aidé durant le parcours universitaire, ainsi qu'à Dr. YAHIAOUI Adel pour son aide précieuse à l'élaboration de ce mémoire, ce dernier a toujours été à notre écoute, sa disponibilité pour la réalisation de ce mémoire fut remarquable et nous en sommes reconnaissants. Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions. Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à toutes les professeures et tous les professeurs qui nous ont enseigné et qui par leurs compétences nous ont soutenu dans la poursuite de nos études. Enfin, nous tenons également à remercier nos amis qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Merci à tous et à tout.

Dédicaces

Dédicaces

je dédie ce travail

à mes chers parents qui se sont sacrifiés durant tout mon

parcours estudiantin pour leurs encouragements

pour leur volonté et leur désir de me voir achever

mes études brillamment sans oublier mes sœurs

et ainsi à tous mes enseignants qui ont contribué à ma formation

depuis mes débuts au primaire jusqu'à ce jour

à mes amis Fardji Mohamed, KHALDI Imad,RAMOUL Khaled et groupe smah

Et bien sûr à mon binôme BRAHIM BELHAOUARI Merwan

Pour la réalisation de ce mémoire

je tiens à remercier dr YAHIAOUI Adel

et à tous ceux qui ont été pour moi d'une aide précieuse

à la réalisation de ce mémoire

A l'ensemble des étudiants faisant partie

de la branche automatique

enfin, à tous ceux que j'aime, et qui m'aiment.

midou

Dédicaces

Je dédie ce travail de fin d'études à:

- à mes chers parents qui se sont sacrifiés durant tout mon

parcours estudiantin pour leurs encouragements

pour leur volonté et leur désir de moi voir achever

- À mes amis yesser Brahim Bęlhaouarj, ihab khalfouni, Hamza Sliman fissa, khirddin chikar, Hakim Amrouche, Nabil hammi, Walid Hamidi.

- Et bien sûr a mon binôme Hadjameur Mohamed el Mahdi

Pour la réalisation de ce mémoire

- je tiens à remercier mon cher Dr. yahiaoui Adel

Pour son soutien et ses activités bénéfiques

- Ainsi à tous ceux qui ont été pour moi d'une aide précieuse

à la réalisation de ce mémoire

- A l'ensemble des étudiants faisant partie

de la branche automatique

- enfin, à tous ceux que j'aime, et qui m'aime

merwan

ملخص

يتعلق العمل المقدم في هذه الأطروحة بدراسة أداء التركيب الكهروضوئي الهجين لتحويل الطاقة المتجددة ، باستخدام مصادر متجددة.

تم النظر في طريقة القياس الأمثل لنظام هجين يتكون من الألواح الكهروضوئية ومولدات الرياح وبنوك البطاريات والحمل في نهاية مشروع الدراسة هذا. تم اقتراح طريقة احتمال فقد الطاقة (LPSP) لكهربة موقع ريفي في جنوب الجزائر.
توضح الدراسة الفنية الاقتصادية أداء النهج المقترح.

الكلمات المفتاحيّة : احتمال فقدان الطاقة ,التصميم, نظام الهجن

Résumé

Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'étude des performances d'une installation photovoltaïque hybride de conversion d'énergie renouvelable, en utilisant des sources renouvelables.

Une méthode pour le dimensionnement optimal d'un system hybride constitué des panneaux photovoltaïques, générateurs éoliennes, les banques des batteries et la charge est considérée dans ce projet de fin d'étude. La méthode de probabilité de perte d'énergie (LPSP) est proposée pour l'électrification d'un site rural au sud d'Algérie. L'étude techno-économique démontre les performances de l'approche proposée.

Les mots clé : Dimensionnement, LPSP, Système Hybride.

Abstract

The work presented in this thesis concerns the study of the performance of a hybrid photovoltaic installation for converting renewable energy, using renewable sources.

A method for the optimal sizing of a hybrid system consisting of photovoltaic panels, wind generators, battery banks and load is considered in this end of study project. The energy loss probability method (LPSP) is proposed for the electrification of a rural site in southern Algeria. The techno-economic study demonstrates the performance of the proposed approach.

Key words: Hybrid System, LPSP, Sizing.

Table des matières

Liste des figures I
Liste des tableaux IV
Liste des abréviations V
Introduction générale 1

Chapitre 1 : Généralité sur les énergies renouvelables

1.1 Introduction 5
1.2 Le rayonnement solaire 6
1.2.1 Le soleil 6
1.2.2 Le spectre solaire 6
1.2.3 Le rayonnement solaire extraterrestre 7
1.2.4 Les composantes du rayonnement solaire 8
1.2.4.1 Le rayonnement direct 8
1.2.4.2 Le rayonnement diffus 8
1.2.4.3 Le rayonnement réfléchi ou l'albédo du sol 8
1.2.4.4 Le rayonnement global 8
1.3 Le gisement solaire en Algérie 9
1.4 L'énergie photovoltaïque 11
1.4.1 Historique 12
1.4.2 Principe de fonctionnement 12
1.4.3 Les différents types de cellules solaires 13
1.4.3.1 Les cellules monocristallines 13
1.4.3.2 Les cellules poly cristallines 13
1.4.3.3 Les cellules amorphes 13
1.4.4 Panneau photovoltaïque 14
1.4.5 Les différentes configurations des systèmes photovoltaïques 15
1.4.5.1 Système photovoltaïque raccordé au réseau 15
1.4.5.2 Systèmes photovoltaïques autonomes 15
1.4.6 Les avantages et les Inconvénients de photovoltaïque 18
a. Avantage du PV 18
b. Inconvénient du PV 18
1.5 Énergie éolien 19

1.5.1 Historique 19
1.5.2 Les différents types d'éoliennes.....20
1.5.2.1 Les éoliennes à axe horizontal.....20
1.5.2.2 Les éoliennes à axe vertical.....21
1.5.3 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT 22
1.5.4 Architecture d'une éolienne.....23
1.5.4.1 Rotor 23
1.5.4.2 Nacelle 24
1.5.4.3 Tour.....25
1.5.5 Les avantages et les Inconvénients de l'énergie éolienne 25
a. Avantages 25
b. Inconvénients 26
1.6 Systèmes de stockage 26
1.6.1 Les différents Types de batterie 27
1.7 Conclusion : 28

Chapitre 2 : Modélisation du système hybride photovoltaïque-éolien

2.1 Introduction 30
2.2 Modélisation des composants.....30
2.2.1 Modélisation du générateur photovoltaïque (Modèle à une diode) 30
2.2.1.1 Influence des différents paramètres sur la caractéristique I (V).....32
2.2.2.2 Association des cellules photovoltaïques.....36
2.2.2 Modélisation du générateur éolienne 37
2.2.3 Modélisation du système de stockage 39
2.2.3.1 Modèle de la charge de la batterie 40
2.2.3.2 Modèle de la décharge de la batterie.....41
2.3.3 Modélisation du système de conversion.....42
2.3 Conclusion 43

Chapitre 3 : La méthode LPSP

3.1 Introduction 46
3.2 Définition du dimensionnement 46
3.3 Dimensionnement des systèmes d'énergie hybrides 47
3.4 Dimensionnement du système.....49

3.5 Description de la méthode LPSP 49
3.6 Application de la LPSP à l'installation PV 53
3.7 Méthodologie adoptée 54
3.8 Conclusion 54

Chapitre 4 : Résultats et simulation du système hybride photovoltaïque - éolien

4.1 Introduction 56
4.2 Présentation du site et ressources météorologiques 56
4.2.1 L'emplacement du système hybride 56
4.2.2 Les données météorologiques 57
a. Irradiation 57
b. température 58
C. Vitesse de vent 59
4.2.3 Le profil de charge 60
4.3 Système d'étudie 63
4.4 Les différents éléments du système 64
4.4.1 Générateur photovoltaïque 64
4.4.2. Générateur éolien 65
4.4.3 Les batteries 65
4.4.4 L'onduleur 66
4.4.5 Régulateur de charge 66
4.5 Dimensionnement du système 66
4.5.1. Dimensionnement du banc des batteries 66
4.5.2 Dimensionnement du générateur photovoltaïque 67
4.6 Résultats de dimensionnement 69
4.7 Conclusion 71
Conclusion générale 74

Liste des figures

Figure I.1 : Le spectre solaire 7

Figure I.2 : Les composantes du rayonnement solaire reçu au sol 9

Figure I.3 : Carte du monde de l'ensoleillent moyen annuel 10

Figure I.4 : Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu 11

Figure I.5 : Le Principe de fonctionnement d'une cellule solaire 13

Figure I.6 : Différents types des cellules 14

Figure I.7 : Panneau photovoltaïque 14

Figure I.8 : Schéma d'un système photovoltaïque connecté au réseau de distribution 15

Figure I.9 : Schéma d'un système photovoltaïque autonome 16

Figure I.10 : Système hybride 18

Figure I.11 : Les énergies de la éolien 19

Figure I.12 : configuration à axe horizontal 21

Figure I.13 : éolienne de type Darrieus et Savonius 22

Figure I.14 : Figure I.14 : Composants d'une éolienne 23

Figure I.15 : Eléments d'une nacelle 25

Figure II.1 : Schéma équivalent d'une cellule PV, modèle à une diode 30

Figure II.2 : Courbes courant-tension pour différentes éclairement, T=298K 32

Figure II.3 : Courbes puissance-tension pour différents éclairements, T=298K 33

Figure II.4 : Courbes courant-tension pour différentes températures, E=1000[W/m²] 34

Figure II.5 : Courbes puissance-tension pour différentes températures, E=1000[W/m²] 34

Figure II.6 : Influences des résistances séries et shunt 35

Figure II.7 : Caractéristique résultants d'un groupement de Ns cellules en série 36

Figure II.8 : Caractéristique résultants d'un groupement de Np cellules en parallèle 37

Figure II.9 : schéma la turbine éolienne 37

Figure II.10 : coefficient aérodynamique en fonction de vitesse de la turbine 39

Figure II.11 : Évolution de la tension durant la charge d'un accumulateur au plomb 40

Figure II.12 : Évolution de la tension durant la décharge d'un accumulateur au plomb 42

Figure II.13 : Rendement de l'onduleur 43

Figure III.1: Tracé du nombre de modules en fonction du nombre de batteries pour une 'LPSP' donnée 53

Figure IV.1 : localisation géographique du site de Ghardaïa en Algérie 57

Figure IV.2.a: Évolution de l'ensoleillement Mensuelle Hiver (octobre jusqu'à mars) 58

Figure IV.2.b: Évolution de l'ensoleillement Mensuelle Hiver (avril jusqu'à septembre) 58

Figure IV.3.a : Évolution de température Mensuelle Hiver (octobre jusqu'à mars) 59

Figure IV.3.b : Évolution de température Mensuelle été (avril jusqu'à septembre) 59

Figure IV.4.a : Évolution de vitesse vent Mensuelle hiver (octobre jusqu'à mars) 60

Figure IV.4.b : Évolution de vitesse vent Mensuelle été (avril jusqu'à septembre) 60

Figure IV.5.a : Évolution de consommation Horaires (hiver) 62

Figure IV.5.b : Évolution de consommation Horaires (été) 62

Figure IV.6 : Évolution de consommation pour année 63

Figure IV.7 : Schéma synoptique du système hybride étudié 64

Figure IV.7: Algorithme graphique de la LPSP 68

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques 10

Tableau I.2 : Types de batterie existant actuellement sur le marché 27

Tableau IV.1 : la consommation (10 habitations) des appareils électriques pour les deux périodes (octobre jusqu'à mars) et (avril jusqu'à septembre) 61

Tableau IV.2 : Symboles pour tous les appareils électriques 62

Tableau IV.3 : Les caractéristiques électriques du module PV 63

Tableau IV.4 : Nombre des panneaux PV en fonction de LPSP (hiver) 70

Tableau IV.5 : Nombre des panneaux PV en fonction de LPSP (ètè) 70

Tableau IV.6 : les rèsultas des ènergies (hiver) 71

Tableau IV.7 : les rèsultas des ènergies (été) 72

Liste des abréviations

PV : Photovoltaïque.

SEH : Système D'énergie Hybride.

GPV : Générateur Photovoltaïque

MPPT: Maximum Power Point Tracking.

DOD: Depth of discharge.

AC: Alternating Current.

DC : Direct Current.

LPSP : Probabilité de perte d'énergie (Loss of power supply probability).

LPS : Perte d'énergie (Loss of power supply).

MATLAB: MATrix LABoratory.

Wc : Watt crête.

Ah : Ampère heur.

AUT : Autonomie du système.

Introduction Générale

Introduction générale

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

La consommation d'énergie mondiale et dans notre pays ne cesse d'augmenter. La grande partie de l'énergie consommée provient des combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon, …etc.) dont l'utilisation massive peut conduire à l'épuisement de ces réserves et menace réellement l'environnement. Cette menace c'est manifesté principalement à travers la pollution et le réchauffement global de la terre par effet de serre [1].

Depuis lors, la pollution atmosphérique, le réchauffement climatique, les risques du nucléaire et les limites des ressources ont fait prendre conscience qu'un développement économique respectueux de l'environnement, dans lequel nous vivons, est nécessaire.

Face à ces problèmes, et de façon à limiter l'emploi de l'énergie d'origine combustible. Certain pays, se sont tourné vers la nouvelle forme d'énergie dites « renouvelable » faisant appel de façon directe ou indirecte à l'énergie solaire .Parmi celle-ci l'énergie photovoltaïque et l'énergie éolienne.

Les énergies renouvelables offrent la possibilité de produire de l'électricité propre et surtout dans une moindre dépendance des ressources, à condition d'accepter leurs fluctuations naturelles et parfois aléatoires.

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, La ressource éolienne est également adaptée pour la production d'électricité en Algérie , La vitesse moyenne annuelle du vent est d'environ 4,17 m / s, notre pays couvre certains de ses besoin en énergie solaire [1].

La production de l'électricité est donc forcément, malgré une apparence anodine, synonyme de perturbations. L'utilisation excessive d'un monde de production accentue fortement l'effet

nuisible qui lui est associe et il apparaît évident que la diversification des sources est une solution à promouvoir.

L'utilisation de source d'énergie renouvelable induit le concept de stockage d'électricité en raison de la disponibilité intermittente de telles ressources .l'utilisation du stockage d'électricité est très diversifiée : les applications stationnaires connectée ou non au réseau .en particulier, les sites géographiquement isolés et non raccordés au réseau intégrant une source renouvelable.

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 batterie 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.

Le type de stockage généralement utilise dans ce système est la batterie au plomb .La maturité dont cette technologie fait preuve et son faible coût en sont les raison principales.

Les systèmes hybrides (éolien –photovoltaïque) bien adaptées à une production d'électricité peuvent contribuer à résoudre ce problème.

Le générateur d'électricité d'origine renouvelable sélectionné pour notre étude est le système hybride éolien – photovoltaïque.

L'intérêt de ce travail est de maintenir un niveau de fiabilité grâce à un dimensionnement optimale de système hybride photovoltaïque - èolien pour cette raison on présente une méthode de dimensionnement optimale d'un système hybride de production d'électricité avec un niveau de fiabilité fixé.

Afin d'accomplir au mieux cette étude, le présent mémoire est structuré en quatre principaux chapitres en plus de l'introduction générale et de la conclusion générale.

Le premier chapitre aborde le concept théorique de les énergies renouvelables, dans ce chapitre, nous présentons tout d'abord, globalement l'énergie solaire. On terminera ce chapitre en citant les différentes configurations existantes actuellement des systèmes photovoltaïques/éoliennes.

Le deuxième chapitre aborde la modélisation des constituants d'un système hybride PV/éolienne.

Dans Le troisième chapitre, on présente la méthode de calcul pour l'optimisation du dimensionnement de systèmes photovoltaïques/éolienne autonomes basé sur le concept LPSP

Dans le quatrième chapitre, nous présentons les résultats de la simulation et de dimensionnement obtenus par la méthode LPSP.

Chapitre 1 :

Généralité sur les énergies renouvelables

1.1 Introduction

La lumière émise par le soleil pressente une alternative énergétique durable pour la production d'électricité car le soleil est une source d'énergie illimitée, elle pourrait couvrir environ de 15 000 fois notre consommation globale d'énergie ce qui donne un potentiel très important à l'échelle du besoin de l'activité humaine telle que la quantité d'énergie arrivée au sol se compte sur 10 000 Watts crête par mètre carré dans les zones tempérées et jusqu'à 14000 Watts crête par mètre carré lorsque l'atmosphère est faiblement polluée [2].

La transformation de l'énergie solaire en électricité est faite par des éléments dits cellule photovoltaïque qui forment d'autres éléments appelés modules ou panneaux photovoltaïques par leur association en série/parallèle.

Le flux solaire reçu au niveau du sol dépend de plusieurs paramètres :

- l'orientation, la nature et l'inclinaison de la surface terrestre.
- la latitude du lieu de collecte.
- son degré de pollution et son altitude.
- la période de l'année.
- l'instant considéré dans la journée.
- la nature des couches nuageuses.

Les zones les plus favorables sont répertoriées sous forme d'atlas et mettent en évidence des "gisements solaires" à la surface de la terre [3].

Pour mieux comprendre le mode de fonctionnement de cette énergie, nous allons parler dans ce chapitre d'une manière générale du gisement solaire, de la conversion photovoltaïque et des principaux éléments constitutifs d'un système photovoltaïque.

Dans ce chapitre, nous allons parler également de l'énergie éolienne et de ses principaux composants et system stockage.

1.2 Le rayonnement solaire

1.2.1 Le soleil

Le soleil est une étoile de forme pseudo sphérique dont le diamètre atteint les 1391000 km.

Il est situé à une distance moyenne de 150000000 km de la terre. Composé de matière Gazeuse, essentiellement de l'hydrogène et de l'hélium, il est le siège de réactions de fusion nucléaire permanentes et sa température de cœur atteint 107 °k [4].

Le corps noir est un objet idéal qui absorberait toute l'énergie électromagnétique qu'il recevrait, sans en réfléchir ni en transmettre. Il n'ayant n'a aucune autre hypothèse sur la nature de l'objet.

La lumière étant un rayonnement électromagnétique, elle est absorbée totalement et l'objet éclairé devrait donc apparaître noir, d'où son nom. Cependant, un corps noir peut émettre de la lumière s'il a une température suffisamment élevée, il n'apparaîtra donc pas noir dans toutes les conditions.

1.2.2 Le spectre solaire

Le rayonnement solaire est dû à la manifestation des interactions nucléaires qui s'effectuent au niveau du soleil, il est constitué des radiations électromagnétiques émises par le soleil.

Son spectre s'étend des plus petites longueurs d'onde (0,2 m) qui se trouvent dans la bande des ultraviolets (rayons gamma) jusqu'à la bande des infrarouges (rayons X) ou il y a les grandes longueurs d'ondes (2,5 m), la répartition de ce spectre est celle d'un corps noir à 5800˚K [5], comme le montre la figure (I.1):

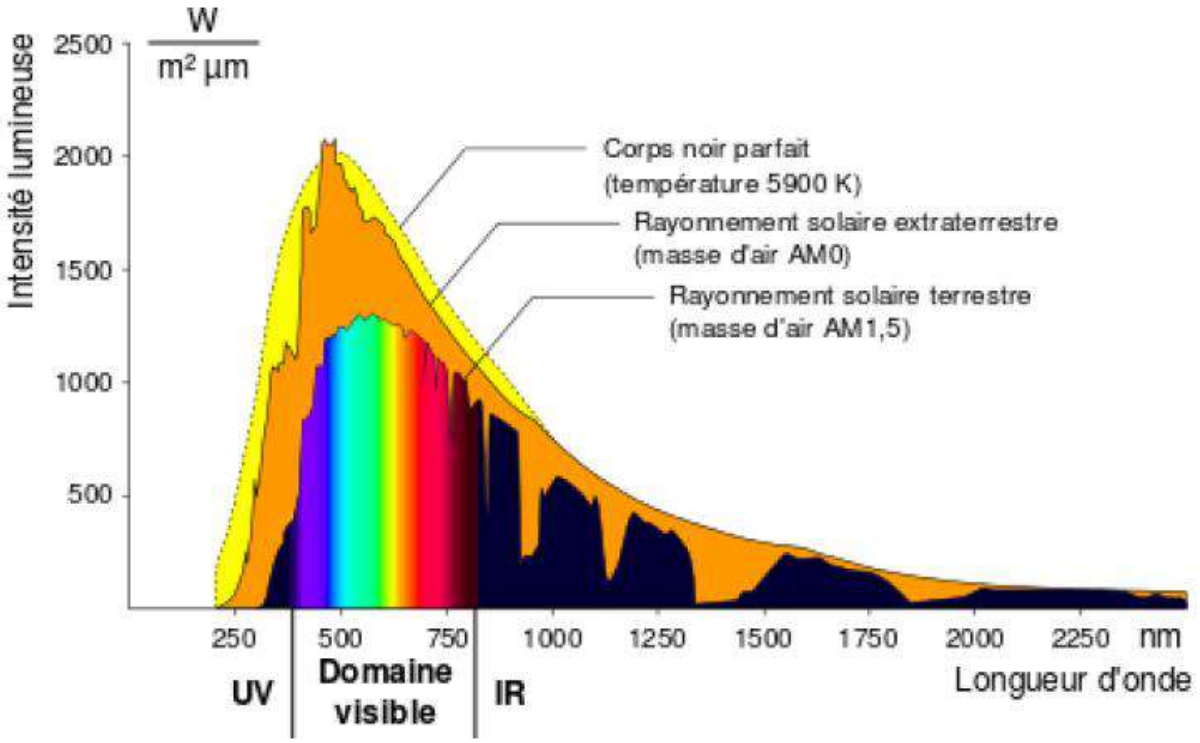


Figure I.1 : Le spectre solaire.

1.2.3 Le rayonnement solaire extraterrestre

Le rayonnement solaire se compose de radiations électromagnétiques émises par le soleil, dont le spectre s'étend des plus petites longueurs d'ondes (rayons gamma) vers les grandes ondes radioélectriques. Les parties de ce spectre qui jouent un rôle dans l'interaction du rayonnement solaire avec l'environnement terrestre sont essentiellement les bandes infrarouge, visible et ultraviolette, ainsi que la gamme radioélectrique et celles des microondes.

Le rayonnement solaire dit « extraterrestre » c'est à dire hors atmosphère a été évaluée avec précision par la NASA et vaut 1367W/m². Il s'agit de l'irradiation reçue, ou le rayonnement solaire instantané au-dessus de l'atmosphère terrestre, en incidence normale (c'est à dire sur un plan perpendiculaire à la direction du soleil).

On appelle cette valeur « constante solaire » mais elle ne l'est pas tout à fait à cause des légères variations de la distance terre-soleil. Lorsque ce rayonnement traverse l'atmosphère

pour atteindre la surface terrestre, il est fortement atténué en raison des phénomènes d'absorption et de diffusion par les différents constituants de celle-ci.

Le rayonnement solaire se propage à la vitesse de la lumière, il lui faut donc, en moyenne,

499 secondes, soit 8 minutes et 19 secondes, pour atteindre notre atmosphère [6].

1.2.4 Les composantes du rayonnement solaire

Il existe quatre types de rayonnement [7]:

1.2.4.1 Le rayonnement direct

Le rayonnement direct est la lumière parvenant directement du soleil par ciel clair.

1.2.4.2 Le rayonnement diffus

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

1.2.4.3 Le rayonnement réfléchi ou l'albédo du sol

C'est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige, etc.…).

1.2.4.4 Le rayonnement global

Le rayonnement global est subdivisé en rayonnements directs, diffus et reflète par le sol.

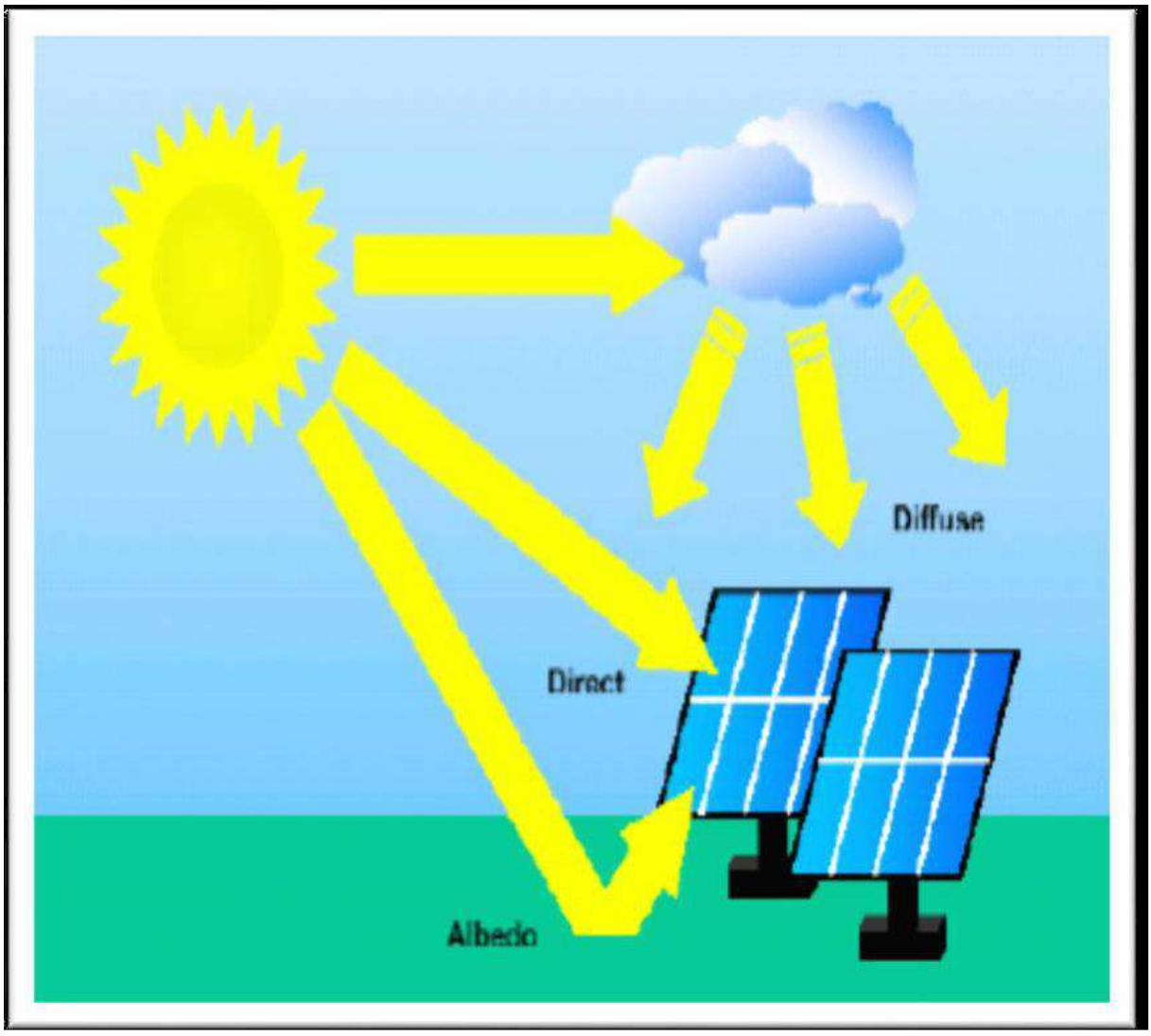


Figure I.2 : Les composantes du rayonnement solaire reçu au sol [2].

1.3 Le gisement solaire en Algérie

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire [8].

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme comme le montre la figure (I.3) :

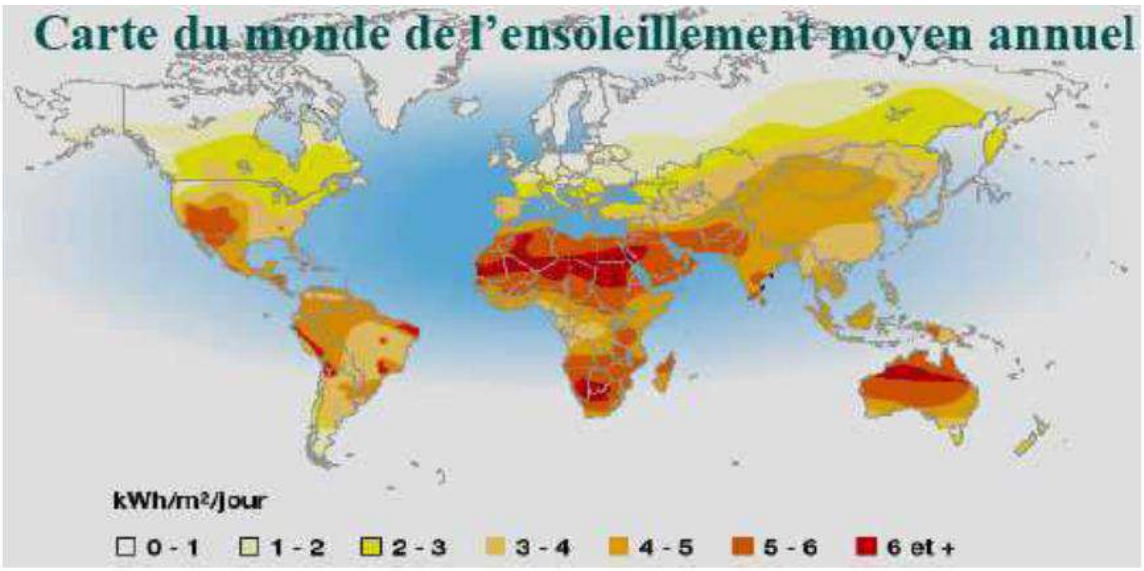


Figure I.3 : Carte du monde de l'ensoleillent moyen annuel.

Suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit 169.000 TWh/an pour le solaire thermique, 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque.

La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est représentée dans le tableau I.1 selon l'ensoleillement reçu annuellement.

Tableau I.1 : Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques.

Régions	**Régions côtières**	**Hauts plateaux**	**Sahara**
Superficies (%)	4	10	86
Durée moyen d'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (kWh/m2/an)	1700	1900	26500

La durée d'insolation dans le Sahara algérien est de l'ordre de 3500h/an. Elle est la plus importante au monde, elle est toujours supérieure à 8h/j et peut arriver jusqu'à 12h/j pendant l'été à l'exception de l'extrême sud où elle baisse jusqu'à 6h/j en période estivale.

La région de Tamanrasset est particulièrement ensoleillée et présente le plus grand potentiel de toute l'Algérie (figure I.4) [7].

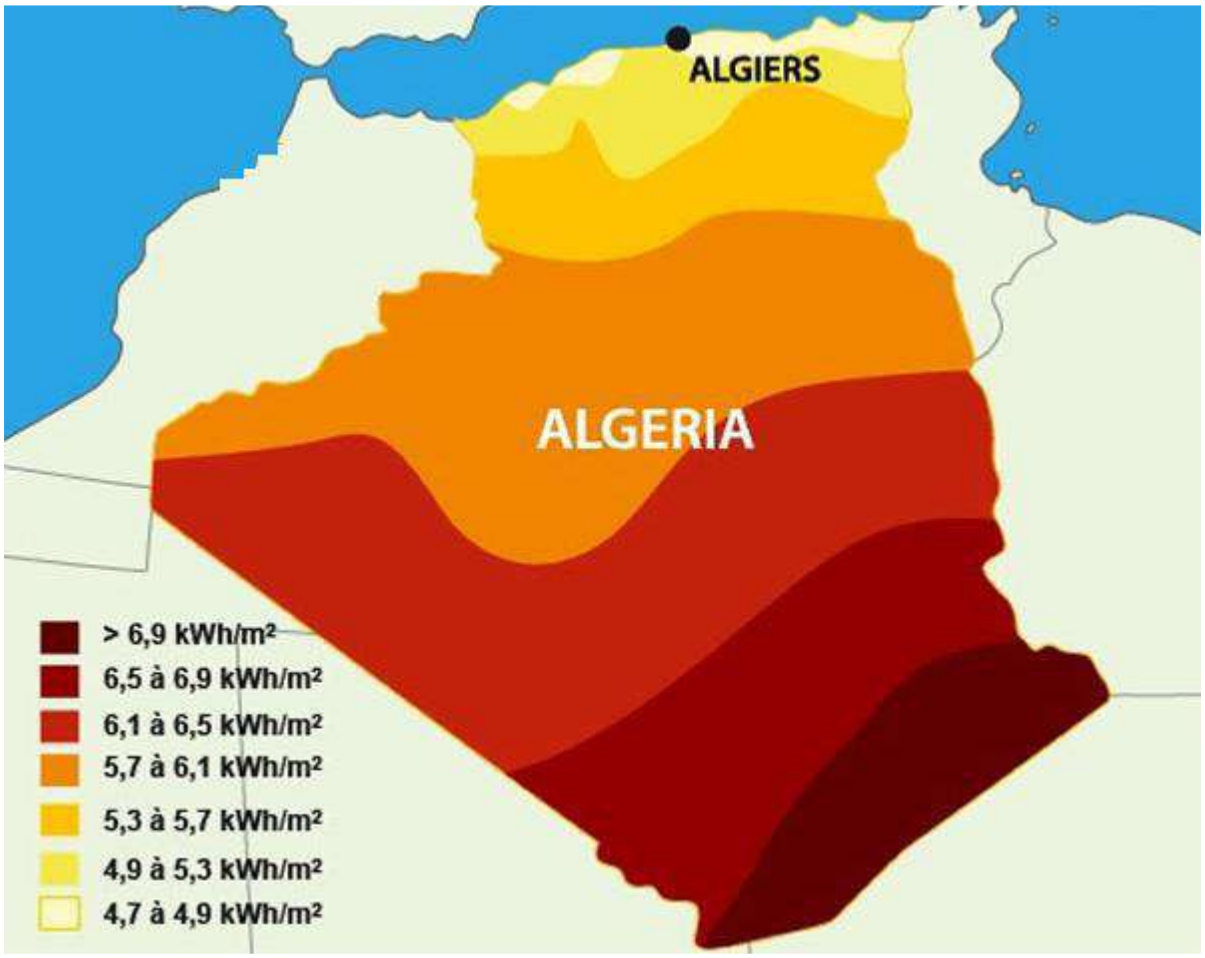


Figure I.4: Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu.

1.4 L'énergie photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité.

Cette conversion se produit au sein de matériaux semi-conducteurs, ayant pour propriété de libérer leurs porteurs de charge sous l'influence d'une excitation extérieure.

Cette conversion de la lumière en électricité, appelée effet photovoltaïque, a été découverte par le Français Edmande Becquerel en 1839, Il a découvert l'effet photovoltaïque en constatant l'apparition d'un potentiel électrique entre deux électrodes lorsqu'elles sont illuminées.

En outre le mot photovoltaïque trouve ses racines dans le mot grec ; photos, qui signifie lumière (photon) et dans : Volta, nom du physicien italien qui découvrit la pile électrique en 1800 [9].

1.4.1 Historique

Quelques dates importantes dans le domaine de l'énergie photovoltaïque [10] :

1839 : Le physicien français Edmond Beckerel découvre l'effet photovoltaïque.

1875 : Werner Von Siemens expose devant l'académie des sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs.

1954 : Trois chercheurs américains Chapin, Peason et Prince fabriquent une cellule Photovoltaïque.

1958 : les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace : Une cellule avec un rendement de 9 %.

1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'université de Delaware.

1983 : la première voiture alimentée en énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 Km en Australie.

1.4.2 Principe de fonctionnement

Une cellule photovoltaïque est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P et l'autre dopée N créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des paires électron-trous. Ils créent alors des électrons (chargés N) et des trous (chargés P). Ceux-ci créent alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positive et négative de la cellule [11].

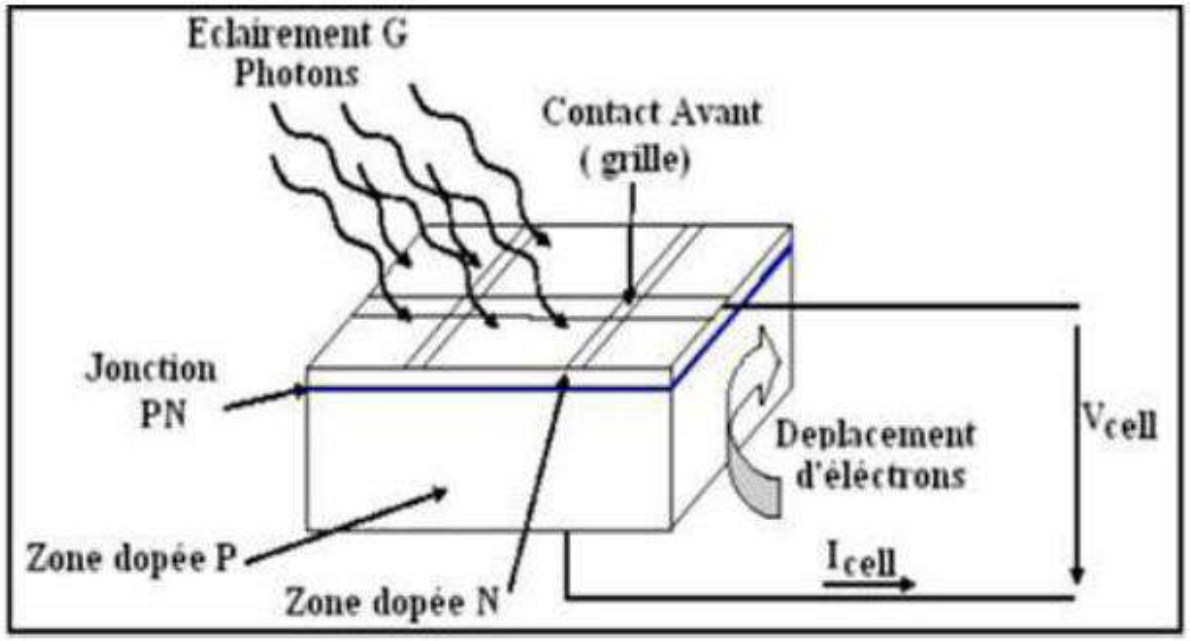


Figure I.5 : Principe de fonctionnement d'une cellule solaire.

1.4.3 Les différents types de cellules solaires

Les cellules photovoltaïques sont les éléments de base d'un générateur photovoltaïque, sa constitution est de semi-conducteur généralement à base de Silicium, ou de sulfure de cadmium (CdS), Tellurure de Cadmium (CdTe). Elles délivrent une tension de l'ordre de 0,5 Volt chacune. Il existe différents types de cellules solaires. Chaque type de cellule est caractérisé par son rendement et son coût. Les principaux types de cellules qui existent actuellement sont :

1.4.3.1 Les cellules monocristallines

Elles sont composées d'un silicium cristallisé en un seul cristal c'est pourquoi sa couleur est uniforme.

1.4.3.2 Les cellules poly cristallines

Les cellules poly cristallines sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé sous forme de cristaux multiples, on peut donc différencier les cristaux.

1.4.3.3 Les cellules amorphes

Elles ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé.

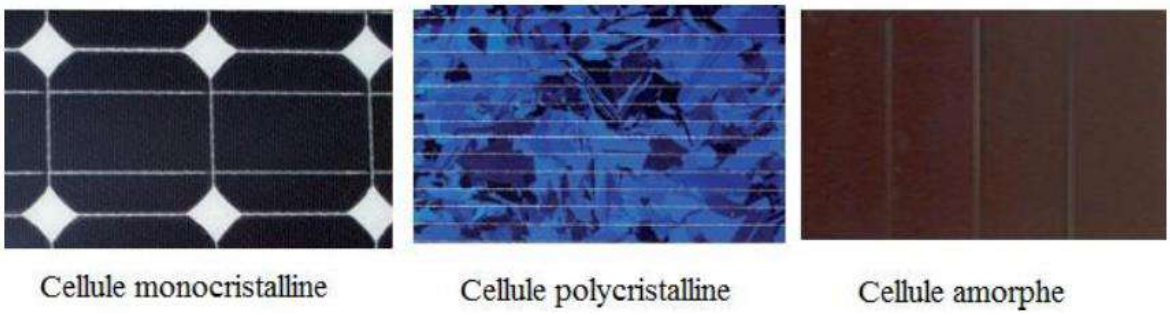


Figure I.6 : Différents types des cellules.

Il y a d'autres types des cellules PV comme les cellules en matériaux organiques (rendement d'environ de 3,6%) et les cellules tandem [12].

1.4.4 Panneau photovoltaïque

Le panneau solaire ou (champ solaire) se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique figure (I.7**)** [9].

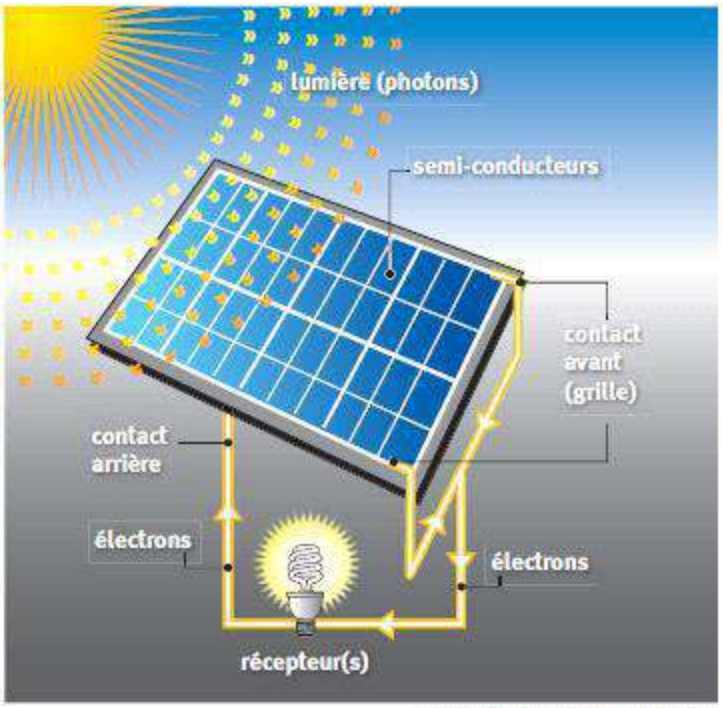


Figure I.7: Panneau photovoltaïque.

Pour chaque panneau on peut avoir autant de sorties que de modules, besoin de boite de dérivation qui regroupe le tous, Alors cette boite de dérivation fixée sur une structure du montage a comme rôle d'effectuer les connections entre les modules pour obtenir une puissance optimale en sortie.

1.4.5 Les différentes configurations des systèmes photovoltaïques

1.4.5.1 Système photovoltaïque raccordé au réseau

On peut installer un système photovoltaïque sur un site raccordé au réseau de distribution électrique. Généralement sur les habitations ou les entreprises qui souhaitent recourir à une forme d'énergie renouvelable qui bénéficie d'un bon ensoleillement.

L'énorme avantage de cette solution est l'absence de batterie, on ne stocke plus l'énergie, lorsqu'il y a un plus on l'injecte directement au réseau local ou national [13].

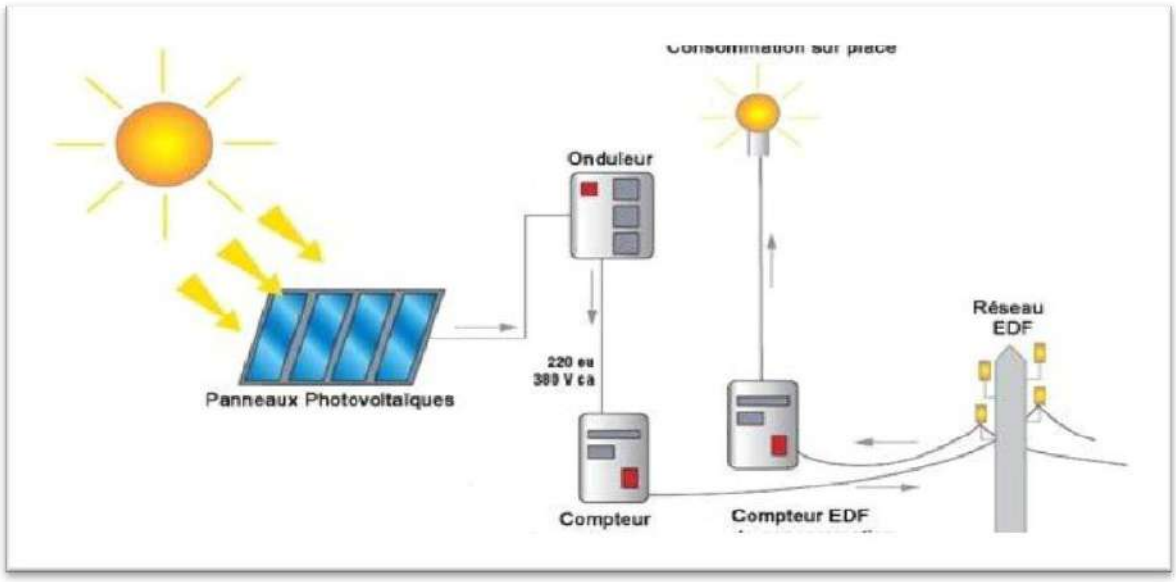


Figure I.8 : Schéma d'un système photovoltaïque connecté au réseau de distribution Electrique.

1.4.5.2 Systèmes photovoltaïques autonomes

a. Systèmes autonomes sans stockage

C'est le système le plus simple puisque l'énergie photovoltaïque est utilisée directement à Partir des panneaux L'appareil alimenté par ce système ne fonctionnera qu'en présence de la lumière, et dès que l'éclairement sera suffisant pour atteindre la puissance demandée.

Ce type de système est intéressant pour toute les applications qui n'ont pas besoin de fonctionner dans l'obscurité et pour les quelles le besoin en énergie coïncide avec la présence de la lumière.

L'inconvénient de ce système est qu'on ne profite pas toujours des éclairements plus élevés, pas de stockage donc pas de récupération des surplus d'énergie solaire [13].

b. Systèmes autonomes avec stockage

C'est la configuration la plus courante des systèmes photovoltaïques autonomes que les Anglophonesappellant Stand-Alone Systems, L'ensemble est le plus souvent en courant continu (CC). Ce qui est préférable car plus simple. Mais dès que l'on touche à l'habitat, il y a presque toujours des appareils en courant alternatif (AC) à alimenter, parce qu'ils n'existent pas en continu.

La batterie d'un tel système se charge le jour, et sert de « réservoir » d'énergie en Permanence, Elle peut sans problème, à un instant donné, recevoir un courant de charge et débité un courant de décharge de valeur différente. Les appareils alimentés sont donc câblés sur la batterie au travers du régulateur de charge. Lorsque la batterie est pleine, ce dernier, coupe la charge pour éviter qu'elle ne souffre de surcharge, ceci a pour conséquence la perte d'une part de l'énergie produite en été notamment sous nos climats.

Quand un récepteur doit nécessairement fonctionner en courant alternatif noté AC, on recourt à une conversion DC/AC (de courant continu en alternatif) en sortie de batterie, Cela n'est pas sans conséquence, notamment :

- Augmentation du coût et de l'encombrement de l'installation.
- Réduction du rendement énergétique (aucun convertisseur ne restitue 100% de l'énergie).
- Risque de panne complète en cas de problème sur le convertisseur si toute.
- l'installation électrique est alimentée par son intermédiaire [14].

-



Figure I.9 : Schéma d'un système photovoltaïque autonome.

c. Système autonomes hybride

Lorsque le générateur PV ne couvre pas seul tous les besoins énergétiques tout, il possible d'introduire d'autre sources (éolienne, petite hydraulique, bio- masse, groupe diesel…), afin de mieux garantir la qualité de l'approvisionnement en électricité, Ce type d'installation est alors dit hybride [15].

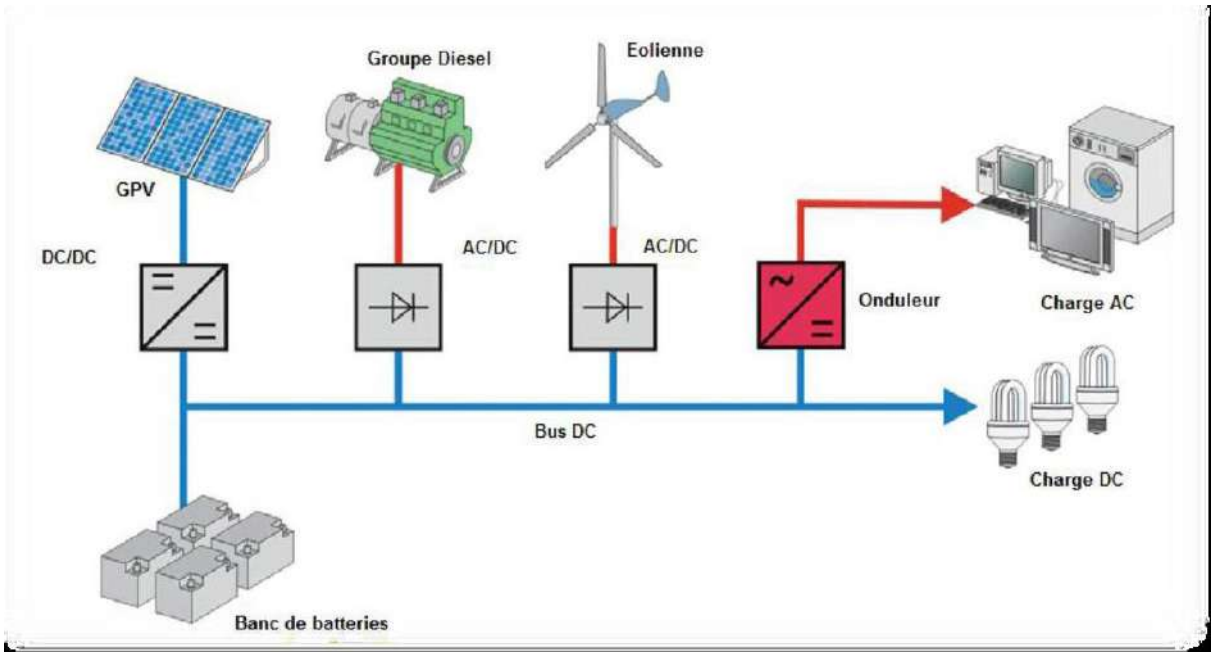


Figure I.10 : Système hybride

1.4.6 Les avantages et les Inconvénients de photovoltaïque

a. Avantage du PV

- Les installations photovoltaïques sont en général de haute fiabilité, peu sujettes à l'usure, elles demandent peu d'entretien.
- Le montage des installations photovoltaïque est simple et les installations sont adaptables aux besoins de chaque projet.
- Il s'agit d'une source d'énergie électrique totalement silencieuse ce qui n'est pas le cas, par exemple des installations éoliennes.
- Il s'agit d'une source d'énergie inépuisable.
- L'énergie photovoltaïque est une énergie propre et non-polluante qui ne dégage pas de gaz à effet de serre et ne générer pas de déchets [16].

b. Inconvénient du PV

- Les rendements des panneaux photovoltaïque sont encore faible et l'ordre de 23.4 %.
- Dans le cas d'une installation photovoltaïque autonome qui ne revend pas son surplus d'électricité au réseau, il faut inclure des batteries dont le cout reste très élevé.
- Le niveau de production d'électricité n'est pas prévisible mais dépend du niveau d'ensoleillement. De plus, il n'Ya a aucune production d'électricité le soir et la nuit.

- La durée de vie d'une installation photovoltaïque n'est pas éternelle mais de l'ordre de 20 à 30 ans.
- De plus, le rendement des cellules photovoltaïques diminue avec le temps qui passe.
- On parle en générale pour les panneaux photovoltaïque, d'une perte de rendement de 1% par ans [16].

1.5 Énergie éolien

L'éolienne est un dispositif destiné à convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, elles sont généralement utilisés pour produire de l'électricité et entre dans la catégorie des énergies renouvelables [1].



Figure I.11: Les énergies de l'éolien.

1.5.1 Historique

Parmi toutes les énergies renouvelables, à part l'énergie du bois, c'est l'énergie du vent qui a été exploitée en premier par l'homme. Depuis l'antiquité, elle fut utilisée pour la propulsion des navires et ensuite les moulins à blé et les constructions permettant le pompage d'eau, Les

premières utilisations connues de l'énergie éolienne remontent à 2 000 ans avant Jésus-Christ environ.

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

A l'arrivée de l'électricité donne l'idée au britannique Lord Kelvin en 1802 de songé pour la première fois à transformer l'énergie éolienne en énergie électrique. En effet il essaya d'associer une génératrice d'électricité à un moteur éolien, mais en fait il faudra attendre 1850 et l'avènement de la dynamo pour qu'on puisse voir ce que l'on appellera les «aérogénérateurs ». Cette nouvelle application de l'énergie éolienne a connu un certain succès, et l'on comptait en 1920 jusqu'à 300 constructeurs d'aérogénérateurs,

« Malheureusement », à cette époque, le faible coût du pétrole avait mis le kilowatt fourni par l'énergie thermique à un niveau de compétitivité inaccessible à l'énergie éolienne.

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

Cependant, les puissances générées et les impacts sur l'environnement ne sont pas les mêmes [17].

1.5.2 Les différents types d'éoliennes

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontal [18]:

1.5.2.1 Les éoliennes à axe horizontal

Ce sont les machines les plus répandues actuellement du fait de [18]:

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

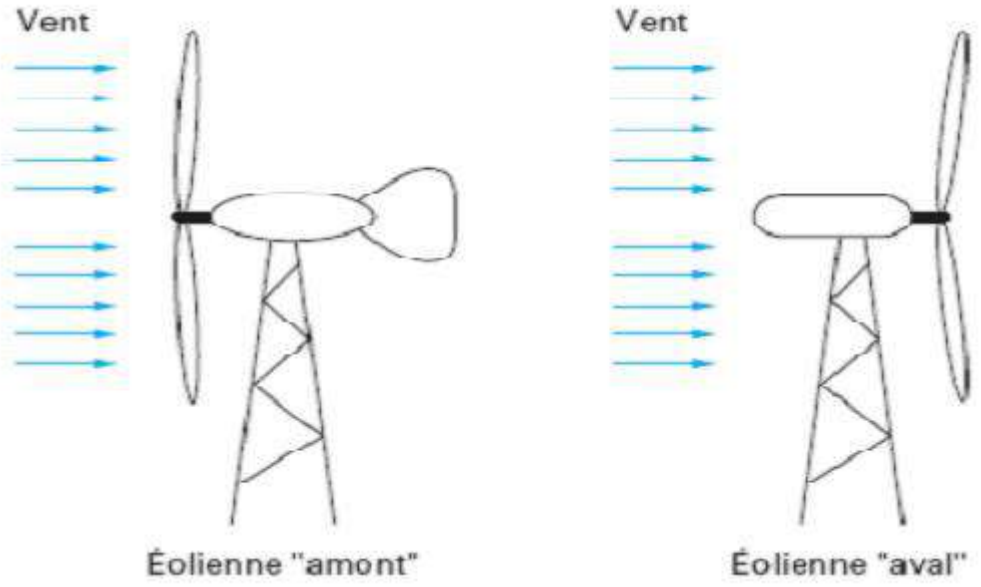


Figure I.12: configuration à axe horizontal [18].

1.5.2.2 Les éoliennes à axe vertical

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

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

Elles sont adaptées à tous les vents et ne nécessitent pas de dispositif d'orientation [18].

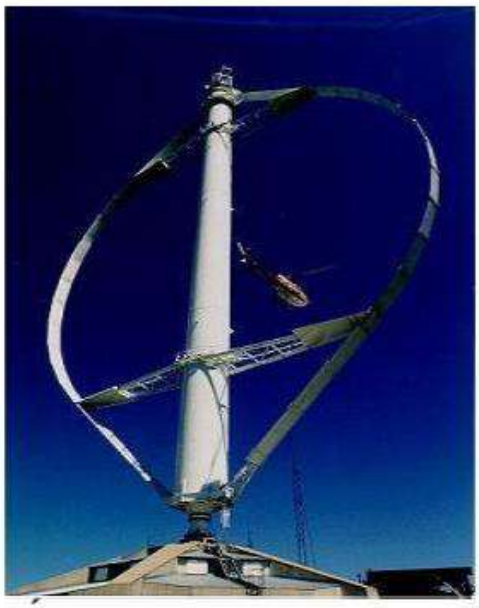
Deux d'entre elles sont particulièrement remarquables : Savonius et Darrieus.

L'éolienne Savonius comporte principalement deux demi cylindres dont les axes sont décalés l'un par rapport à l'autre. Comme les machines à aubes, elle utilise essentiellement la traînée pour tourner, Cette machine présente deux avantages [18] :

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

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

Ce type de machine, qui peut offrir les puissances les plus fortes n'a pas connu le développement technologique qu'il méritait à cause de la fragilité du mécanisme encore mal maîtrisée. Toutefois, cela devrait pouvoir être résolu si des efforts.



Éolienne de type Darrieus.



Éolienne de type Savonius.

Figure I.13 : éolienne de type Darrieus et Savonius [18].

1.5.3 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

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

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

- Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique [19].

1.5.4 Architecture d'une éolienne

On peut considérer trois composants essentiels dans une éolienne, le rotor, la nacelle et la tour (Fig.18) [20]:

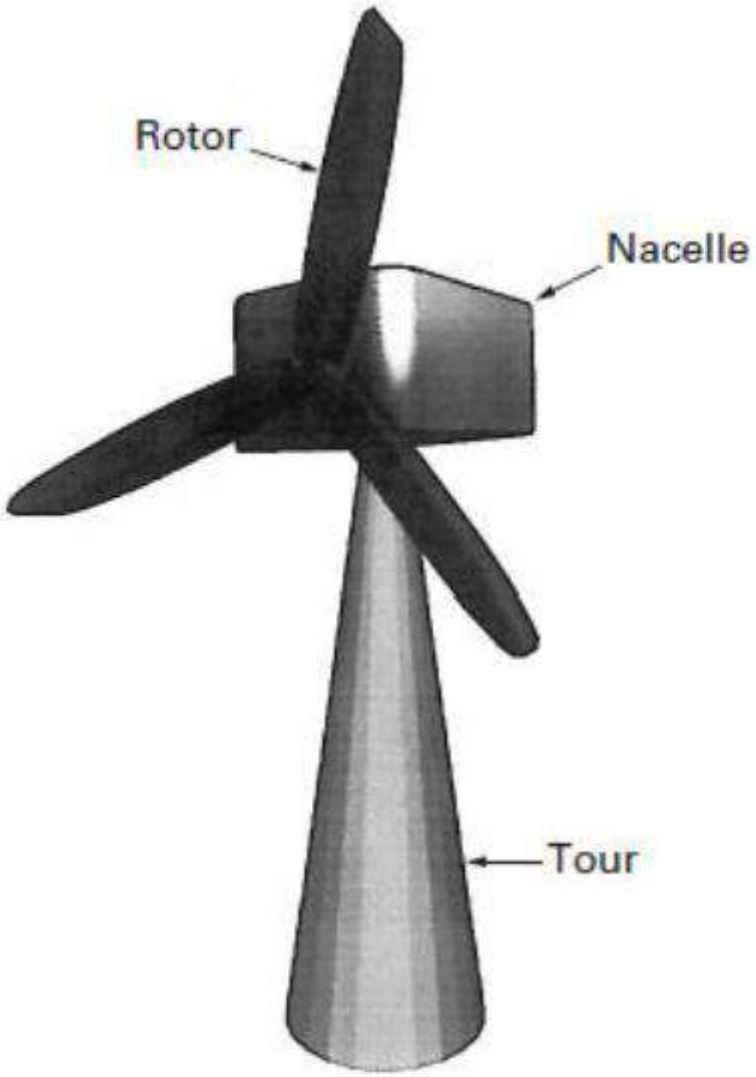


Figure I.14 : Composants d'une éolienne.

1.5.4.1 Rotor

C'est le capteur d'énergie qui transforme l'énergie du vent en énergie mécanique, Le rotor est un ensemble constitué de pales et de l'arbre primaire, la liaison entre ces éléments étant assurée par le moyeu. Sur certaines machines, l'arbre primaire qui tourne à faible vitesse

comporte un dispositif permettant de faire passer des conduites hydrauliques entre la nacelle (repère fixe) et le moyeu (repère tournant), Cette installation hydraulique est notamment utilisée pour la régulation du fonctionnement de la machine (pas des pales variables, freinage du rotor…) [21].

1.5.4.2 Nacelle

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

- Multiplicateur de vitesse : il sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique. En effet, la faible vitesse de rotation de l'éolienne ne permettrait pas de générer du courant électrique dans de bonnes conditions avec les générateurs de courant classiques.
- L'arbre secondaire comporte généralement un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine [20, 21].
- Génératrice : Différents types de génératrices peuvent être rencontrés.
- Contrôleur électronique chargé de surveiller le fonctionnement de l'éolienne. Il s'agit en fait d'un ordinateur qui peut gérer le démarrage de la machine lorsque la vitesse du vent est suffisante (de l'ordre de 5 m/s), gérer le pas des pales, le freinage de la machine, l'orientation de l'ensemble rotor, nacelle face au vent de manière à maximiser la récupération d'énergie et réduire les efforts instationnaires sur l'installation. Pour mener à bien ces différentes tâches, le contrôleur utilise les données fournies par un anémomètre (vitesse du vent) et une girouette (direction du vent), habituellement situés à l'arrière de la nacelle. Enfin, le contrôleur assure également la gestion des différentes pannes éventuelles pouvant survenir [99].
- Divers dispositifs de refroidissement (génératrice, multiplicateur) par ventilateurs, radiateurs d'eau, ou d'huile.
- Dispositif d'orientation de la nacelle : Il permet la rotation de la nacelle à l'extrémité supérieure de la tour, autour de l'axe vertical. L'orientation est généralement assurée par des moteurs électriques, par l'intermédiaire d'une couronne dentée. De nombreuses éoliennes comportent un système de blocage mécanique de la position de la nacelle suivant une orientation donnée ; cela évite de solliciter constamment les

moteurs et permet aussi de bloquer l'éolienne durant les opérations de maintenance [20, 21].

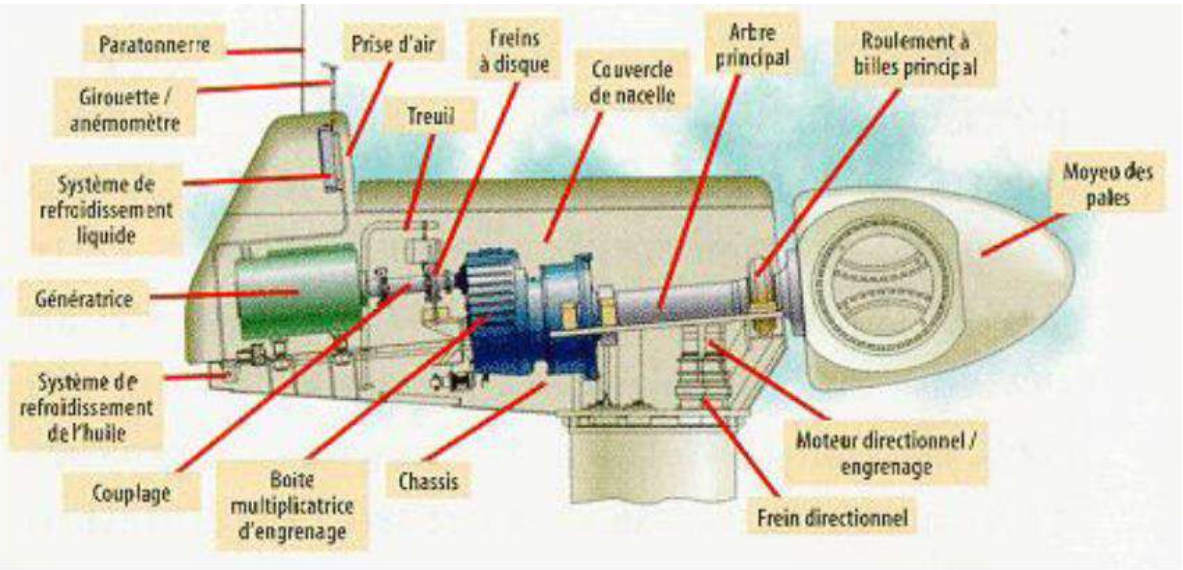


Figure I.15 : Eléments d'une nacelle.

1.5.4.3 Tour

Son rôle est d'une part de supporter l'ensemble rotor, nacelle pour éviter que les pales ne touchent le sol, mais aussi de placer le rotor à une hauteur suffisante, de manière à sortir autant que possible le rotor du gradient de vent qui existe à proximité du sol, améliorant ainsi le captage de l'énergie. Certains constructeurs proposent ainsi différentes hauteurs de tour pour un même ensemble (rotor, nacelle), de manière à s'adapter au mieux aux différents sites d'implantation **[**21].

1.5.5 Les avantages et les Inconvénients de l'énergie éolienne

a. Avantages

- Énergie propre non polluant, gratuite, abondante et inépuisable.
- Elle peut être complémentaire aux filières traditionnelles.
- Elle ne consomme pas de combustibles.
- Elle permet que le terrain occupé par les parcs éoliens soit utilisé à d'autres fins, par exemple : agricoles.
- Bas impact environnemental.
- Ils fonctionnent de façon rentable dans les régions éloignées et venté.

- Ils sont flexibles et peuvent être élargis à n'importe quel moment pour répondre à vos besoins en matière d'électricité.
- Temps de réalisation d'une centrale éolienne minimum.
- Ils ont une longe durée de vie.
- On élimine les frais et les risque de transport associé des énergies fossiles [22].

b. Inconvénients

- Instable, elle est sujette à des variations du vent et à des périodes de calme.
- Difficulté de stockage de l'énergie.
- Les équipements sont chers et produisent du bruit.
- Impact visuel (effets d'ombre dus au mouvement et réflexions intermittentes).
- Interférences électromagnétiques [22].

1.6 Systèmes de stockage

Le stockage d'énergie est un facteur clef dans un système d'énergie hybride en site isolé. Dans la plupart des cas, les batteries représentent encore la technologie la plus rentable. Elles sont d'habitude du type plomb – acide. Les batteries nickel – cadmium sont rarement utilisées.

La technologie des batteries plomb-acide bénéficie en effet d'avantages, tels son faible coût (par rapport à d'autres technologies) et une maturité étayée par un retour d'expérience conséquent. Cette technologie est par ailleurs largement disponible dans le commerce.

Le stockage d'énergie est souvent utilisé dans les petits systèmes hybrides à fin de pouvoir alimenter la charge pour une durée relativement longue (des heures ou même des jours) isolés. Dans ce cas, il est utilisé pour éliminer les fluctuations de puissance à court terme L'emploi des batteries plomb-acide est sujet à des contraintes qu'il est nécessaire de respecter pour garantir son bon fonctionnement et sa longévité. Elles ne peuvent rester longtemps inutilisées sans conséquences néfastes sur leur durée de vie. Les cycles répétés de charge/décharge aléatoires doivent être évités. Leur état de charge ne doit pas atteindre de valeurs extrêmes pour éviter toute dégradation prématurée [23].

1.6.1 Les différents Types de batterie

Les différents Types de batterie existant actuellement sur le marché sont regroupés dans le tableau (I.2) suivant [24]:

Tableau I.2 : Types de batterie existant actuellement sur le marché.

Type de batterie	Propriétés	Puissance Inférieure Wh / kg	Coût
Plomb – acide	Fiable, recyclable, Avec entretien	35	Pas trop chère
Scellée plomb- acide	Entretien nul, utilisée Dans n'importe quelle position	39	Pas trop chère
Bipolaire plomb - acide	Recharge rapide Permise et surtout durable	50	Très chère
Nickel – Cadmium	Toxique, effet de mémoire	45	Très chère
Nickel – Fer	Non toxique, durable	55	Très chère
Nickel – Métal hydrure	Non toxique, durable	90	Très chère
Zinc – Bromure	Analogue à la précédente mais très toxique	90	Très chère
Sodium – Sulfure	Fonctionne à 300 °C D'où danger d'incendie	110	Très chère
Lithium – Ion (SAFT)	Sûre, puissante, formes diverses	150	Très chère

1.7 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents types de rayonnements (direct, diffus, albédo et global), et des notions importantes sur le gisement solaire en Algérie Ensuite, nous avons présenté le système photovoltaïque et éolienne ainsi que leurs principes de fonctionnements.

Chapitre 2 :

Modélisation du système hybride photovoltaïque-éolien

2.1 Introduction

La modélisation est un moyen destine à représenter par une forme mathématique une fonction ou un processus technologique .elle a pour but d'étudier théoriquement le comportement de certains paramètres et de les optimiser en respectant une contrainte donnée.

A cet effet, la modélisation est nécessaire pour établir une relation entre l'énergie produite par le système hybride éolien –photovoltaïque et la demande de l'utilisateur.

2.2 Modélisation des composants

2.2.1 Modélisation du générateur photovoltaïque (Modèle à une diode)

Ce modèle représente la cellule solaire comme source de courant modélise la conversion du flux en énergie électrique .La résistance montée représente la résistance de courant et de connexion, une autre résistance en parallèle dite la résistance shunt représente le courant de fuite .Une diode parallèle qui modélise la jonction PN (figure II.1) [25].

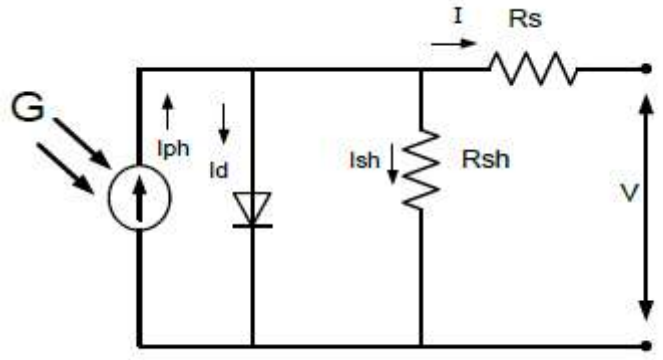


Figure II.1 : Schéma équivalent d'une cellule PV, modèle à une diode.

A partir du circuit équivalent de la figure I.4, on peut écrire :

$$I = I_{ph}\text{-}I_d\text{-}I_{sh} \qquad \text{(II.1)}$$

Le courant qui passe dans la résistance *R*sh est donné par :

$$I_{sh} = \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \qquad \text{(II.2)}$$

Le courant dans la diode est donnée par :

$$I_d = I_s \left[e^{\frac{(V+IR_S)}{nV_t}} - 1 \right] \quad \text{(II.3)}$$

Le courant de saturation de la diode est donné par :

$$I_s = I_{sc} \left(\frac{T}{Tref}\right)^3 e^{\frac{q*Eg0}{n*k}} \quad \text{(II.4)}$$

Le photo-courant I_{ph} est donné par :

$$I_{PH} = \frac{G}{G_{ref}} \left(I_s + k_i \left(T - T_{ref}\right)\right) \quad \text{(II.5)}$$

Ou :

$V_t = \frac{KT}{q}$: Tension thermique à la température *T*.

q : Charge de l'électron ($1.602 \times 10^{-19} C$).

K : Constante de Boltzmann ($1.381 \times 10^{-23}\ j/k$).

K_i : Constante($0.0032 A/cm^2\ K^3$).

n : Facteur de non idéalité de la jonction.

T : Température effective de la cellule en Kelvin.

E_g *:* Énergie de gap (pour le silicium cristallin est égale à 1.12 eV).

T_{ref} : La température de référence (298,15 °K).

G_{ref} : L'ensoleillement de référence (1000W/m²).

G : l'ensoleillement (W/m^2).

N_s : Totale nombres des cellules en sérieN_s.

V_{oc} : la tension en circuit ouvert de la cellule (V).

V : la tension à la borne de la cellule.

R_s: La résistance série (Ω).

R_{sh}: La résistance shunt(A).

I_{sc} : Le courant de court-circuit standard (aux conditions standards).

Donc Le courant de sortie d'une cellule photovoltaïque se met sous la forme mathématique suivante:

$$I = I_{ph} - I_s\,[e^{\frac{q(V+IR_S)}{Ns\,n\,kT}} - 1] - \frac{V+IR_S}{R_{sh}} \qquad \text{(II.6)}$$

2.2.1.1 Influence des différents paramètres sur la caractéristique I (V)

a. Influence de l'éclairement

Les figures ci-dessous *(*Figure II.2, Figure II.3*)* montrent l'effet d'un éclairement variable sur la caractéristique P-V et de I-V de la cellule solaire sous une température constante (298 K).

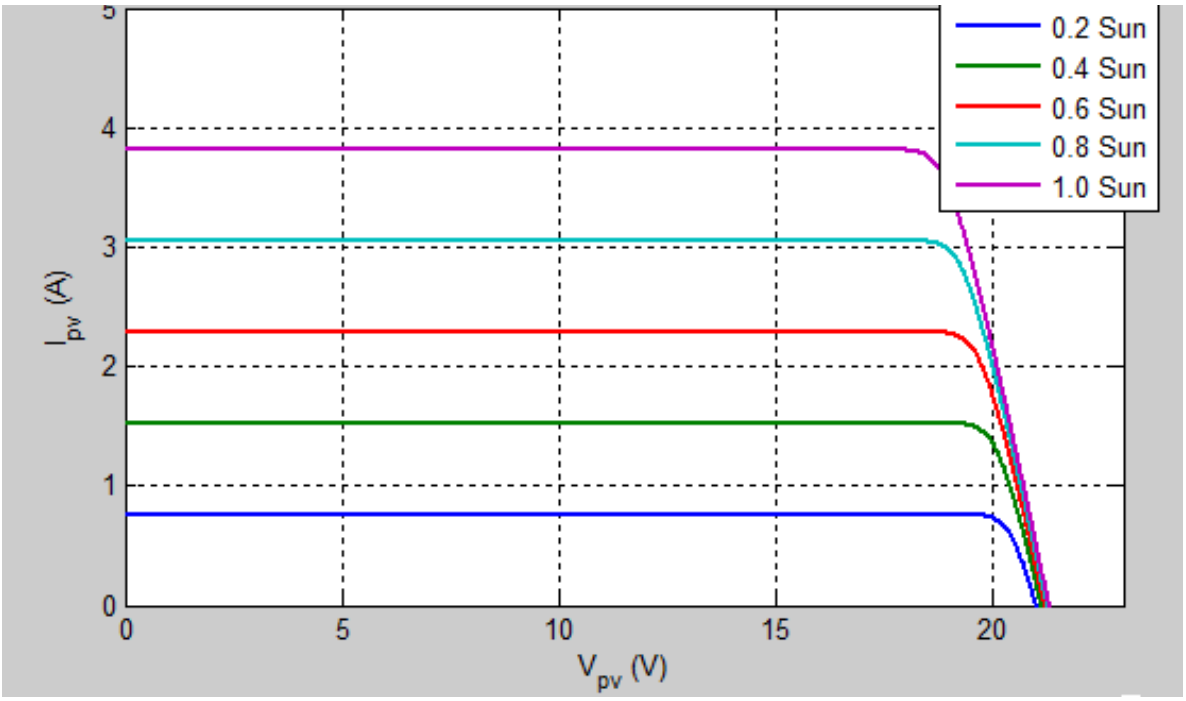


Figure II.2 : Courbes courant-tension pour différentes éclairement, T=298K**.**

On remarque que la valeur du courant du court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les

mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclairement, la Figure (II.3) présente un exemple des courbes. Puissance-tension pour différents niveaux de rayonnements.

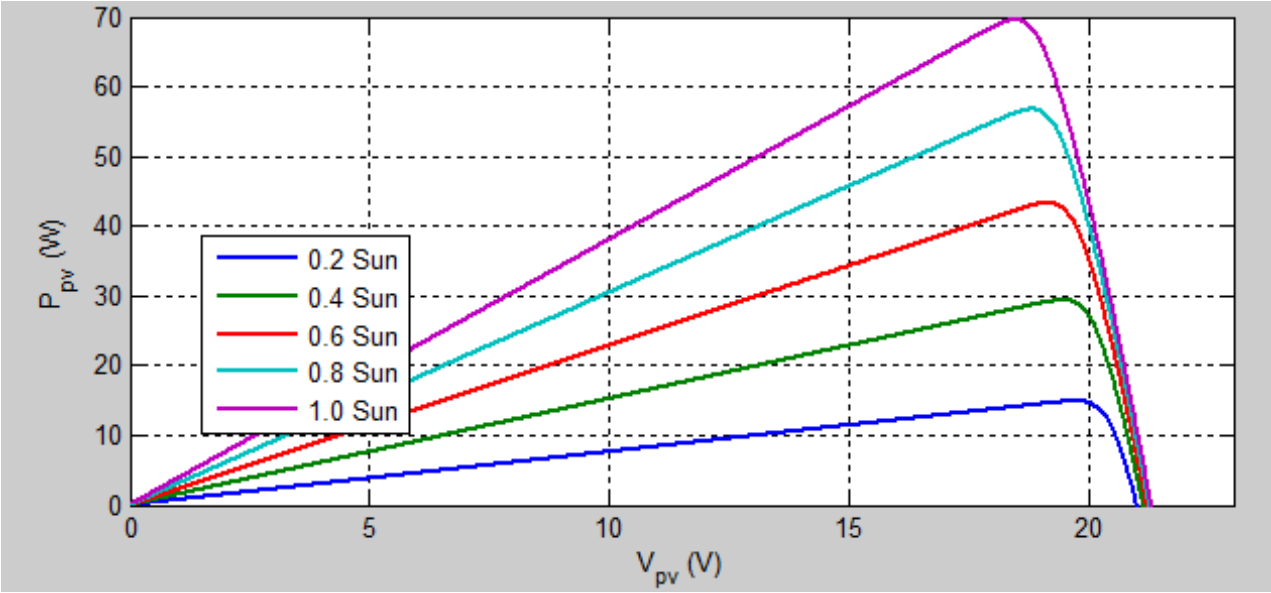


Figure II.3 : Courbes puissance-tension pour différents éclairements, T=298K.

On peut remarquer sur la Figure (II.3) que l'augmentation de l'éclairement traduit aussi par une augmentation de la puissance maximale disponible.

b. Influence de la température

La Figure (II.4) représente des courbes courant-tension pour différentes températures de fonctionnement de la cellule PV.

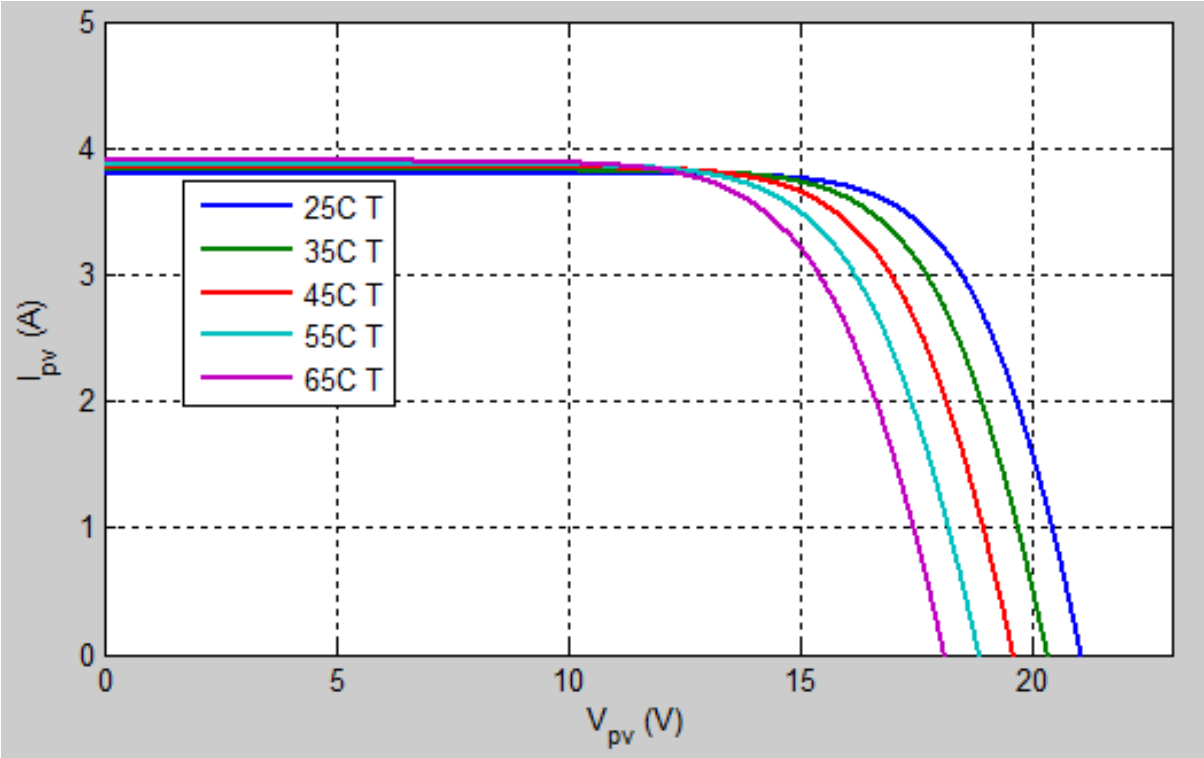


Figure II.4 : Courbes courant-tension pour différentes températures, E=1000[W/m²].

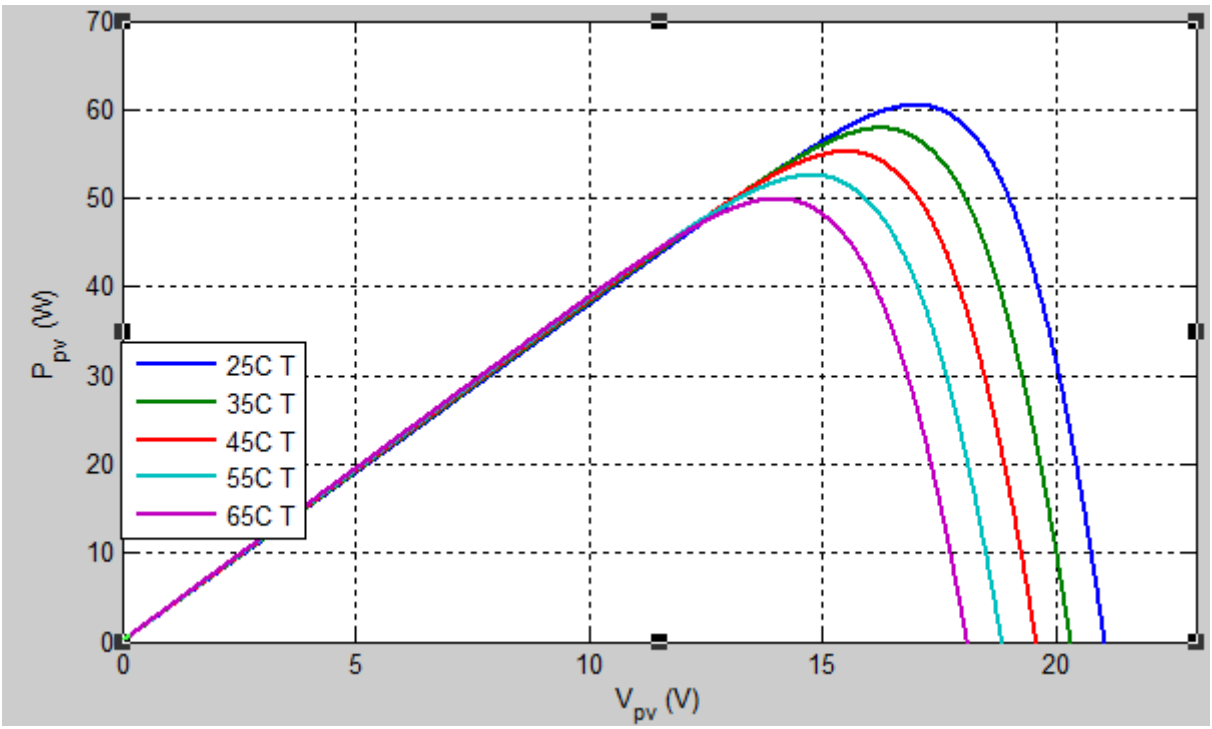


Figure II.5 : Courbes puissance-tension pour différentes températures, E=1000[W/m²].

La Figure (II.5) présente des courbes puissance-tension pour différentes températures de fonctionnement de la cellule PV.

On remarque que la température à une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente, par conséquent la puissance extractible diminue. Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera impérativement prise en compte, Il est important de savoir que la puissance du panneau diminue d'environ 0,5% par degré d'augmentation de la température de la cellule au-dessus de 25 °C [26].

c. Influence des résistances série et shunt

Les performances d'une cellule photovoltaïque sont d'autant plus dégradées que la résistance série est grande ou que la résistance shunt est faible, La Figure (II.6 a) montre l'influence de la résistance série sur la caractéristique I = f (V) de la cellule. La courbe en pointillés correspond à une valeur non nulle de Rs. Cette influence est traduite par une diminution de la pente de la courbe I = f (V) dans la zone où la cellule fonctionne comme source de tension. La chute de tension correspondante est liée au courant généré par la cellule.

Quant à la résistance shunt, elle est liée directement au processus de fabrication, et son influence ne se fait sentir que pour de très faibles valeurs de courant, La Figure (II.6 b) montre que cette influence se traduit par une augmentation de la pente de la courbe de puissance de la cellule dans la zone correspondant à un fonctionnement comme source de courant. Ceci provient du fait qu'il faut soustraire du photo-courant, outre le courant direct de diode, un courant supplémentaire variant linéairement avec la tension développée [26].

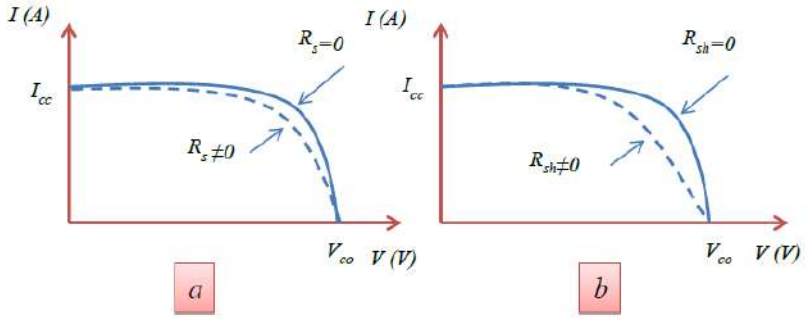


Figure II.6 : Influences des résistances séries et shunt.

2.2.2.2 Association des cellules photovoltaïques

Une cellule photovoltaïque seule est peu utilisable, sa faible épaisseur la rend très fragile et elle produit une très faible puissance électrique de l'ordre de 1 à 3 W, avec une tension de moins de 1V. Ainsi pour accroitre la puissance, on assemble ces cellules soit en série, soit en parallèle.

a. Association série

L'association en série permet ainsi augmenter la tension de l'ensemble et donc accroitre la puissance de l'ensemble [27].

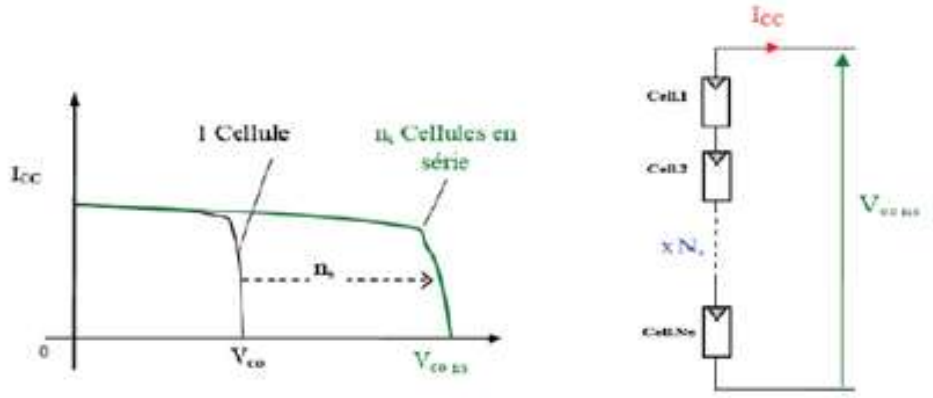


Figure II.7 : Caractéristique résultants d'un groupement de Ns cellules en série.

b. Association parallèle

Tandis que les connexions en parallèle de plusieurs cellules augmentent le courant pour la même tension.

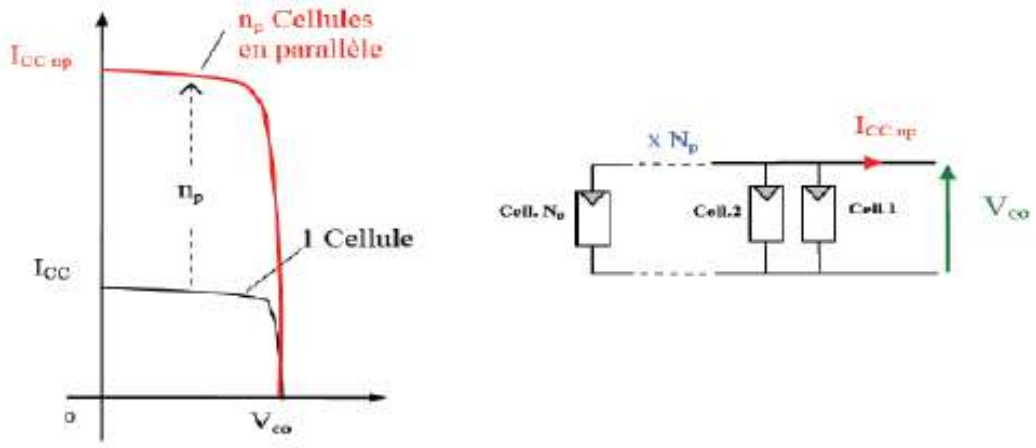


Figure II.8 : Caractéristique résultants d'un groupement de Np cellules en parallèle.

2.2.2 Modélisation du générateur éolienne

Le dispositif étudié ici, est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur R entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain G.

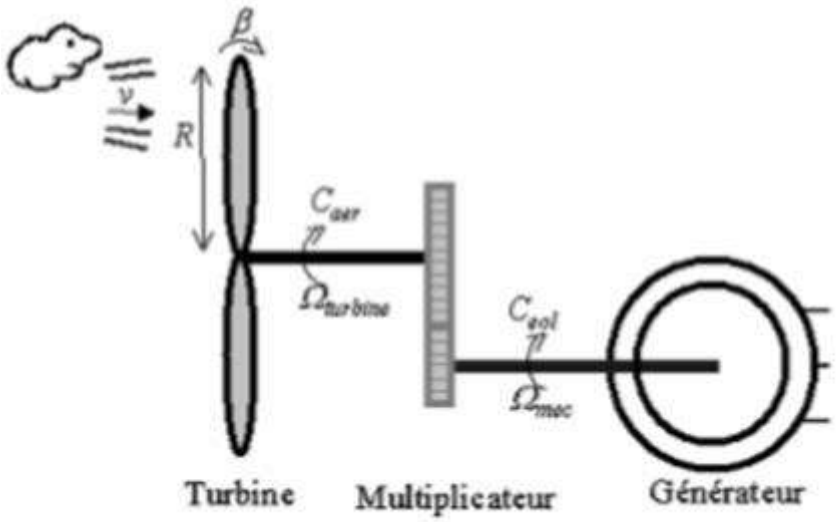


Figure II.9 : schéma la turbine éolienne.

La puissance du vent ou la puissance éolienne est définie de la manière suivante [28] :

$$P_V = \frac{\rho.S.v3}{2} \qquad \text{(II.7)}$$

Avec :

- ρ : densité de l'air (approxima 1.2 kg/m^3 à la pression atmosphérique à 15° C).

- S : surface circulaire balayée par la turbine (le rayon du cercle est déterminé par la longueur de pale).

- v : vitesse du vent.

La puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit alors :

$$P_{aer} = C_P P_V = C_P(\alpha,\beta) \frac{\rho.S.v^3}{2} \quad \text{(II.8)}$$

Le coefficient de puissance C_P représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne.

Il dépend de la caractéristique de la turbine [28].

La figure (II.10) représente la variation de ce coefficient en fonction du rapport de vitesse α.

Et de l'angle de l'orientation des pales β.

Le rapport de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent :

$$A = \frac{\Omega_{turbine}.R}{V} \quad \text{(II.9)}$$

$\Omega_{turbine}$ est vitesse de turbine.

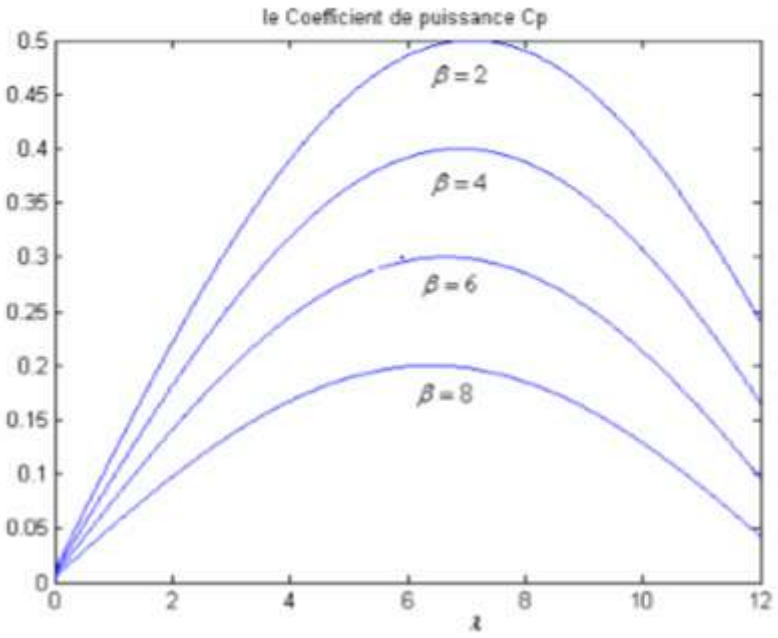


Figure II.10 : coefficient aérodynamique en fonction de vitesse de la turbine.

A partir de relevés réalisés sur une éolienne de 1.5 MW, l'expression du coefficient de puissance a été approchée pour ce type turbine, par l'équation suivante [29]:

$$C_p = (0.5-0.167).(\beta-2).\sin\left[\frac{\pi.(\alpha+0.1)}{18.5-0.3(\beta-2)}\right]-0.00184\,(\alpha-3).(\beta-2) \qquad \text{(II.10)}$$

β : L'angle de l'orientation des pales.

Connaissant la vitesse de la turbine, le couple aérodynamique est donc directement déterminé par :

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turbine}} = C_p.\frac{\rho.S.v3}{2}.\frac{1}{\Omega_{turbine}} \qquad \text{(II.11)}$$

2.2.3 Modélisation du système de stockage

Vue la grande diversité de type d'éléments de batterie ainsi le nombre très varié de paramètres qui interviennent, une représentation très empirique du comportement de la batterie peut être établie. Le système de stockage utilisé dans une installation Photovoltaïque est une batterie d'accumulateur au plomb. Jusqu'à maintenant, il existe plusieurs modèles de la charge de batterie ont été proposés.

Dans cette étude, nous avons utilisé un modèle peut être décrit par (Bogdan et Salameh, 1996) qui permet de calculer la capacité de stockage en fonction de la puissance produite par le générateur photovoltaïque et la charge demandée.

2.2.3.1 Modèle de la charge de la batterie

Quand la puissance de générateur PV est plus grande que la charge, les batteries sont à l'état de charge, la capacité des batteries au temps t peut être décrite par [30] :

$$C_{Bat}(t) = C_{Bat}(t-1).(1-\sigma) + (P_{pv}(t) - P_L(t/)\eta_{inv}).\eta_{bat} \qquad (II.12)$$

$C_{Bat}(t)$ et $C_{Bat}(t-1)$ sont les quantités de la charge et la décharge des batteries au temps (t) et (t-1) respectivement, σ est le taux horaire de la charge spontané, P_{pv} est la puissance du générateur PV, P_L est la charge demandée au temps t, η_{and} et η_{Bat} sont le rendement de l'onduleur et de la batterie successivement.

Pendant la charge de la batterie, le rendement est 0.65–0.85 selon le chargeant courant, par contre pendant le processus de décharge, le rendement de batterie a été mis égal à 1.

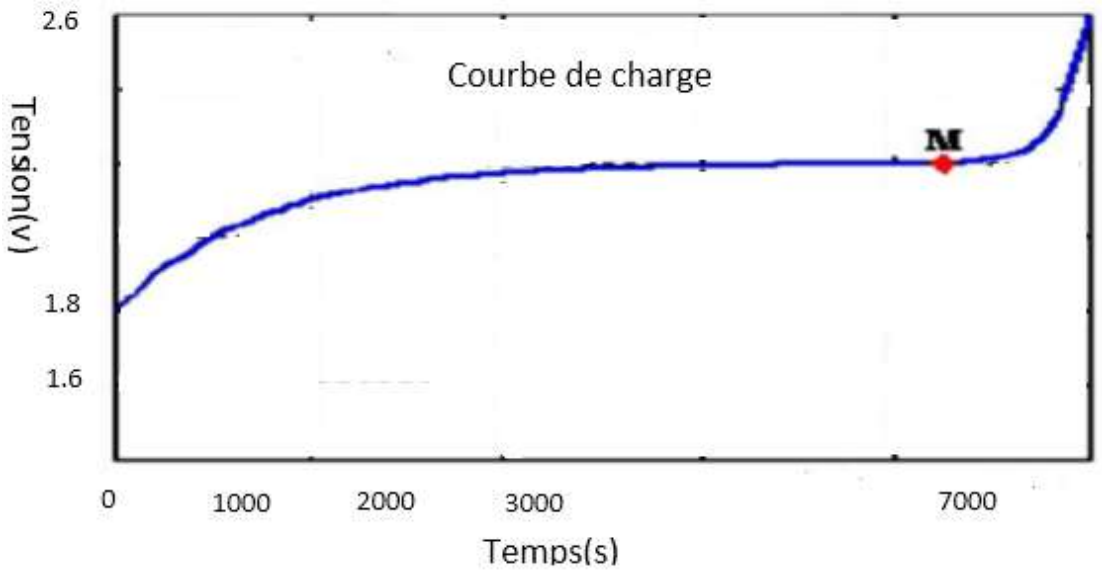


Figure II.11: Évolution de la tension durant la charge d'un accumulateur au plomb.

2.2.3.2 Modèle de la décharge de la batterie

Quand la demande de charge est plus grande que la puissance produite, la capacité des batteries au temps t peut être exprimée comme suite [30] :

$$C_{Bat}(t)=C_{Bat}(t-1).(1-\sigma)+(P_L(t)/\eta_{inv}-P_{pv}(t)) \quad \text{(II.13)}$$

Es est sujette aux contraintes suivantes :

$$C_{Bat\,min} \leq C_{bat}(t) \leq C_{Bat\,max.}$$

Ici, la capacité de la batterie maximale prend la valeur de la capacité nominale de la Batterie ($C_{Bat\,min} = C_{Bat\,max}$), et la capacité minimum est déterminée par la profondeur de la charge (DOD) [38]:

$$C_{Bat\,min} = DOD.\ C_{Bat.N} \quad \text{(II.14)}$$

La valeur maximale de l'état de charge (SOC) est égale à 1, et le minimum est déterminé par le maximum de profondeur de décharge, $SOC_{min} = 1- DOD$ Selon les caractéristiques des fabricants, la durée de vie des batteries peut être prolongée au maximum si DOD prend les valeurs de 30-50% [31].

La capacité de stockage est une fonction de la charge demandée et de son autonomie.

Elle peut être estimée par la relation suivante:

$$C_{Bat} = \frac{E_L.N_a}{\eta_{Bat}.F_{dech}.DOD}\,[WH] \quad \text{(II.15)}$$

$$C_{Bat}[ah] = \frac{C_{Bat}}{V_b}\,[WH] \quad \text{(II.16)}$$

C_{Bat} : La capacité de stockage de la batterie.

N_a : Le nombre de jours d'autonomie.

V b : La tension du système.

DOD : La profondeur de la décharge.

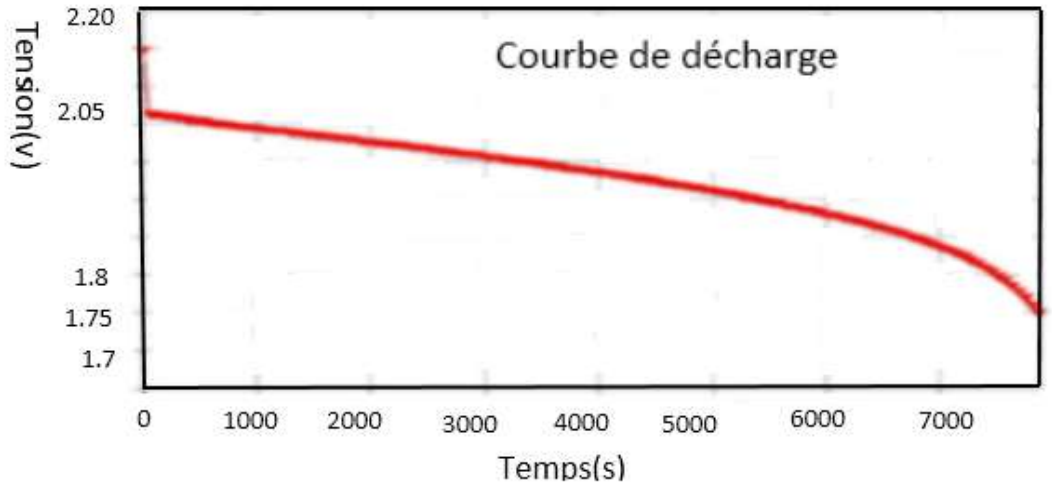


Figure II.12 : Évolution de la tension durant la décharge d'un accumulateur au plomb.

2.3.3 Modélisation du système de conversion

L'onduleur est un dispositif de conversion, il est important de connaître la relation liant la puissance à la l'onduleur à celle entrante.

Cette caractéristique est représentée par la fonction [22]:

η_0= f (P_{ch}) ou encore η_0= f (taux de charge).

La charge étant alimentée en courant alternatif, un onduleur est donc présent entre le bus continu et la charge (voir Figure IV-18). Il existe diverses équations pour définir le rendement d'un onduleur en fonction de la puissance délivrée.

L'onduleur est considéré comme un dispositif de transformation en énergie alternative, d'une énergie de type continu provenant soit du système de stockage, soit directement de champ PV. De tels dispositifs devraient délirer une tension alternative à fréquence déterminée c'est-à-dire le signal généré par ce dernier doit être le plus sinusoïdal possible. Ces onduleurs sont largement utilisés, mais les appareils existant ont l'inconvénient majeur de présenter des pertes, à vide ou à faible charge, très élevées, leur rendement n'est donc acceptable qu'à pleine charge.

L'onduleur monophasé est caractérisé par son rendement en fonction de la puissance fournie à l'utilisation. Le modèle de rendement se traduit par la relation empirique suivante :

$$\eta_{ond} = a.\ (1\text{-}\exp\ (b.\tau)) \qquad \text{(II.17)}$$

a et b sont des constantes (a =0,9559 ; b = -609164).

τ : Taux de charge, donnée par : $\tau = \frac{P_{ch}}{P_n}$.

P_n : puissance nominale de l'onduleur.

P_{ch} : puissance à la sortie de l'onduleur.

La variation du rendement de l'onduleur en fonction de taux de charge est représentée sur la figure suivante:

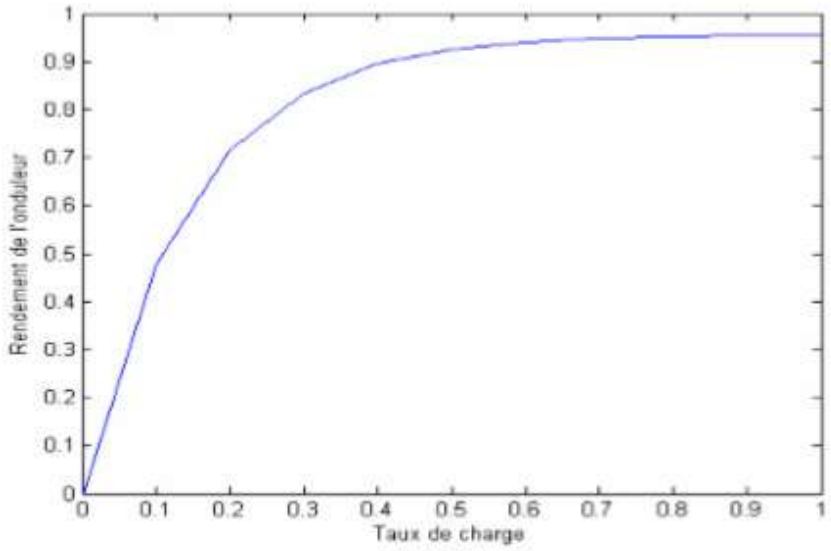


Figure II.13 : Rendement de l'onduleur.

Nous verrons par la suite que le choix de la puissance nominale de l'onduleur en fonction de son application est primordial si l'on veut éviter des pertes énergétiques importantes.

2.3 Conclusion

La modélisation de chaque composant du système hybride PV/éolienne complet a été élaborée à partir de modèles de la littérature (champ PV, générateur éolienne, convertisseurs, stockage batteries) ; cette modélisation 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.

L'implémentation de ces modèles dans un environnement de simulation adapté permettra d'étudier le comportement des composants en fonction de certains paramètres.

L'outil ainsi réalisé sera utilisé pour déterminer le dimensionnement optimal d'un tel système pour des cas d'applications définis dans les chapitres suivants.

Pour des raisons économiques, l'étude reste incomplète ce qui nécessite de faire un bon dimensionnement.

Chapitre 3 :

La méthode LPSP

3.1 Introduction

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

Plusieurs méthodes du dimensionnement des systèmes d'énergies hybrides ont été réalisées par des chercheurs. La méthode que nous allons utiliser, se base sur une analyse technico-économique. Nous allons appliquer la méthode de la probabilité de non satisfaction de la charge LPSP (Loss of Power Supply Probability),

Par la suite, à partir des configurations qui satisfont la demande obtenue, constituées de la puissance éolienne, de la puissance photovoltaïque et du nombre de batteries, nous utilisons l'approche économique pour déterminer la configuration optimale.

3.2 Définition du dimensionnement

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

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

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

En effet, comment dimensionner chacun des éléments en termes de puissance et de capacité afin d'assurer une alimentation permanente de la charge, tout en obtenant une énergie au moindre coût ? Par exemple, sur un simple système équipé de batteries et de panneaux Photovoltaïques, que faut-il privilégier : une grande surface de panneaux photovoltaïques tout en minimisant la capacité des batteries ou l'inverse, au risque de

faire subir des décharges très profondes qui endommageraient les batteries ? Répondre à ce problème d'optimisation, plusieurs solutions ont été proposées. Il s'agit de fournir au concepteur une solution permettant de dimensionner de manière optimale un système autonome de production d'électricité [32].

3.3 Dimensionnement des systèmes d'énergie hybrides

La conception des systèmes d'énergies hybrides exige la sélection et le dimensionnement de la combinaison la plus appropriée des sources d'énergie, des convertisseurs et du système de stockage, ainsi que l'implémentation d'une stratégie de fonctionnement efficace [33, 34]. De plus, pour obtenir un taux de pénétration important des sources d'énergie renouvelable, sans la dégradation de la qualité de l'énergie fournie, une étude de dimensionnement du système hybride s'impose [35].

Les logiciels de dimensionnement sont des outils indispensables pour l'analyse et la comparaison des différentes combinaisons possibles des sources utilisées dans les systèmes d'énergies hybrides. Les principaux facteurs du dimensionnement sont :

- Les conditions environnementales du site (vitesse du vent, éclairement énergétique, température, humidité).
- Le profil de charge.
- Les préférences et les demandes du client.
- Les ressources financières.
- La disponibilité de la technologie et le support technique.

Il existe plusieurs logiciels de dimensionnement et de simulation des systèmes d'énergies hybrides [36, 37] :

HOMER, SOMES, RAPSIM, SOLSIM, INSEL…etc. tous ces logiciels ont pour d'optimiser les systèmes hybrides, mais les stratégies d'optimisation sont différentes. Une brève description de chaque outil est donnée ci-après :

- **HOMER** : c'est un outil développé par « National Renewable Energy Laboratory » (NREL), capable de dimensionner et d'optimiser un système

hybride contenant différents composants : éolienne, PV, micro-hydrocentrale, diesel, réseau, pile à combustible et batteries, HOMER exécute des simulations pour toutes les configurations possibles du système dans le but de vérifier si elles sont réalisables. HOMER estime ensuite le Coût d'installation et de fonctionnement du système et propose une liste des configurations, classées par rapport au Coût de leurs cycles de vie.

- **SOMES** : c'est un outil de simulation et d'optimisation des systèmes d'énergies renouvelables. SOMES est développé par l'Utrecht University, au Pays Bas. Les composants disponibles sont : PV, éolienne, générateur diesel, réseau électrique, batteries de stockage et plusieurs types de convertisseurs. La simulation est réalisée sur une base de temps horaire. Le système optimal est trouvé en comparant les couts de plusieurs systèmes, dans les limites définies par l'utilisateur.

- **RAPSIM** : ce logiciel a été développé par la Murdoch University Energy Research Institute d'Australie. Il est conçu pour simuler des systèmes d'énergies alternatives tels que des générateurs PV, des éoliennes et des générateurs diesels. Un dimensionnement optimal est réalisé par tâtonnement. Les utilisateurs changent les paramètres du système (nombre de batteries, d'éoliennes, puissance des générateurs diesels) et jugent le résultat pour choisir la meilleure solution répondant à leurs besoins.

- **SOLSIM** : est développé au Fachhochschule Konstanz, en Allemagne. C'est un outil de simulation qui permet aux utilisateurs de concevoir, analyse et optimiser des systèmes connectés ou pas à un réseau et des systèmes d'énergies hybrides. Les sources d'énergie disponibles sont : des panneaux PV, des éoliennes, des installations de biogaz ou biomasse, des batteries et des générateurs diesels. SOLSIM est un logiciel qui comporte des outils différents : un programme de simulation général appelé SolOpti, une unité de calcul des Coûts du cycle de vie appelée SolCal et l'unité simulant des générateurs éoliens appelée SolWind.

- **INSEL** : est développé par l'université d'Oldenburg d' Allemagne. Il réalise la simulation des systèmes d'énergie renouvelable. C'est un logiciel de simulation basé sur des diagrammes blocs où chaque bloc représente un composant d'une

puissance prédéterminée. Les utilisateurs doivent sélectionner des blocs à partir d'une bibliothèque et les interconnecter pour définir les systèmes d'énergie à étudier.

3.4 Dimensionnement du système

L'étude de dimensionnement est toujours confrontée à deux critères essentiels qui sont le gisement solaire et la demande de l'énergie. Le dimensionnement d'une installation solaire photovoltaïque revient à déterminer le nombre nécessaire des modules photovoltaïques constituants le générateur photovoltaïque, pour adopter un système PV suffisant pour couvrir les besoins de la charge à tout instant, et de déterminer la capacité de charge de la batterie. Ces deux éléments sont les plus importants en raison du coût élevé qu'ils totalisent, plus de deux tiers du coût de l'installation. La méthode de dimensionnement optimal LPSP (Loss of Power Supply probability) ou probabilité de perte d'énergie est la plus utilisée pour l'optimisation de la puissance crête du générateur photovoltaïque et la capacité du stockage en fonction de l'éclairement solaire du site et le nombre de jours d'autonomie souhaité.

3.5 Description de la méthode LPSP

Pour un système équilibré, la quantité d'énergie fournie par les modules solaires doit au moins compenser la quantité d'énergie, ceci en fonction du lieu de l'installation, de la saison, et des conditions particuliers de consommation et d'utilisation.

Dimensionner un système revient à déterminer l'ensemble des éléments de la chaine PV en fonction des sollicitations telles que l'ensoleillement et le profil de charge. Il n'y a pas d'échelle fixe entre la consommation et la taille du générateur. Il existe plusieurs méthodes de dimensionnement d'un système PV : par la fonction utilisabilité horaire, par la probabilité de pertes d'énergie, par les méthodes itératives…etc.

La méthode de probabilité de pertes d'énergie (LPSP :loss of power supply probability) que nous avons adopté pour cette étude est une technique probabiliste introduite par Abou Zahr et Ramakumar en 1990 dans le domaine des systèmes de génération éoliens et photovoltaïques [38]. Elle est largement utilisée dans la

conception et l'optimisation de systèmes autonomes (stand-alone) éolien-photovoltaïques jusqu'à présent [39,40]. Elle est basée sur le concept de LPSP qui est la probabilité que le système rencontre une pénurie à un moment donné pendant une période d'analyse, c'est-à-dire un état dans lequel le système ne serait pas en mesure de fournir l'énergie nécessaire à la charge. A partir de l'information sur la variabilité des ressources et sur sa corrélation avec la charge, la LPSP peut être calculée. Cette méthode est particulièrement utile lors de l'évaluation du comportement d'un stockage d'énergie.

La LPSP définie par la fraction mensuelle de la charge moyenne sur une longue période non couverte par le système photovoltaïque.

La LPSP exprime le taux de non-satisfaction de la charge. En terme d'état de charge des batteries, la '*LPSP*' est définie par [41,42] :

$$LPSP = P_r\left\{E_{bat}(t) \le E_{bat\min} \xrightarrow{pour} t \le T\right\} \qquad \text{III.1}$$

C'est-à-dire, la probabilité (P_r) pour que l'état de charge, à tout instant t, soit inférieur ou égal au seuil minimal de l'énergie disponible dans la batterie E_{Bmin}.E_B (t) est l'énergie stockée dans la batterie à n'importe quel instant t, exprimée en [Wh].

$$C_{bat}[Wh] = C_{bat}.V_{bat} \qquad \text{III.2}$$

C_{bat}: La capacité nominale de la batterie

V_{bat} : La tension nominale de la batterie.

L'énergie produite conjointement par l'aérogénérateur et le générateur photovoltaïque en une heure, notée EG (t), peut être exprimée par la relation suivante :

$$EG(t) = NpvEpv + Ew(t) \qquad \text{III.3}$$

Avec: Ew (t) qui est l'énergie produite par l'aérogénérateur, Epv (t), l'énergie produite par le générateur photovoltaïque et Npv le nombre de modules photovoltaïques.

- **Premier scénario**

Si l'énergie produite par les deux sources dépasse l'énergie demandée par la charge, la batterie se charge en considérant son rendement de charge $\eta_{B,ch}$:

$$Cb(t)=Cb\ (t-1) + (E_G(t)- \frac{E_L(t)}{\eta_{ond}})\ \eta_{B,ch} \quad \text{III.4}$$

- **Deuxième scénario**

Quand l'énergie demandée par la charge est supérieure à l'énergie produite, la batterie se décharge pour combler le déficit, dans ce cas précis, l'énergie stockée dans la batterie peut être exprimée par la relation suivante:

$$Cb(t)=Cb\ (t-1) + (\frac{E_L(t)}{\eta_{ond}} - E_G(t)) \quad \text{III.5}$$

Avec: η_{ond} le rendement de l'onduleur; le rendement de charge de la batterie, Cb (t) l'énergie stockée dans la batterie à une heure t, Cb $(t-1)$ l'énergie stockée dans la batterie à l'heure précédente, EL (t) l'énergie demandée par la charge à une heure t.

Dans ce cas, on a deux possibilités :

- La première : $Cb\ (t-1) + (\frac{E_L(t)}{\eta_{ond}} - E_G(t)) > Cbmin$ III.6

Alors $LPS\ (t)$=0.

- La deuxième : $Cb\ (t-1) + (\frac{E_L(t)}{\eta_{ond}} - E_G(t)) < Cbmin$ III.7

Quand l'énergie stockée dans le banc de batteries et celle produite conjointement par les deux sources est insuffisante pour satisfaire la demande pour une heure t, ce déficit est appelé perte d'énergie (Loss of Power Supply _ '*LPS*'), il est exprimé par [43]:

$$LPS=EL - (EG(t) + Cb(t-1) - Cbmin)\eta_{ond} \quad \text{III.8}$$

La probabilité de perte d'énergie '*LPSP*' pour une période d'analyse T, est le rapport de la somme de toutes les valeurs de perte d'énergie LPS(t) pour la même période sur

l'énergie totale demandée. La probabilité de perte d'énergie '*LPSP*' est définie par la relation suivante [43]:

$$\text{LPSP}=\sum_{t=1}^{t} LPS(t) \Big/ \sum_{t=1}^{t} E_L(t) \qquad \text{III.9}$$

La méthode de dimensionnement consiste à déterminer le nombre optimal d'accessoires qui correspond à un bon fonctionnement du système avec un coût minimal.

Le coût total nécessaire pour la réalisation d'une installation PV sera déterminé par la relation suivante [44]:

$$C_T = aN_{PV} + bN_{bat} + C_{T0} \qquad \text{III.10}$$

Où :

a est le prix de module,

b est le prix de la batterie,

C_{T0} Le coût total constant incluant les coûts de l'étude de l'installation.

La solution optimale de la relation est donnée par la relation suivante:

$$\frac{\partial \mathrm{N_{bat}}}{\partial \mathrm{N_{pv}}} = -\frac{a}{b} \qquad \text{III.11}$$

Après la détermination des différents couples (N**b**,N**pv**), satisfaisant une 'LPSP' désirée, on constate que le nombre de modules est une fonction non linéaire du nombre de batteries.

Cette solution est graphiquement illustrée sur la figure ci-dessous. Elle correspond à la pente de tangente à la courbe au point de contact 'S'.

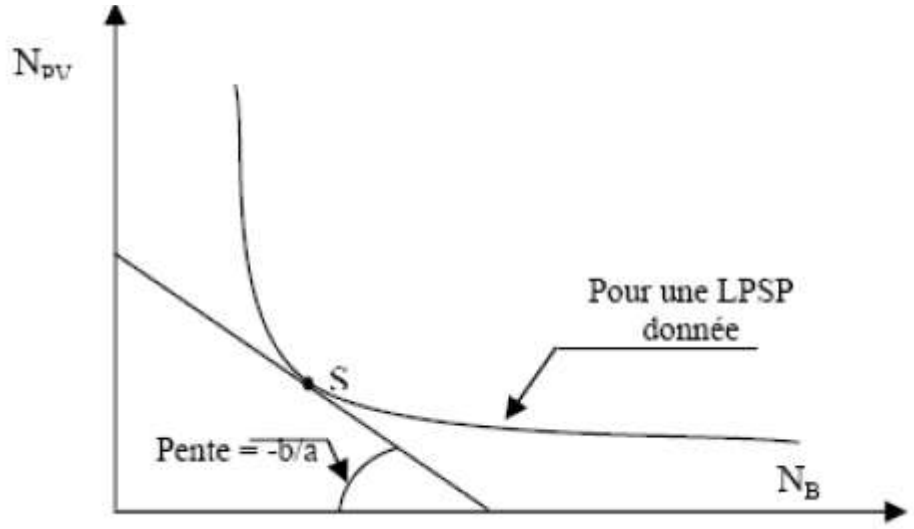


Figure III.1: Tracé du nombre de modules en fonction du nombre de batteries pour une 'LPSP' donnée.

3.6 Application de la LPSP à l'installation PV

Nous appliquons dans ce qui suit la méthode de dimensionnement optimal LPSP à notre profil de charge, ce qui nous permettra alors de présenter nos résultats de simulations que nous avons obtenus par le biais de programme que nous avons effectué sous environnement Matlab basé sur la méthode de dimensionnement LPSP.

La première étape à suivre avant de réaliser tout dimensionnement consiste à déterminer le moment où nous avons besoin d'électricité, et à définir notre consommation qui ne devra être ni sous-estimé ni surestimé. Cette étape demande relativement beaucoup de réflexion car une erreur à ce stade faussera nos résultats. Donc au départ, nous choisissons le profil de consommation d'énergie électrique, ainsi que le choix d'une architecture du système.

Avec les données de la première étape, il vous sera possible de connaître le nombre de modules photovoltaïques nécessaires pour couvrir les besoins en électricité. Il faut pour cela calculer l'énergie que les modules doivent produire chaque jour, et connaitre l'ensoleillement de la région où se trouve l'installation. La quantité d'électricité produite par les modules photovoltaïques dépend directement de cet ensoleillement et donc de la région.

Toujours la première étape nous permettra également de calculer le nombre de batterie. L'énergie stockée dépend directement de la périodicité de votre consommation.

L'étape qui suit a pour objectif de dimensionner le régulateur de charge. Cette étape ne comporte aucun calcul, mais il existe une grande variété de régulateurs qui diffèrent selon leurs options, leurs fonctions et leur puissance. Il faudra donc prendre le temps de choisir le régulateur le mieux adapté à votre situation.

Une autre étape consiste à choisir le convertisseur si cet appareil est nécessaire c'est-à-dire si notre charge fonctionne en mode AC. En effet, l'installation peut déjà fournir du courant continu 12, 24 ou 48VDC, et certains appareils fonctionnent avec du 12VDC. Il n'est peut-être pas nécessaire de transformer notre courant continu en alternatif.

3.7 Méthodologie adoptée

Pour atteindre au dimensionnement et la simulation d'un système hybride PV-éolien-Batterie, nous allons suivre les étapes suivantes :

- Le choix d'un profil de consommation d'énergie électrique représentatif du site.
- Le dimensionnement du système par la méthode LPSP.
- Extraction du nombre des modules et la capacité de stockage électrochimique.
- Interprétation des résultats.

3.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la méthode de calcul pour l'optimisation du dimensionnement de système hybride photovoltaïques/éolienne autonomes basé sur le concept LPSP.

L'objectif principal de ce dimensionnement est de déterminer la configuration optimale pour système hybride éolienne, photovoltaïque pour satisfaire la puissance demandée par la charge.

Chapitre 4 :

Résultats et simulation du système hybride photovoltaïque - éolien

4.1 Introduction

Les chapitres précédents ont présenté une description théorique des différents constituants d'un système hybride PV- éolienne.

Dans ce chapitre, nous allons présenter le dimensionnement d'un système hybride pour l'électrification rurale d'un site dans le sud Algérien, Le programme de simulation est réalisé sous Matlab, Les résultats sont présentés et analysés, Les étapes de calcul sont les suivantes :

- Ressources météorologiques.
- Le profil de charge.
- Paramètres du système.
- Dimensionnement des composants.
- Simulation du système et exploitation des résultats et performances.

4.2 Présentation du site et ressources météorologiques

4.2.1 L'emplacement du système hybride

Le site choisi pour cette étude est un village rural saharien isolé situé dans la wilaya de Ghardaïa. Le solaire photovoltaïque associé à un générateur éolien comme appoint pourrait alors constituer une solution durable et plus appropriée pour une alimentation en énergie propre et non polluante.



Figure IV.1 : localisation géographique du site de Ghardaïa en Algérie.

4.2.2 Les données météorologiques

Les performances des modules photovoltaïques sont directement corrélées aux données climatiques qui sont en principe l'irradiation solaire en (Wh/m^2) et la température ambiante en ($^{\circ}C$).

Les données météorologiques journalières sont prises grâce au système l'ONM pour les deux périodes de l'année (hivernale et estivale).

a. Irradiation

L'évaluation annuelle de l'ensoleillement du site pour les deux périodes hiver (octobre jusqu'à mars) et été (avril jusqu'à septembre) est présentée dans les figures (Figure IV.2 a, et b**)**.

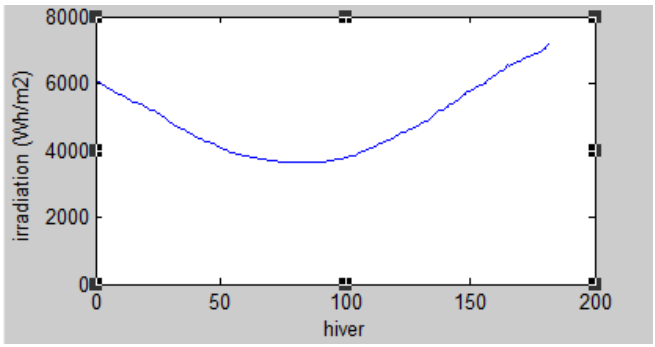


Figure IV.2.a: Évolution de l'ensoleillement Mensuelle Hiver (octobre jusqu'à mars).

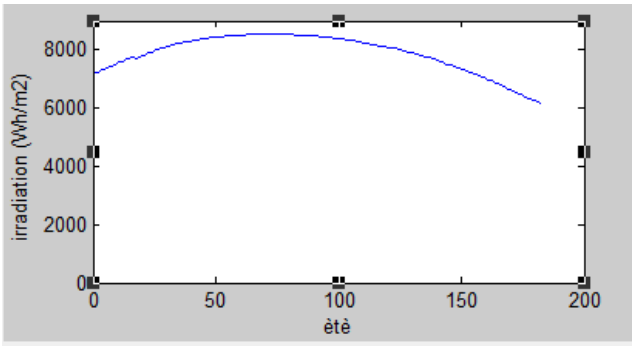


Figure IV.2.b: Évolution de l'ensoleillement Mensuelle Hiver (avril jusqu'à septembre).

Nous notons que les valeurs d'irradiation pour (octobre jusqu'à mars) vont de 4000 à 7000 (Wh/m2), et de 6000 à 8000 (Wh/m2) En augmentation pour (avril jusqu'à septembre).

b. température

Pour la température de la région de Ghardaïa, de la même manière, nous sommes procurés, auprès de l'ONM les valeurs journaliers pour les deux périodes été et hiver.

Les graphes représentent la variation de la température mensuelle, Comme le montre sur les figures (IV.3 a, et b).

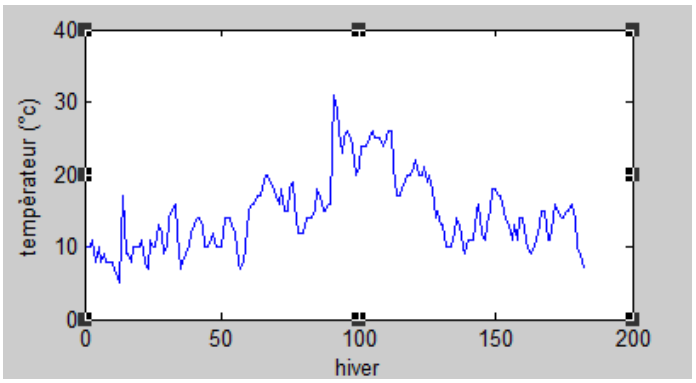


Figure IV.3.a : Évolution de température Mensuelle Hiver (octobre jusqu'à mars).

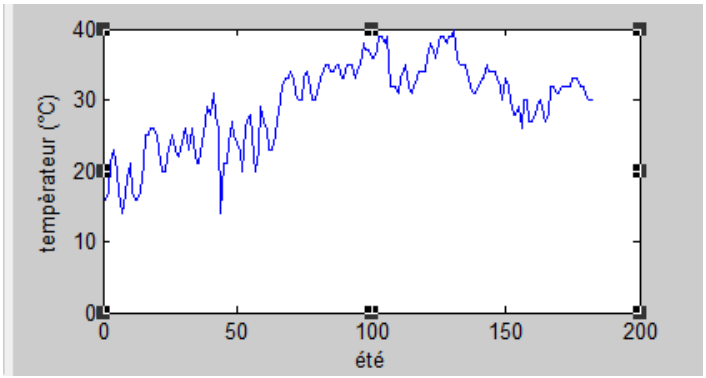


Figure IV.3.b : Évolution de température Mensuelle été (avril jusqu'à septembre).

La température mensuelle est varié entre le jour et la nuit, pour (octobre jusqu'à mars) elle variée entre 8 et 31°C, et entre 15 et 40°C pour les mois de (avril jusqu'à septembre).

C. Vitesse de vent

Pour la vitesse de vent de la région de Ghardaïa, de la même manière, nous sommes procurés, auprès de l'ONM les valeurs journaliers pour les deux périodes (été et hiver) est présentée dans les figures (Figure IV.4 a, et b**)**.

.

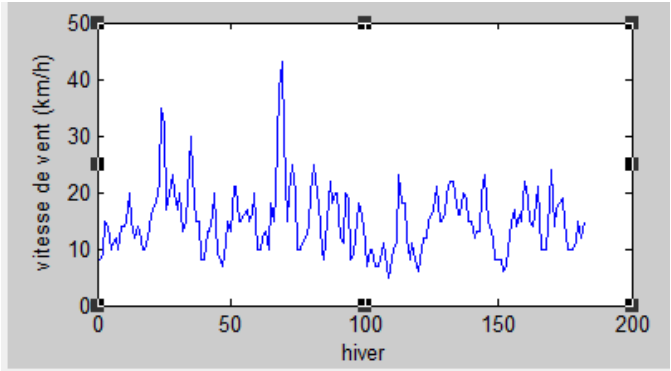


Figure IV.4.a : Évolution de vitesse vent Mensuelle hiver (octobre jusqu'à mars).

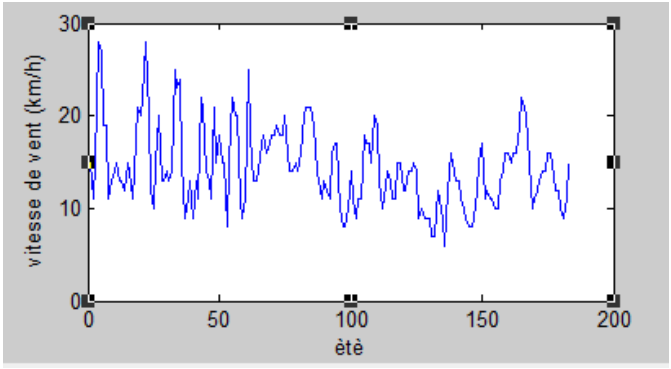


Figure IV.4.b : Évolution de vitesse vent Mensuelle été (avril jusqu'à septembre).

La vitesse de vent mensuelle est varié entre le jour et la nuit, pour (octobre jusqu'à mars) elle variée entre 8 et 43 km/h, et entre 7 et 28 km/h pour les mois de (avril jusqu'à septembre).

4.2.3 Le profil de charge

Cette étude tient en compte l'aspect niveau de vie, traditions, comportement et habitudes. Ainsi, nous avons choisi un profil de consommation dont la demande consiste essentiellement à satisfaire les besoins énergétiques de base (éclairage, réfrigération, TV, ventilation…), Le nombre d'habitations à électrifier est 10 habitations. Par ailleurs, nous avons considérés les hypothèses suivantes :

- L'habitation sera occupée en permanence durant toute l'année.

Les équipements électriques sont à basse consommation et fonctionnent sous une tension standard 220V-50 HZ (tension secteur), il ne faudra pas que l'utilisateur puisse remplacer les appareils à basse consommation par des appareils à consommation normale.

Tableau IV.1 : la consommation (10 habitations) des appareils électriques pour les deux périodes (octobre jusqu'à mars) et (avril jusqu'à septembre).

	(octobre jusqu'à mars) Hiver		**(avril jusqu'à septembre) été**	
	Fonctionnement des appareilles	**Consommation (KWH)**	**Fonctionnement des appareilles**	**Consommation (KWH)**
00h	R	3.5	R+Vent	4.5
01h	R	3.5	R	3.5
02h	R	3.5	R	3.5
03h	R	3.5	R	3.5
04h	R	3.5	R	3.5
05h	R	3.5	R	3.5
06h	R+4L+Rad	37.5	R+4L	7.5
07h	R+4L+Rad+TV	41	R+4L+TV	11
08h	R+4L+M.LV+TV	26	R+4L+M.LV+TV	26
09h	R	3.5	R	3.5
10h	R	3.5	R	3.5
11h	R+4L	7.5	R+4L	7.5
12h	R	3.5	R	3.5
13h	R+TV	7	R+TV+Clim	22
14h	R+Fer	17.5	R+Fer+Clim	32.5
15h	R	3.5	R+Clim	18.5
16h	R	3.5	R	3.5
17h	R	3.5	R	3.5
18h	R	3.5	R	3.5
19h	R+TV+4L+F.E+Rad	61	R+TV+4L+F.E	32.1
20h	R+TV+4L+Rad	41	R+TV+4L	11
21h	R+TV+4L	11	R+TV+4L+Vent	12
22h	R+4L	7.5	R+4L+Vent	18.5
23h	R	3.5	R+Vent	4.5
total		55080		44100

Tableau IV.2 : Symboles pour tous les appareils électriques.

Equipment Electrique	**Symbole**	**Equipment Electrique**	**Symbole**
Réfrigérateur	R	Machine à laves	M.LV
Télévision	TV	Four Electrique	F.E
Les lampes	L	Radiateur	Rad
Le fer	Fer	Ventilateur	Vent
Climatiseur	Clim		

Les graphes représentent la variation de la consommation horaires, Comme le montre sur les figures (IV.5 a, et b).

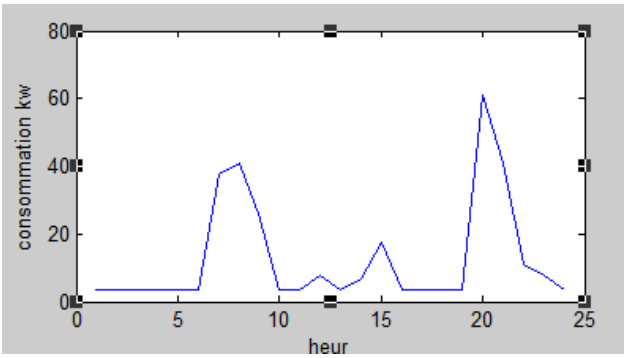


Figure IV.5.a : Évolution de consommation Horaires (hiver).

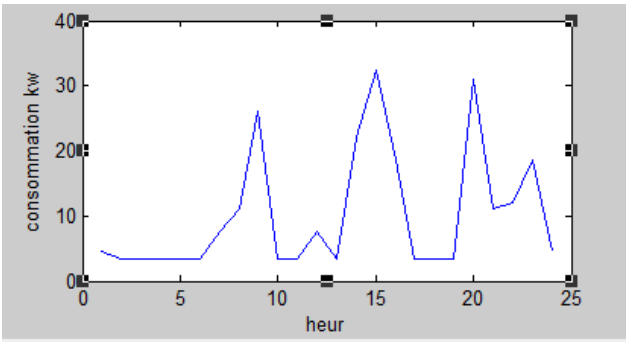


Figure IV.5.b : Évolution de consommation Horaires (été).

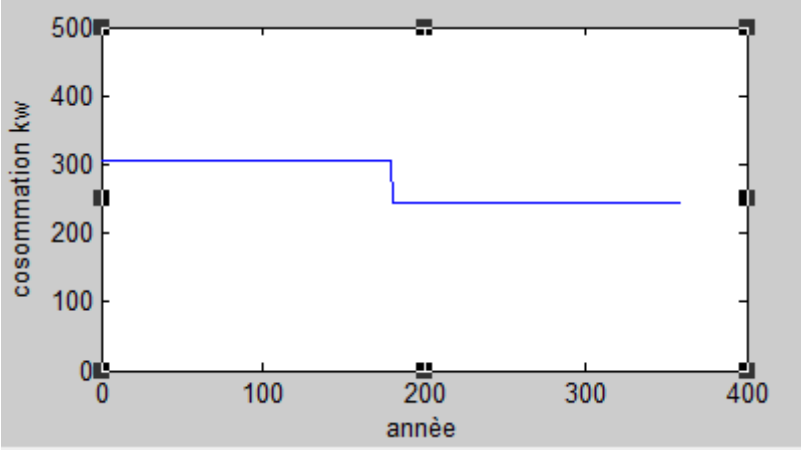


Figure IV.6 : Évolution de consommation pour année.

La demande énergétique de consommation pour la période hivernale (306 kwh/j) est supérieure que la période estivale (245 kwh/j).

4.3 Système d'étudie

La configuration d'un système hybride photovoltaïque/éolien choisi pour notre étude est présenté dans la figure (Figure IV.6). Ici le générateur éolien est interconnecte sur le bus de courant alternatif (AC), et l'installation photovoltaïque et la batterie sont liées sur un autre bus de courant continu (DC). Les deux bus sont connectes à l'aide d'un convertisseur électronique bidirectionnel qui peut travailler soit comme redresseur, lorsque le générateur éolienne couvre la consommation électrique et participe dans le chargement de la batterie, soit comme onduleur, quand la charge (ou une part d'elle) est satisfaite par les panneaux photovoltaïques et/ou la batterie. De cette façon, la charge peut être alimentée par les deux bus simultanément.

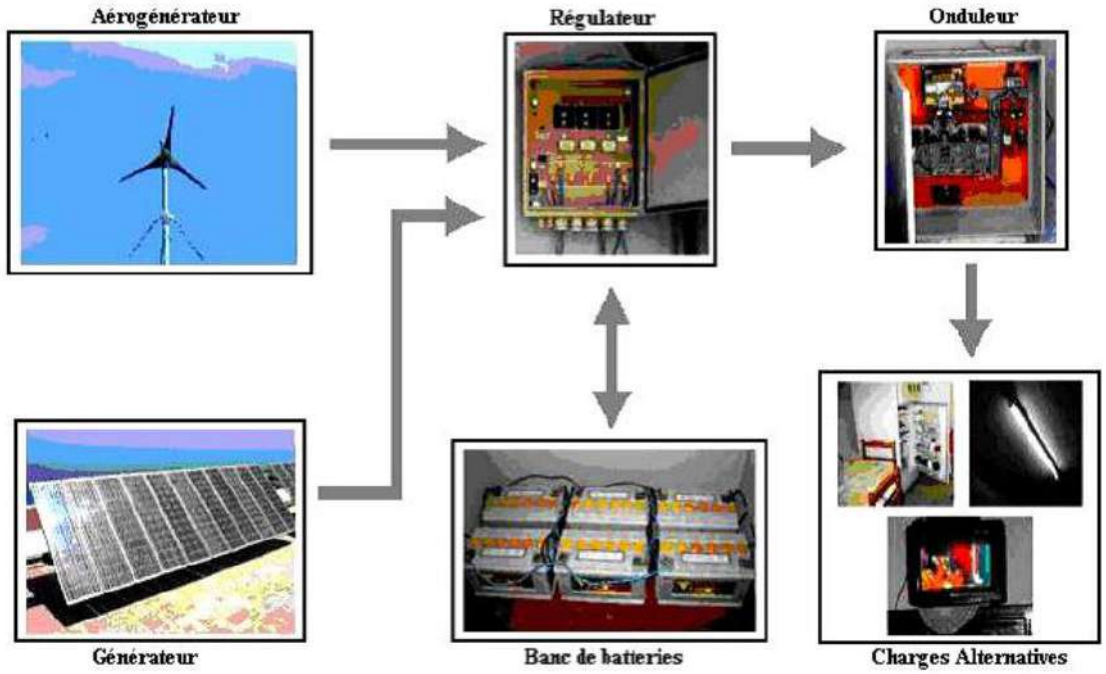


Figure IV.7 : Schéma synoptique du système hybride étudié.

Ce système est associé à des batteries qui permettent d'assurer le stockage de l'énergie. D'autre part, le système nécessite des onduleurs DC/AC pour convertir le courant continu en courant alternatif. La méthode LPSP est appliquée sur cette architecture de base pour tester toutes les configurations possibles afin de déterminer le dimensionnement optimal en KW de notre système (Ppv, Péolien, Pconv, Nombre de batterie) afin de satisfaire la demande de charge.

4.4 Les différents éléments du système

Avant d'entamer le dimensionnement de notre système, nous présentons ses principaux éléments.

4.4.1 Générateur photovoltaïque

Les caractéristiques électriques de notre panneau photovoltaïque sont données dans le tableau suivant :

Tableau IV.3 : Les caractéristiques électriques du module PV

Module PV	**Caractéristiques électriques**
Puissance crête (W_p)	245 **W**
Tension de circuit ouvert (V_{oc})	37.68 **V**
Tension max (V_{mp})	30.1 **V**
Courant de court-circuit (I_{sc})	8.68 **A**
Courant max (I_{mp})	8.14 **A**

Pour utiliser au mieux le module photovoltaïque, nous chercherons son fonctionnement au maximum de puissance disponible. Ainsi, le régulateur doit inclure une fonction dite « MPPT » (Maximum Power Point Tracking) qui jouera le rôle d'adaptateur d'impédance entre le module photovoltaïque et la charge [45].

4.4.2. Générateur éolien

- la vitesse du vent est variable
- et que chaque machine éolienne est caractérisée par la vitesse de démarrage Vd, une vitesse nominale Vn et une vitesse d'arrêt Vm spécifiques

4.4.3 Les batteries

Les batteries choisies seront de préférence :

- Des batteries fermées (Valve Regulated Lead Acid) dans lesquelles l'électrolyte est stabilisé par un gel ou un matériau AGM (Absorbent Glass Mat).
- Des batteries à plaques tubulaires dites batteries « stationnaire ».

Pour les systèmes de petite puissance, une tension de 12V est préférée, les récepteurs alimentés en 12V étant plus fréquents, mais au-delà de 2.5 KWh stockés, on passera en 24V ou plus pour limiter les pertes ohmiques en gardant des sections de câble raisonnables. Les batteries sont commercialisées en cellules de 2V, de 200Ah à 3000 Ah ou en ensemble 12V jusqu'à 400Ah. On évitera si possible de mettre en parallèle des batteries.

4.4.4 L'onduleur

Les caractéristiques principales d'un onduleur autonome sont les suivantes :

- La tension d'entrée (12V, 24V ou 48V).
- La tension de sortie 220 AC à 50Hz.
- Le rendement généralement >90% en fonctionnement nominal.
- La consommation en mode veille (2 ou 3% de la puissance nominale).
- Les protections (court-circuit charge, chute de tension coté batterie).
- Le prix très variable selon le type et la puissance des charges utilisées.

4.4.5 Régulateur de charge

Le régulateur doit assurer des fonctions de protections :

- Pour éviter une décharge de la batterie dans le panneau.
- Pour éviter une surcharge ou une décharge profonde de la batterie.
- En cas de court-circuit coté charge.

Son rôle est aussi de contrôler le transfert d'énergie entre le générateur photovoltaïque, la batterie et la charge en fonction :

- De la disponibilité de la ressource et de l'état de charge de la batterie.
- Du caractère prioritaire ou non de la charge.

Des fonctions d'affichage sont aussi généralement disponibles.

4.5 Dimensionnement du système

Le dimensionnement d'une installation photovoltaïque revient à déterminer le nombre nécessaire des modules photovoltaïques constituants le générateur photovoltaïque ainsi que la capacité de charge des batteries .Ces deux éléments sont les plus importants en raison du coût élevé qu'ils totalisent, plus de 50% du prix de l'installation.

4.5.1. Dimensionnement du banc des batteries

La capacité des batteries pour une période de temps est donnée par l'équation suivante :

La capacité de la batterie (en Watt heure) : $$C_{bat}(Wh) = \frac{E_T \cdot AUT}{DOD}$$ IV.1

La capacité en Ah est donnée par la relation suivante : $$C_{bat}(Ah) = \frac{C_{bat}(Wh)}{V_{bat}}$$ IV.2

C_{bat} : Capacité nominale de la batterie (Wh ou Ah)

E_T : Energie totale consommée / jour (Wh/Jour)

AUT : Autonomie du système (Jours)

DOD : Profondeur de décharge de la batterie

V_{Bat} : Tension nominale de la batterie (V)

Pour notre système, nous avons :

V_{bat}= 12 V, AUT = 3 jours, DOD = 0.8; E_T = 306 KWh/j (hiver), E_T = 245 KWh/j donc :

C_{bat}= 1147.5 KWh (hiver) **C_{bat} =95625 Ah (hiver)**

C_{bat}= 918.75 KWh (été) **C_{bat}= 76562.5 Ah (été)**

4.5.2 Dimensionnement du générateur photovoltaïque

Après avoir dimensionné le banc des batteries, on passera maintenant au dimensionnement du générateur photovoltaïque. Ce dimensionnement s'appuie sur la méthode LPSP, Ce qui nous permettra alors de présenter nos résultats de simulations que nous avons obtenus par le biais de programme que nous avons effectué. L'organigramme du calcules illustré dans la (figure IV.8).

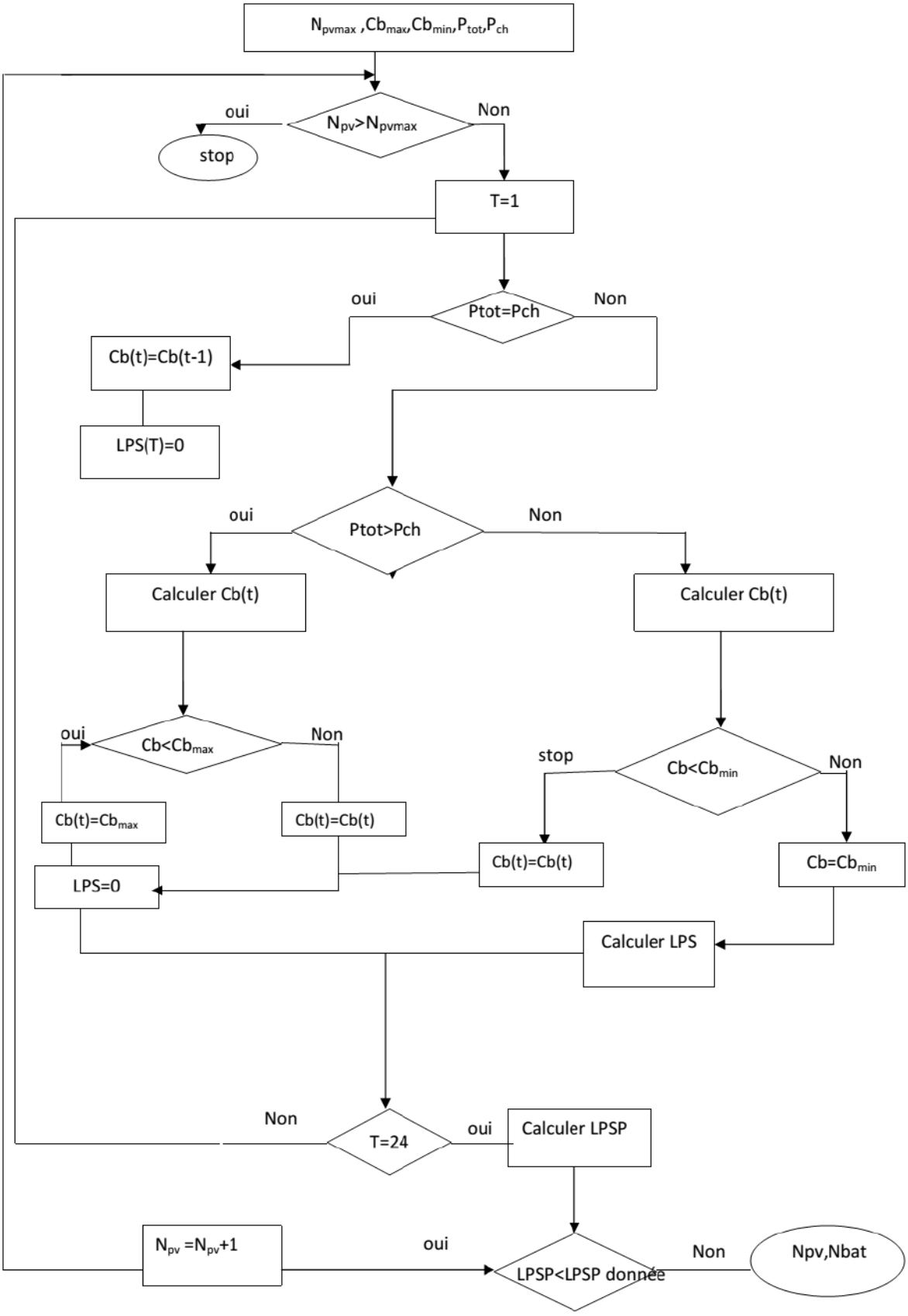


Figure IV.8: Algorithme graphique de la LPSP.

4.6 Résultats de dimensionnement

A l'aide de Matlab, nous avons programmé et simulé le fonctionnement du système hybride. Notre programme de simulation offre des résultats horaires du système hybride. La simulation a été basée sur les paramètres d'entrée du système suivants :

- le module photovoltaïque

- La puissance maximale crête du module Pc= 245 W.

- La tension de circuit ouvert V_{oc} = 37.68 V.

- Le courant de court-circuit I_{sc} = 8.68 A .

- La tension crêt maximale V_m = 30.1 V.

- Le courant maximal crêt I_m = 8.14 A.

- générateur éolien

- La puissance nominale à 12 m/s : 1 kW.

- Nombre de pales : 3.

- La vitesse de démarrage 2 (m/s).

- La vitesse de coupure 15 (m/s).

- Diamètre du rotor 2,7 m.

- la batterie de plomb

- Capacité de stockage Cbat= 1147.5 KWh (hiver).

- Capacité de stockage Cbat= 918.75 KWh (été).

- Rendement : 85 %.

- Tension du banc des batteries = 12 V

- Convertisseur DC/AC

- Rendement : 92 %

- Tension d'entrée : 12 Vdc

Selon les conditions météorologiques (éclairement, température et vitesse de vent) et la demande de charge nous avons abouti aux résultats suivants :

Pour un LPSP donnée, le nombre de modules photovoltaïques est donné dans Tableaux (IV.4 et IV.5), Pour notre système, nous avons choisi LPSP = 0.02 qui donne un nombre de modules PV égale à.

Tableau IV.4 : Nombre des panneaux PV en fonction de LPSP (hiver).

LPSP	**0.02**
Nombre des panneaux PV	270
Nombre des batteries	378

Tableau IV.5 : Nombre des panneaux PV en fonction de LPSP (ètè).

LPSP	**0.02**
Nombre des panneaux PV	186
Nombre des batteries	302

Les résultats de simulation pour la saison hiver, montre que le couple optimale est de 270 modules et de 378 batteries, et la saison été nous avons trouvé 186 modules et de 302 batteries.

Tableau IV.6 : les rèsultas des ènergies (hiver).

Puissance photovoltaïque	0.245 kW
Puissance nominale de éolienne	1 kW
Capacité des batteries	433755 kW
Energie total photovoltaïque du période hivernale	17901 kWh/an
Energie total éolienne du période hivernale	37179 kWh/an

Tableau IV.7 : les rèsultas des ènergies (été).

Puissance photovoltaïque	0.245 kW
Puissance nominale de éolienne	1 kW
Capacité des batteries	277462.5 kW
Energie photovoltaïque du période estivale	8463 kWh/an
Energie éolienne du période estivale	35637 kWh/an

on remarque que l'énergie pv (17901 kwh/an) et éolien (37179 kwh/an) dans la periode hiver est grand par rapport l'énergie pv (8463 kwh/an) et eolien (35637 kwh/an) de la periode été a cause de la consommation (profile de charge).

4.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une méthode de dimensionnement optimal du générateur photovoltaïque et du banc de batteries dans un système hybride de production d'électricité (éolien -photovoltaïque) totalement autonome. Pour une charge et une probabilité de perte d'énergie données.

Après avoir adopté un profil de consommation correspondant à celui rencontré généralement dans les sites isolés, et un nombre optimal de batterie et de modules photovoltaïque (Npv,Nb) a été calculé après avoir calculé la puissance produite par l'aérogénérateur, et par le GPV pour une période d'analyse d'une année au site de ghardaia.

D'après les résulte de simulation, et un profil de la charge demandée, plus un rendement de batteries de 85% et un rendement de convertisseur de 92%. Nous avons trouvé que, le couple optimal (Module, Batterie) pour couvrir les besoins de la charge est (270,378) (186,302) pour les saisons hiver,été successivement.

La détermination optimale de batteries et modules photovoltaïque dépend du site choisi, profile de charge et aussi du rendement des composants du système hybride photovoltaique-èoliene.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Les travaux présentés dans ce mémoire concernent la production d'électricité à partir d'un système hybride (photovoltaïque-éolienne) avec un système de stockage totalement autonome et Une contribution à l'étude des sources d'énergie solaire et éolienne et de leur complémentarité ainsi que la possibilité d'adaptation entre ces deux sources et la charge.

L'objectif était de maintenir un niveau de fiabilité élevé grâce à un dimensionnement optimal de systèmes hybrides (photovoltaïque-éolienne) pour une charge et une probabilité de perte d'énergie donnée sous le critère d'un prix minimum du système, Un nombre optimale de batterie et de modules photovoltaïque a été calculé après avoir calculer la puissance produite par l'aérogénérateur et par le générateur photovoltaïque pour une période d'analyse d'une année au site de Ghardaïa.

La production d'électricité par le système hybride (photovoltaïque-éolienne) avec un système de stockage répond bien à la problématique posée par le contexte énergétique actuel.

En Algérie, la nature du terrain et la durée de l'ensoleillement lui a permis d'être un des pays modèle dans la production d'énergies renouvelables La formulation d'une méthode d'optimisation a permis de calculer pour les différents couples (Nb, Npv) avec un LPSP donnée.

En premier temps, nous avons parlé sur l'énergie renouvelable et puis étudié le principe et l'influence de chaque composant constituant le système PV et l'aérogénérateur éolienne et Dans la partie de la modélisation ont présenté la modélisation de chaque composante de système hybride (photovoltaïque-éolienne) avec soin.

Concernant les résultats de simulation et d'optimisation que nous avons obtenus que la méthode choisie donne de bonnes estimations de la contribution à la résolution des problèmes énergétiques, il est intéressant de développer des sources décentralisées de cette énergie.

Dans la recherche de telles solutions, le système hybride peut être un moyen très économique d'électrifier le paysage attenant.

Références bibliographies

[1] HASSINI BELGHITRI Houda : Modélisation, Simulation Et Optimisation D'un SytèmeHybride Eolien-Photovoltaïque, Mémoire de magister, Département de Physique, universitéAbou-Bakr Belkaid de Tlemcen, 2010.

[2] SLAMA Fateh : modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique, mémoire de magister; université ferhat abbas – setif, 2011.

[3] BELHADJ Mohamed :"modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome", Mémoire de Magister, université de Bechar, 2008.

[4] ANNE Labouret, MICHEL Villoz : énergie solaire photovoltaïque, live, dunod, paris 4éédition, 2009.

[5] A.BENKHELIFA : Modélisation et expérimentation d'un capteur solaire plan a eau Influence de l'intensité de l'éclairement solaire et de l'inclinaison du capteur solaire sur le rendement du capteur, université ouargla, 2012.

[6] SOUILAMAS Nesrine et KRIMI Romaissa : étude et simulation d'une structure à base de couches minces pour le photovoltaïque, mémoire de master; université Saad dahlab de Blida ,2014.

[7] HADJ BELKACEMI Mohammed : modélisation et étude expérimentation d'un capteur solaire non vitré et perforé, mémoire de magister, université abou bekr belkaid de tlemcen , 2011.

[8] BENKHELIFA Abdelaziz : modélisation et expérimentation d'un capteur solaire plan à eau influence de l'intensité de l'éclairement solaire et de l'inclinaison du capteur solaire sur le rendement du capteur, mémoire de magister, université kasdi merbah ouargla ,2012.

[9] K.HELALI : Modélisation d'une cellule photovoltaïque, étude comparative, Mémoire de MAGISTER, UMMTO (Tizi-Ouzou), juin 2012.

[10] BOUCHRITTE Wafa : convertisseurs multi-niveaux dans les systèmes pv connectés au réseau, mémoire de master, université mohamed khider-biskra, 2015.

[11] NAOUAL S : Modélisation et Extraction Automatique des Paramètres d'un Générateur, Université Ferhat Abbas de Sétif Mémoire de Magister, Département d'électrotechnique, 2010.

[12] CHEBOUTI A, GUERRAB S : Intégration d'un système photovoltaïque au réseau électrique en utilisant des différentes techniques de commande des convertisseurs DC/DC, mémoire de master, UNIVERSITÉ YAHIA FARES DE MEDEA,2019.

[13] REGGANE M , DIDJA D: ″ Etude d'une installation photovoltaïque pour l'alimentation en électricité d'un centre enfûté de GPL(NAFTAL) ″, Mémoire de Master, UMMTO 2012.

[14] BELMILI H, AYAD M, BERKOUK E et HADDADI M : ″ Optimisation de dimensionnement des installations photovoltaïques autonomes – Exemples d'applications, éclairage et pompage au fil du soleil ″, Revue des énergies renouvelables, Ecole Nationale Polytechnique, 2008.

[15] MECHOUMA R : Contribution à l'étude des onduleurs dans les systèmes photovoltaïques, applications pour les charges, Thèse de doctorat, Université Hadj Lakhdar-Batna, mars 2015.

[16] K. Farah. CH. Nesrine **:** Commande d'un générateur photovoltaïque débitant sur une pompe (MPPT), Université Abou Bakar Belkaid-Tlemcen, Algérie 2014.

[17] FARAH Bilal : " étude d'un système hybride photovoltaïque –éolienne ", mémoire magister,université badji mokhtar annaba,2015.

[18] BOGDAN SB, SALAMAH ZM : « Methodology for optimally the combination of a battery bank and PV array in a wind/PV hybrid system », IEEE transaction on Energies conversion 11(2), 367-375, 1996.

[19] LAVERDURE N, ROYE D, BACHA S, BELHOMME R :"Technologie des systèmes éoliens – intégration dans les réseaux électriques", la Revue 3EL, no. 39, 2004.

[20] P. Leconte, M. Rapin et E. Szechenyi : " Eoliennes : "Techniques de l'Ingénieur, BM 4640, 2005.

[21] http://www.windpower.org/fr/tour/wtrb/comp/index.htm: Danish Wind Industry Association, 2010. .

[22] DAHBI M : « Etude et optimisation d'une installation Hybride PV-Eolienne Autonome » ,Mémoire de magister, option physique énergétique, 2007.

[23] LABBE J : "L'hydrogène électrolytique comme Moyen de Stockage d'électricité Pour Systèmes Photovoltaïques Isoles", Thèse de Doctorat, l'Ecole des Mines de Paris, pp, 5-17-18-21-50-68-69, 21 décembre 2006.

[24] ABDOUNE A, KARAOUI Ridha : Modélisation et optimisation du système photovoltaïque, mémoire de master, UNIVERSITE DE M'SILA 2012..

[25] D. Salim : « Simulation d'un système photovoltaïque alimentant une machine asynchrone » Université Ferhat Abbase De Setif, Algérie, 2011 MF3949.

[26] LOUAZENE Mohamed Lakhdar : Contribution à l'optimisation des systèmes photovoltaïques utilisés pour l'irrigation dans les zones sahariennes–Application zone d'Ouargla, Dis, Université de Batna 2, 2015.

[27] Hamid, Nurul F, Nasrudin A, Jeyraj S: "Solar cell parameters identification using hybrid Nelder-Mead and modified particle swarm optimization", Journal of Renewable and Sustainable Energy 8.1, 2016

[28] L. Xu & W. Cheng: "Torque and reactive power control of a doubly fed induction machine by position sensorless schem ", IEEE Tran, On Industry Application 31 (1995), no. 3, p. 636{642, mai/juin 1995.

[29] E.S Abdin ,w.xu : « control design and dynamic performance analysis of a wind turbine – induction generator unit», IEEE Trans, on energy conversion , vol 15, N° 1 ,March 2000.

[30] BOGDANd S.B., SALAMAH Z.M., 1996 : « Methodology for optimally sizing the combination of a battery bank and PV array in a wind/PV hybrid system », IEEE Transactions on Energy Conversion 11 (2), 367–375.

[31] BIN A., Hongxing, Y., Shen, H., Xianbo, L: «Computer aided design for PV/Wind hybrid system », Renewable Energy, 2003.

[32] ZIDANE Nourredine : Étude et Dimensionnement des Systèmes de Production d'Energies Renouvelables, Mémoire de Magister, UNIVERSITE FERHAT ABBAS SETIF1,2014

[33] M. A. Elhadidy, S. M. Shaahid : "Parametric study of hybrid (wind+solar+diesel) power generating systems", Renewable Energy, Vol. 66, No. pp. 129-139, Elsevier Science 2000.

[34] M.Muselli, G. Notton, A. Louche : "Design of hybrid-photovoltaic power generator, with optimization of energy management", Solar Energy, Vol. 65, No. 3, pp. 143-157, Elsevier Science 1999.

[35] W. Kellogg, M.H. Nehrir, G. Venkataramanan, V. Gerez :"Optimal unit sizing for a hybrid wind/photovoltaic generating system", Electric Power Systems Research, Vol. 39, No. pp. 35-38, 1996.

[36] L. H. Hansen, P. Lundsager, : "Review of relevant studies of isolated systems", Riso-R-1109 (EN) 2000.

[37] D.Turcotte, M. Ross, F. Sheriff : "photovoltaic hybrid system sizing and simulation tools: status and needs", PV Horizon: Workshop on photovoltaic hybrid systems, Montreal, 2001.

[38] Abouzahr I., RamakumarR :"Loss of power supply probability of stand-alone wind electric conversion systems", a closed solution approach. IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 5, n° 3, pp. 445-452, 1990.

[39] F.M.A. Ghali , M.M Abd El Aziz, F.A. Syam :"Simulation and analysis of hybrid systems using probabilistic techniques", Proceedings of the IEEE Power Conversion Conference (PCC) Nagaoka, 1997, pp. 831-835.

[40] FABRIZIO Enrico : "Modélisation des systèmes multi énergies dans les bâtiments", Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, juillet 2008.

[41] A. KAABECHE, M. BELHAMEL, R. IBTIOUEN, S. MOUSSA .M. R. BENHADDADI : "Optimisation d'un système hybride (éolien – photovoltaïque) totalement autonome", Revue des Energies renouvelables. Vol. 9, N°3 (2006) 199 – 209.

[42] A.HAMIDET, B.BENYOUCEF : Systematic procedures for sizing photovoltaic pumping system, using water tank storage. Energy Policy 37 (2009) 1489–1501.

[43] S .BOUAZZA, H .BOUCHNAFA : « Estimation des énergies incidentes et fournie par module Photovoltaïque »Mémoire de DES, université de Tlemcen ,2001.

[44] « Énergies du XXIe siècle », Livret thématique n°19 de la collection CEA Jeunes.

[45] Solar Lighting Controller Model LS-2, http://www.solarconverters.com.