

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université M'hamed bougara Boumerdes



Faculté des sciences

Département physique

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme de master

Spécialité : physique énergétique

Option : énergie renouvelable

Thème

**Contribution à l'analyse du comportement et à la
gestion optimale d'un système d'énergie hybride (Eolien,
Groupe électrogène-Batteries de stockage)**

Présenté par :

BELLABIOD Yacine

ZERIFI Abdelmoumene

Encadrée par :

Mme SAHEB KOUSSA Djohra

Mme NASRI Chahrazed

Soutenu le 19/06/2017 devant le jury composé par :

Mme D. BOUGHAZI

Mr A. NASRI

Mme D. SAHEB KOUSSA

Mme C. NASRI

Président de jury

Examineur

Encadreur

Co-encad

Remerciement

Avant tout, nous remercions ALLAH le Tout-puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail dans des meilleures Conditions.

*Nous tenons à exprimé notre sincère gratitude à **Madame saheb koussa** Maitre de recherche au sein du centre de recherche Et de devloppement des energies renouvelables pour sa contribution et son aide qui nous ont été indispensable pour la réalisation de ce travail ainsi que tous ces remarques constructives qui nous ont permis d'approfondir les connaissances scientifiques.*

*UN grand merci à **Mme NASRI** pour son support et ses conseils .*

Nous tenons a exprimer notre gratitude envers l'ensemble des members de jury qui ont accepter de lire notre travail .

Merci encore à tous...

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mes chers parents que Dieu me les garde,

Mes frères et sœurs,

Toute ma famille

Tous ceux qui me sont chers.

Table des matières

Remerciement	
Dédicace	
Table des matières	
Résumé	
Liste des figures	
Liste des tableaux.....	
Représentation de CDER.....	
Abréviation et symbole	
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ENERGIES RENOUVELABLES	3
INTRODUCTION.....	3
I LES DIFFERENTS TYPES D'ENERGIE RENOUVELABLES.....	3
I.1 ENERGIE HYDRAULIQUE.....	3
I.2 ENERGIE MARINE.....	4
I.3 BIOMASSE	4
I.3.1 BIOMASSE PAR COMBUSTION	5
I.3.2 BIOMASSE PAR METHANISATION	5
I.4 SOLAIRE.....	5
I.5 GEOTHERMIE	7
I.6 L'HYDROGENE.....	7
I.7 ENERGIE EOLIENNE.....	7
I.7.1 HISTORIQUE.....	8
I.7.2 PRESENTATION DU SYSTEME EOLIEN	9
I.7.3 DEVELOPPEMENT DE L'ENERGIE EOLIENNE	9
I.7.4 ESTIMATION DES RESSOURCES EOLIENNE EN ALGERIE.....	10
I.7.5 LES DIFFERENTS TYPES DES TURBINES EOLIENNES	11
I.7.6 LES EOLIENNES A AXE VERTICAL :	12
I.8 LES EOLIENNES A AXE HORIZONTAL.....	13

I.8.1 LES DIFFERENTS COMPOSANTS D'UNE EOLIENNE A AXE HORIZONTAL	13
I.9 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT.....	16
I.9.1 CONVERSION D'ENERGIE CINETIQUE EN ENERGIE MECANIQUE.....	17
I.9.2 LE MODE DE REGULATION.....	20
I.9.3 CONTROLE DE LA PUISSANCE FOURNIE PAR UNE EOLIENNE.....	21
I.10 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'ENERGIE EOLIENNE	22
CONCLUSION	23
CHAPITRE II : SYSTEME D'ENERGIE HYBRIDE.....	24
INTRODUCTION.....	24
II.1 ETAT DE L'ART.....	24
II.2 SYSTEMES D'ENERGIE MULTI-SOURCES.....	27
II.2.1 INTERET D'UN SYSTEME D'ENERGIE HYBRIDE.....	28
II.2.2 LES CLASSIFICATIONS GENERALES D'UN SEH.....	28
II.2.2.1 Classification selon le régime du fonctionnement.....	28
II.2.2.2 Classification Selon La Structure.....	29
II.2.3 ARCHITECTURE DES SEH.....	29
II.3 COMPOSANTS D'UN SYSTEME HYBRIDE.....	32
II.4 SYSTEME D'ENERGIE HYBRIDE EOLIENNE-DIESEL.....	32
II.4.1 LE GENERATEUR EOLIEN.....	33
II.4.2 GENERATEUR DIESEL.....	34
II.4.3 BATTERIE.....	35
II.5 FONCTIONNEMENT D'UN ACCUMULATEUR AU PLOMB.....	35
II.6 GESTION DU STOCKAGE.....	35
II.7 LE REGULATEUR DE LA CHARGE DES BATTERIES.....	36
II.8 SYSTEME D'EXPLOITATION.....	36
II.9 CONVERTISSEURS.....	36
II.10 CHARGES.....	37
II.11 CLASSIFICATION ENERGETIQUE DES SYSTEMES HYBRIDES.....	37
II.11.1 CLASSIFICATION DES SYSTEMES EOLIEN-DIESEL.....	38
CONCLUSION.....	38
CHAPITRE III : MODELISATION DU SYSTEME HYBRIDE.....	39
INTRODUCTION	39
III.1 MODELISATION DU GENERATEUR EOLIEN	39
III.1.1 MODELISATION DU POTENTIEL EOLIEN.....	39

III.1.2 LA VITESSE MOYENNE DU VENT	40
III.1.3 MODELISATION DU GENERATEUR EOLIEN PAR INTERPOLATION	40
III.2 MODELISATION DU SYSTEME DE STOCKAGE PAR INTERPOLATION	42
III.3 CHOIX DU REGULATEUR.....	43
III.4 CHOIX DE L'ONDULEUR	44
III.4.1 DETERMINATION DE LA PUISSANCE DE L'ONDULEUR.....	45
III.5 CHOIX DU GROUPE ELECTROGENE.....	46
III.6 CONFIGURATION DU SYSTEME ETUDIE.....	47
CONCLUSION	48
CHAPITRE IV : RESULTATS DE SIMULATION ET INTERPRETATION	49
INTRODUCTION.....	49
IV.1 PRESENTATION DES DONNEES DU SITE.....	49
IV.2 CARACTERISTIQUE DE LA CHARGE.....	50
IV.3 VALIDATION DU MODELE DE LA PUISSANCE DEVELOPEE.....	50
IV.4 CARACTERISTIQUES TEMPORELLE DES VITESSES DU VENT.....	
SUR LE SITE DE DJELFA.....	52
IV.4.1 MESURE HORAIRE DE LA VITESSE.....	52
IV.5 RECONSTITUTION DU POTENTIEL EOLIEN EN DIFFERENTES.....	
HAUTEURS A PARTIR DES MESURES ENREGISTREES A 10 m	52
IV.5.1 EXTRAPOLATION DE LA VITESSE DU VENT DE 10 m A 15.2, 19.8, 29.4 m.....	52
IV.5.2 INTERPRETATION DES RESULTATS	53
IV.6 VALIDATION DU MODELE DEVELOPEE DE LA BATTERIE.....	54
IV.7 ETUDE DE FAISABILITE DU SYSTEME	54
IV.7.1 PRESENTATION DU LOGICIEL HOMER	55
IV.7.2 CONSTRUCTION DU SCHEMA DE CONCEPTION DU SYSTEME	
HYBRIDE.....	55
IV.7.3 VALIDATION DU MODELE DE LA PUISSANCE DEVELOPEE PAR	
HOMER	56
IV.7.4 CONFIGURATION DU SYSTEME HYBRIDE EN FONCTION DU COUT NET .	
ACTUEL	59
IV.7.5 PRODUCTION ET CONSOMMATION D'ENERGIE ELECTRIQUE	60
IV.7.6 LE GENERATEUR EOLIEN WHISPER200	61
IV.7.7 GENERATEUR DIESEL	62
IV.7.8 CONVERTISSEUR	63

IV.7.9 LES BATTERIES	63
IV.7.10 LES EMISSIONS DES GAZ.....	64
IV.8 GESTION DU SYSTEME HYBRIDE.....	65
IV.8.1 STRATEGIE DE GESTION	65
IV.8.2 SCHEMA SYNOPTIQUE DU MODELE FLOU	65
IV.8.3 ALGORITHME DE GESTION.....	67
IV.8.4 MODES DE FONCTIONNEMENT DU SYSTEME HYBRIDE.....	67
IV.8.5 SIMULATION.....	69
IV.8.6 DISCUSSION DES RESULTATS.....	70
CONCLUSION	75
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVE	76
REFERNCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	
ANNEXES.....	

ملخص

في المناطق النائية يعد ربط العديد من مصادر الطاقة المتجددة في نظام الطاقة الهجينة ذو تأثير إيجابي على إنتاج الطاقة الكهربائية من حيث التكلفة و التوفير على هذا فإن هذه المذكرة ما هي إلا مساهمة في تحليل سلوك و التمكن من إيجابيات مثل هذا النظام المتكون من وحدتي طاقة متجددة هوائية موصولة بمولد كهربائي و بطاريات التخزين مخصص لتوليد حمولة ذات استخدام منزلي لمدينة الجلفة من اجل ضمان أحسن تسيير لنظامنا قمنا باستخدام نماذج طاقوية لتعيين القدرة التي يستطيع أن يزودها نظامنا و هذا تحت شروط مناخية معينة .
إن التمثيل الذي قمنا به لمختلف أنظمتنا كان باستخدام برنامج تحليلي MATLAB .
ولقد تطرقنا في هذا الصدد بإعداد تسيير لهذا النظام على MATLAB / SIMULINK سمحت لنا هذه الأخيرة بضمن التزويد الكهربائي بدون انقطاع وكذلك للاستغلال المثالي للطاقة الهوائية وحماية البطاريات كما قمنا أيضا عن طريق استعمال برنامج التحليلي HOMER بدراسة تكميلية.
هذه الدراسة سمحت لنا أيضا بتحديد واختيار أبعاد وسعة النظام ومن وجهة نظر محيطية وبيئية سمحت لنا أيضا بتحديد وتخفيض دور استعمال طاقة الرياح في التقليل من إصدار الغازات المسببة لظاهرة الاحتباس الحراري.

الكلمات المفتاحية: التخزين، ناعورة هوائية،الديزل،النظام الهجين،الطاقة المتجددة.

Résumé :

L'interconnexion de plusieurs sources d'énergies renouvelables dans les régions isolées dans un système d'énergie hybrides (SEH) peut avoir une incidence profitable sur la production d'énergie électrique en termes de coût et de disponibilité.

Ainsi, ce travail de mémoire présente une contribution à l'analyse du comportement et la maîtrise des performances d'un SEH constitué par une source d'énergie renouvelable éolienne, associé à un générateur diesel muni de batteries de stockage destiné à alimenter une charge à usage domestique situé au site de Djelfa, pour assurer une meilleur gestion du système, des modèles énergétiques ont été mis au point pour la détermination de la puissance que les sous-systèmes peuvent fournir sous des conditions météorologiques données. La simulation des sous-systèmes a été effectuée à l'aide du logiciel MATLAB. Une gestion a été adoptée pour ce système sous l'environnement MATLAB/SIMULINK, Cette dernière nous a permis de garantir l'alimentation sans interruption de la charge ainsi que l'exploitation optimale de la source éolienne, et la sécurité de la batterie. Une étude complémentaire a été élaborée moyennant le logiciel HOMER, cette étude nous a permis de dimensionner et choisir

le système optimal. Du point de vue environnemental, cette étude nous a permis de mettre en évidence le rôle de l'utilisation de l'énergie éolienne dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Mots clés : énergie renouvelable, système hybride, diesel, aérogénérateur, stockage.

ABSTRACT

The combination of several sources power system (HPC) may be very attractive in term of cost and availability, So, the work introduced in the current thesis is a contribution to the behaviour analysis and the performances control of an HPC constituted by renewable source, wind energy linked to diesel and taken into the storage batteries, intended to feed the load domestic use located on site of Djelfa. In order to ensure a better management of the system energy models were developed for determination of the power that under systems can provide under weather conditions given. The simulation of different under systems was carried out using software MATLAB. Another management was adopted for this system under MATLAB/SIMULINK environment, this last one allowed us to satisfy the alimentation without load interruption, moreover the optimum exploitation of wind source, including battery safety. A complementary study was elaborate with the help of software HOMER. On the one hand, this study enabled us to dimension and choose the most optimal system while being based on two parameters, namely the cost and the effectiveness. In addition and from the environmental point of view this study enabled us to highlight the role of the wind energy utilization in the reduction of the gas emissions has greenhouse effect.

Key words : renewable energy, hybrid systems, Wind Diesel, aérogénérateur, Storage.

Liste des figures

Figure I.1 : Moulin à eau : énergie hydraulique transformée en énergie mécanique.....	3
Figure I.2 : L'énergie biomasse.....	5
Figure I.3 : Solaire thermique et photovoltaïque.....	6
Figure I.4 : Eolienne de 100 kW de Grand Vent 1957.....	9
Figure I.5 : Evolution des puissances éoliennes installées dans le monde en GW	10
Figure I.6 : Carte annuelle des vents (m/s) à 10m du sol estimée établie par Dr. BOUDIA....	11
Figure I.7 : a) Eolienne Savonius b) Eolienne Darrieus	12
Figure I.8 : Eolienne à axe horizontale.....	13
Figure I.9 : Les différentes composantes d'une éolienne.....	15
Figure I.10 : La nacelle.....	16
Figure I.11 : Tube de courant autour d'une éolienne.....	18
Figure I.12 : Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes	19
Figure I.13 : Puissance en fonction de la vitesse	20
Figure I.14 : Principe de la conversion d'énergie.....	22
Figure II.1 : Structure générale des systèmes hybrides.....	29
Figure II.2 : Configuration du SEH à bus CC.....	30
Figure II.3 : Configuration du SEH à deux à CC et à CA.....	31
Figure II.4 : Principaux éléments d'un système E-D.....	33
Figure II.5 : Configuration du générateur diesel.....	34
Figure III.1 : Puissance caractéristique des aérogénérateurs Whisper100 et Whisper200.	41
Figure III.2: Courbe caractéristique d'Etat de charge en fonction de la tension.	42
Figure III.3 : Caractéristiques technico-économiques du groupe diesel choisi.	46
Figure III.4 : Schéma synoptique du système étudié.	47
Figure IV.1 : Position géographique du site de Djelfa.....	49
Figure IV.2 : Profil journalier de la charge.....	50
Figure IV.3 : Puissance produite par l'aérogénérateur Whisper100.	51
Figure IV.4 : Puissance produite par l'aérogénérateur Whisper200.	51
Figure IV.5 : Mesures horaire de la vitesse du vent enregistrées à Djelfa.	52
Figure IV.6 : Extrapolation verticale de la vitesse du vent pour différentes hauteurs du mat.	53

Figure IV.7 : Extrapolation de la vitesse du vent aux différentes hauteurs du mat durant 12 jours. ...	54
Figure IV. 8 : état de charge de la batterie.	54
Figure IV.9 : Montage électrique du système hybride.	56
Figure IV.10 : l'évolution annuelle de puissance de l'aérogénérateur Whisper200.	57
Figure IV.11 : l'évolution annuelle de puissance de l'aérogénérateur Whisper100.	57
Figure IV.12: l'évolution annuelle de puissance de l'aérogénérateur Whisper100.	58
Figure IV.13 : l'évolution annuelle de puissance de l'aérogénérateur Whisper200.	58
Figure IV.14: Configurations proposé par le logiciel HOMER.	59
Figure IV.15 : Puissance moyenne mensuelle produite par chaque source.	61
Figure IV.16 : Production journalière moyenne du groupe durant une année.	62
Figure IV.17: schéma synoptique du modèle flou.	66
Figure IV.18: Organigramme de gestion du système.	67
Figure IV.19 : Système hybride implanté dans l'environnement MATLAB/ Simulink.	69
Figure IV.20 : les résultats de la simulation de la stratégie de gestion du réseau hybride autonome correspondant à la journée 21 Mars.	72
Figure IV.21 : les résultats de la simulation de la stratégie de gestion du réseau hybride autonome correspondant à la journée 21 Juin.	73
Figure IV.22 : les résultats de la simulation de la stratégie de gestion du réseau hybride autonome correspondant à la journée 21 Septembre.	74

Liste des tableaux

Tableau II.1 : Classification des SEH par gamme de puissance.....	37
Tableau II.2 : Classification des systèmes Eolien-Diesel basés sur le taux de pénétration de l'énergie éolienne.....	38
Tableau III.1 et III.2 : Les constantes de régression de la Whisper100 et la Whisper200 utilisées dans la présente étude.....	42
Tableau III.3 : Les constantes de régression du polynôme utilisée dans la présente étude....	43
Tableau IV.1: Énergie annuelle produite.....	60
Tableau IV.2 : Énergie annuelle consommée.....	60
Tableau IV.3 : caractéristique du système hybride.....	60
Tableau IV.4: Paramètres de fonctionnement de l'aérogénérateur.....	61
Tableau IV.5: Paramètres de fonctionnement du générateur diesel.....	62
Tableau IV.6 : Paramètres de fonctionnement du convertisseur.....	63
Tableau IV.7 : paramètres de fonctionnement des batteries.....	64
Tableau IV.8 : émissions des gaz des configurations proposé par le logiciel HOMER.....	64
Tableau IV.9 : Base de règles du gestionnaire flou.....	68



Présentation du : CDER

Le Centre de Développement des Énergies Renouvelables (CDER) est un Centre de Recherche, issu de la restructuration du Haut Commissariat à la Recherche, créé le 22 mars 1988.

C'est un Etablissement Public à caractère Scientifique et Technologique (EPST) chargé d'élaborer et de mettre en œuvre les programmes de recherche et de développements, scientifiques et technologiques, des systèmes énergétiques exploitant l'énergie solaire, éolienne, géothermique et l'énergie de la biomasse.

Le CDER en tant que pôle scientifique participe activement dans le programme national de recherche et du développement technologique définis par la loi d'orientation et de programme à projection quinquennale sur la recherche scientifique et le développement technologique.

Les projets nationaux retenus dans ce programme sont orientés sur des priorités économiques et sociétales pour répondre aux principaux besoins stratégiques de développement économique.

Le CDER active depuis sa création dans la mise en œuvre de cette stratégie à travers le déploiement et l'intégration de plusieurs réalisations et projets pilotes au niveau national.

Le CDER, grâce à ses chercheurs du siège, de ses trois unités de recherche :

- Unité de Développement des Equipements Solaires (UDES).
- Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables (URAER).
- Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien (URERMS).

LISTE DES ABRÉVIATIONS et symboles

ER	énergie renouvelable
ETM	énergie thermique des mers
SEH	Système d'Énergie Hybride
HOMER	hybrid optimisation model for electric renewable
GD	Générateurs diesel ou groupe diesel
CC	Courant continu
CA	Courant alternatif
MADA	Machine asynchrone à double alimentation
PV	photovoltaïque
Wt	Wind turbine (aérogénérateur)
NREL	National Renewable Energy Laboratory
NPC	coût net actuel
SOC	state of charge (état de charge)
Ec :	l'énergie cinétique [J]

v : la vitesse [m/s]

m : une masse d'air [Kg]

S : une surface [m²]

ρ : la masse volumique de l'air [kg/m³]

P_v : la puissance incidente [W]

P_m : la puissance du vent [W]

P_{mt} : puissance théorique [W]

P_n : puissance nominal d'une éolienne

P_{méc_max} : Puissance maximale pouvant être recueillie par une éolienne [W]

λ : la vitesse réduite [-]

R : le rayon de la voilure [m]

Ω_{turbine} : vitesse de rotation avant multiplicateur [rad/s]

C_p : coefficient de puissance [-]

V_1 : vitesse du vent à l'avant de l'éolienne [m/s]

V_2 : vitesse du vent et après passage à travers le rotor [m/s]

H : hauteur de moyeu de l'éolien [m]

H : hauteur du mat [m]

H_m : Hauteur de référence [m]

α : Paramètre de rugosité du sol

V_i : vitesses instantanées [m/s]

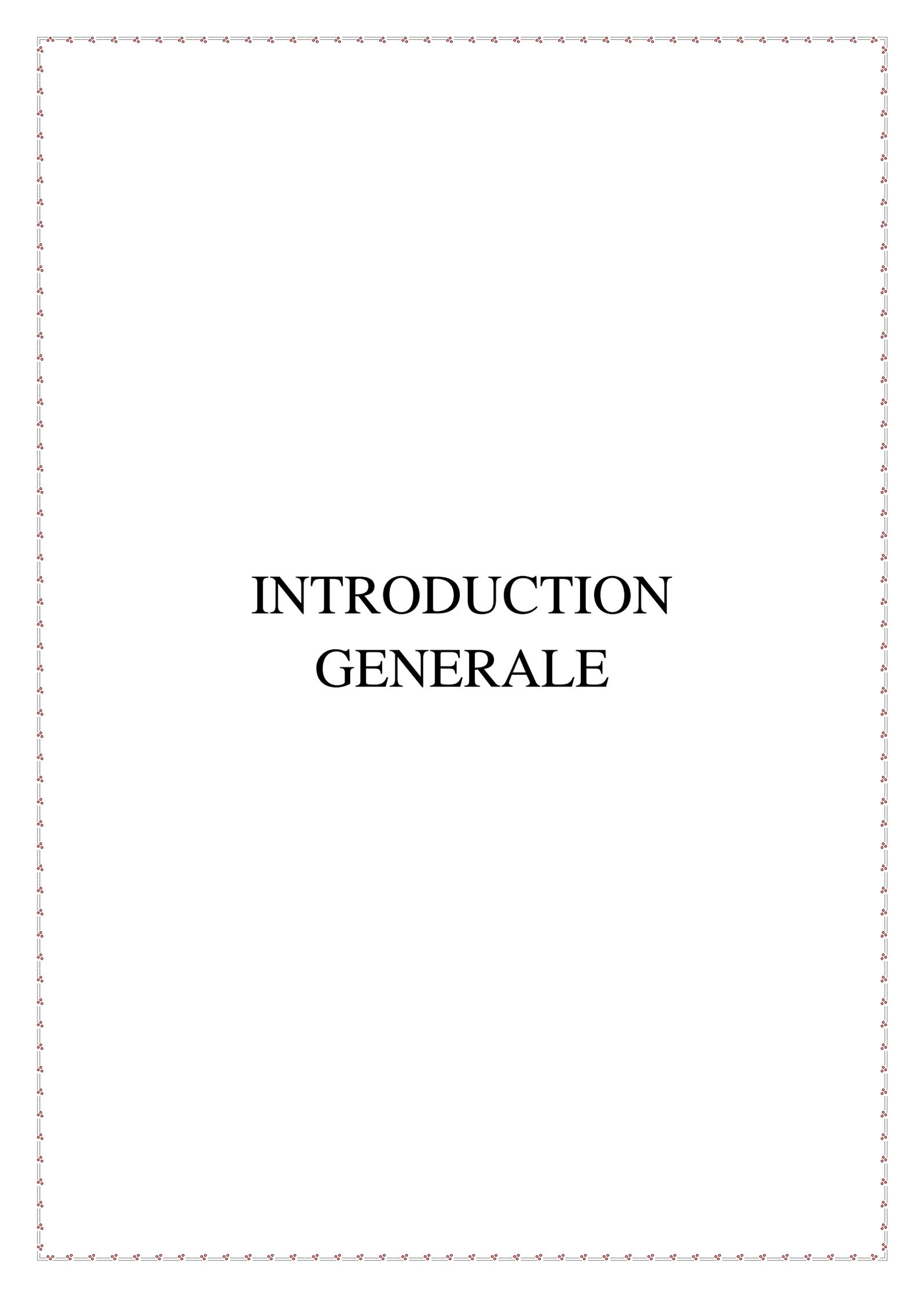
\bar{V} : vitesse moyenne [m/s]

$P(v)$: Puissance fournie par l'aérogénérateur [W]

V : Tension [Volt].

$P_{\eta_{rég}}$: puissance nominale du régulateur [W]

$\eta_{rég}$: Rendement du régulateur [-]



INTRODUCTION GENERALE

L'accès à l'énergie constitue une priorité stratégique dans le monde entier. Avec la forte consommation de l'énergie due à la croissance démographique, à la révolution industrielle, au transport ...etc., Les pays sont amenés à trouver une solution au besoin énergétique en s'appuyant sur les énergies renouvelables.

Face à la demande croissante d'énergie et loin des énergies polluantes, les pays industrialisés ont massivement fait appel aux centrales nucléaires. Cette énergie présente l'avantage indéniable de ne pas engendrer de pollution atmosphérique contrairement aux centrales thermiques, mais le risque d'accident nucléaire, le traitement et l'enfouissement des déchets sont des problèmes qui la rendent peu attractive pour la génération future.

Actuellement les efforts se dirigent tous vers le développement de la production de l'énergie solaire et éolienne soit à échelle locale (habitat) soit à grande échelle (l'industrie). L'abondance de ces ressources et leurs caractères écologiques les favorisent pour être les énergies de l'avenir.

En ce qui concerne notre pays, l'Algérie, l'enjeu du développement de ces énergies est encore plus important. En effet, ces énergies permettront de plus en plus de couvrir les besoins énergétiques de base du développement rural, de l'habitat, de la santé, et de l'éducation, puis à long terme, de l'industrie. Les capacités en énergies renouvelables seront installées selon les spécifications des régions concernées. Dans la région du sud, et compte tenu de la disponibilité des espaces et de l'important potentiel solaire et éolien privilégiant cette région rend l'exploitation de ces énergies prometteuse et particulièrement l'énergie éolienne. Cependant le potentiel éolien diverge selon les saisons, l'altitude (elle varie substantielle d'un endroit à un autre à cause de l'influence de la topographie). A noter que les régions ventées occupent une bonne partie du sud avec des vitesses supérieures à 4 m/s [1]. Ces caractéristiques de la région sud rendent notre pays riche en sources renouvelables pouvant être un grand investissement pour les décennies à venir.

Cependant, La variation de la vitesse du vent durant l'année et le stockage du surplus de l'énergie sont les inconvénients majeurs qui ralentissent le développement de l'utilisation de l'énergie éolienne. Par conséquent, le stockage sera important vu que les régimes de vent sont irréguliers et il consomme une grande part (environ 60%) de l'investissement d'une installation de production d'énergie électrique à partir de source éolienne.

Considérons ces caractéristiques saisonnières, cette énergie ne peut pas être compétitive aux énergies conventionnelles mais elles peuvent se valoriser mutuellement. A cet effet, dans

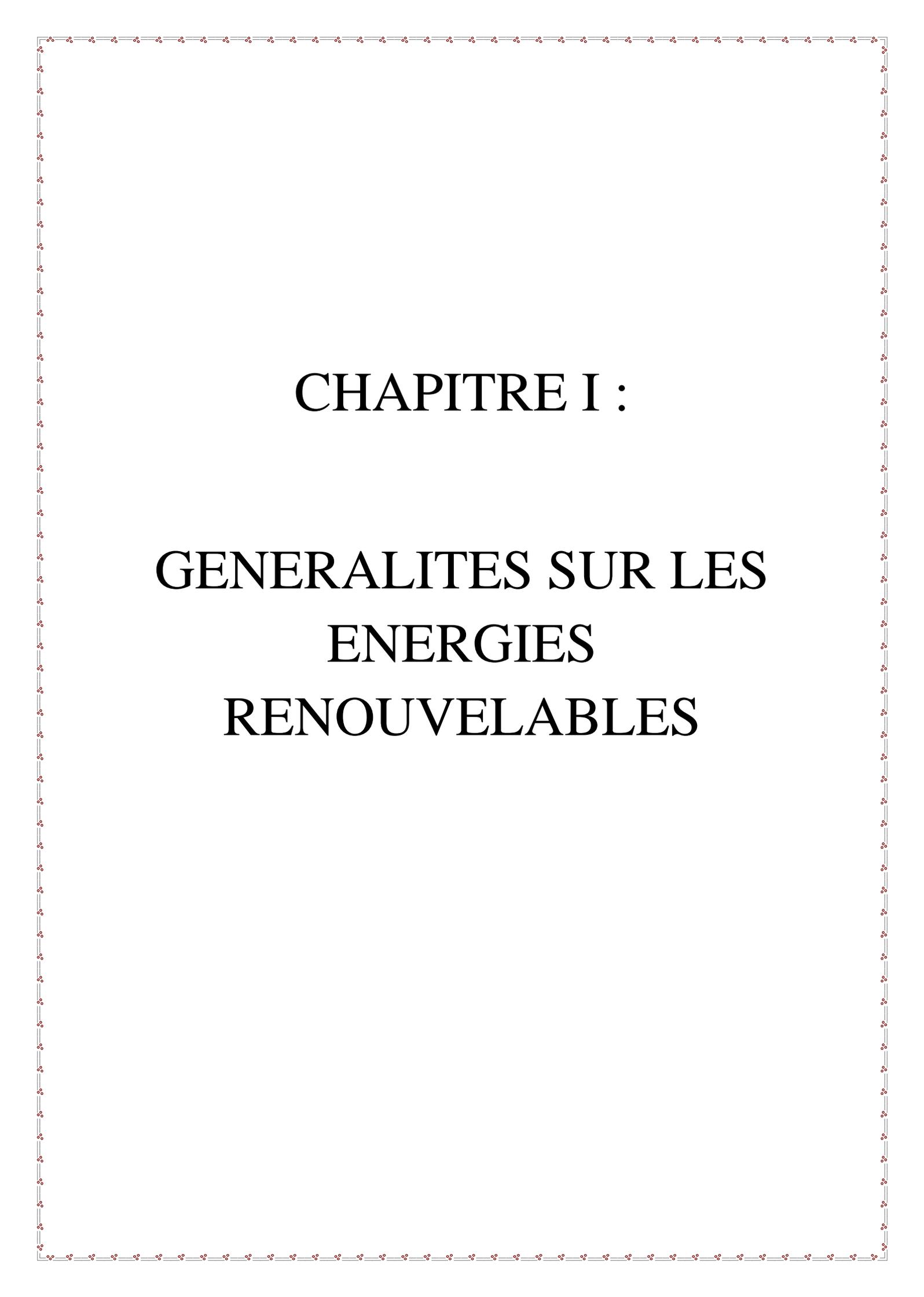
le cadre de notre travail nous proposons un système hybride combinant une source d'énergie éolienne avec un système de stockage et une source conventionnelle : groupe électrogène avec une stratégie de gestion intelligente. L'exploitation de ces deux sources énergétiques est optimale et complémentaire tout en favorisant la source à énergie renouvelable.

L'objectif de notre travail est de maintenir un meilleur rendement avec un coût minimal du système hybride éolien-diesel-stockage. Ceci nécessitera une gestion et un dimensionnement adéquat à ce type d'application et leur simulation permettra de mettre en évidence les stratégies de contrôles disponibles et d'évaluer les techniques d'optimisations.

A ce propos nous avons subdivisés notre travail en quatre chapitres : Des généralités sur les énergies renouvelables en générale et sur l'énergie éolienne en particulier ainsi que ces composantes et son fonctionnement sont données dans le premier chapitre.

Le second chapitre est consacré à l'état de l'art des systèmes hybrides où nous avons présenté notre point focal qu'est les composantes du système hybride éolien-diesel- système de stockage. Quand au troisième chapitre, il est dédié à la modélisation du système hybride (diesel-éolien-stockage) en utilisant des modèles mathématiques permettant la création d'un lien entre les phénomènes physiques et le comportement réel du système considéré.

Le quatrième chapitre est consacré à l'application des modèles, au dimensionnement, à la gestion tout en favorisant l'utilisation de l'énergie éolienne et en assurant la protection du système de stockage ainsi qu'aux différents résultats obtenus. Par ailleurs, rappelons que comme site d'application nous avons choisi Djelfa comme site isolé. Enfin, les principaux résultats de ce travail ainsi que des perspectives sont récapitulés dans la conclusion générale.



CHAPITRE I :

GENERALITES SUR LES ENERGIES RENOUVELABLES

INTRODUCTION

Une énergie est dite renouvelable lorsqu'elle provient de sources que la nature renouvelle en permanence, par opposition à une énergie non renouvelable dont les stocks s'épuisent.

Surnommées « énergies propres » ou « énergies vertes », leur exploitation engendre très peu de déchets et d'émissions polluantes mais leur pouvoir énergétique est beaucoup plus faible que celui des énergies non renouvelables.

I LES DIFFERENTS TYPES D'ENERGIE RENOUVELABLES

I.1 ENERGIE HYDRAULIQUE

L'énergie hydraulique permet la fabrication de l'électricité dans les centrales hydroélectriques grâce à la force de l'eau. Cette force dépend soit de la hauteur de la chute d'eau (centrales de haute ou moyenne chute), soit du débit des fleuves et des rivières (centrales au fil de l'eau).

L'énergie hydraulique dépend du cycle de l'eau. C'est la plus importante source d'énergie renouvelable. Sous l'action du soleil, l'eau des océans et de la terre s'évapore et se condense en nuages qui se déplacent avec le vent. La baisse de température au-dessus des continents provoque des précipitations qui alimentent l'eau des lacs, des rivières et des océans. Une centrale hydraulique est composée de 3 parties :

- Le barrage qui retient l'eau.
- La centrale qui produit l'électricité.
- Les lignes électriques qui évacuent et transportent l'énergie électrique.



Figure I.1 : Moulin à eau énergie hydraulique transformée en énergie mécanique.

C'est une énergie qui n'émet pas de gaz à effet de serre, elle est utilisable rapidement grâce aux grandes quantités d'eau stockée et c'est une énergie renouvelable très économique à long terme [2].

I.2 ENERGIE MARINE

L'océan mondial recouvre 71% de la surface du globe, sa profondeur moyenne est de 3800 mètre, il représente un volume 1372 millions de km³ soit environ 97% du patrimoine aquatique de la terre. Les énergies marines sont l'ensemble des énergies exploitées en mer ou sur le littoral. Ces différentes énergies sont engendrées par l'énergie solaire et la gravité. On peut distinguer :

- l'énergie marémotrice, elle exploite les courants de marée ;
- l'énergie de la houle et des vagues (houlomotrice), elle exploite les mouvements verticaux des ondes de houle.
- l'énergie des courants marins (courant de houle, courant thermo halin, etc.), elle actionne différents types de turbine.
- L'énergie éolienne offshore, qui profite des vents marins plus puissants et plus réguliers.
- L'énergie thermique des mers (ETM), qui exploite le gradient thermique entre les eaux de surface et les eaux profondes.
- l'énergie osmotique, qui utilise les différences de salinité pour produire un flux d'eau.
- La biomasse marine, en particulier pour produire des biocarburants à partir des algues.

Les énergies marines ne sont donc pas uniquement hydrauliques. Elles ont aussi des composantes éoliennes, hydro thermiques, etc. L'exploitation de l'une ou l'autre de ces formes d'énergie renouvelable dépend surtout des spécificités locales, certains lieux étant plus propices à l'éolien offshore, d'autres aux hydroliennes, etc. L'importance des masses océaniques sur la Terre et la diversité des modes d'exploitation dotent ces énergies marines d'un potentiel énergétique très importante [3].

I.3 BIOMASSE

L'énergie biomasse est la forme d'énergie la plus ancienne utilisée par l'homme depuis la découverte du feu à la préhistoire. Cette énergie permet la fabrication de l'électricité grâce à la chaleur dégagée par la combustion de ces matières : bois ; végétaux ; déchets agricoles ; ordures ménagères organiques ; ou du biogaz issu de leur fermentation, dans des centrales biomasses (Figure I.2) [2].

I.3.1 BIOMASSE PAR COMBUSTION

Les déchets sont directement brûlés en produisant de la chaleur, de l'électricité ou les deux (cogénération). Cela concerne le bois, les déchets des industries de transformation du bois et les déchets végétaux agricoles (paille, canne à sucre, arachide, noix de coco...) [2].

I.3.2 BIOMASSE PAR METHANISATION

Les déchets sont transformés en un biogaz, par fermentation grâce à des micro-organismes (bactéries). Le biogaz produit est ensuite brûlé. IL est proche du gaz naturel et majoritairement composé de méthane. Cela concerne les déchets ménagers, le fumier et lisier d'animaux, les boues de stations d'épuration, les papiers et cartons... [2].

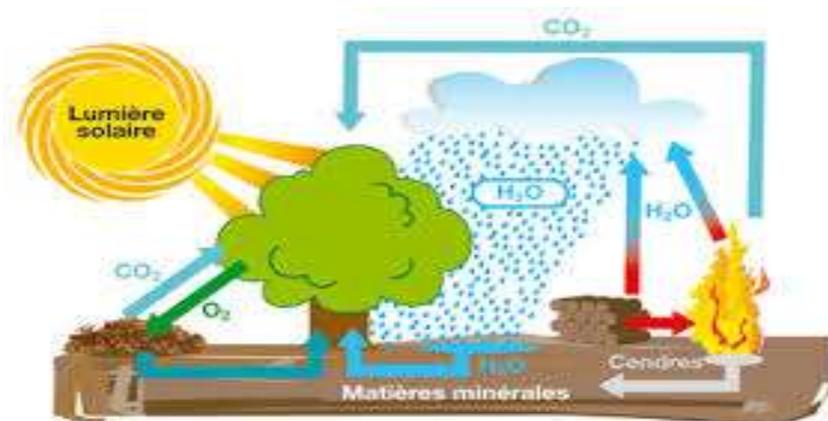


Figure I.2 :L'énergie biomasse.

I.4 SOLAIRE

Cette catégorie d'énergie est considérée comme source renouvelable car elle est inépuisable à l'échelle humaine et elle est propre car n'engendre pas de déchets polluant la terre. Elle aussi la plus dominante de toutes les énergies renouvelables vu la facilité de son exploitation (Figure I.3).

Les procédés utilisant l'énergie solaire se décompose en :

a) Solaire photovoltaïque : le mot « photo » vient du grec qui signifie lumière et de « voltaïque » vient du nom d'un physicien Italien Alessandro Volta.

La récupération d'énergie s'effectue par des cellules photovoltaïques fournissant l'électricité injectée dans le réseau ou stockée en batteries. Les installations produisant cette énergie sont de plus en plus répandues dans le monde [4].



Figure I.3 :Solaire thermique et photovoltaïque.

b) Solaires thermodynamiques : Ses grandes installations sont équipées d'immenses miroirs paraboliques, sphériques ou plats, suivant la course du soleil pendant la journée. Ils permettent de concentrer les rayons pour chauffer un liquide, de l'huile par exemple. Ce dernier restera chaud après le coucher du Soleil. Alors l'énergie thermique stockée servira à chauffer l'eau et l'évaporer. La vapeur produite fera tourner les turbines pour produire de l'électricité [5].

c) Solaire thermique : la chaleur du soleil est utilisée directement pour chauffer un réservoir d'eau, sécher du linge ou tempérer les parois d'une maison. Aussi les panneaux solaires thermiques convertissent le rayonnement solaire par voie thermodynamique, en énergie mécanique ou électrique est possible [5].

Cependant, cette ressource possède deux inconvénients : une production fluctuante liée aux conditions climatiques et la nécessité d'une surface considérable pour la production de grande quantité d'énergie vu que le rendement des panneaux PV est relativement faible.

I.5 GEOTHERMIE

La géothermie est l'exploitation de la chaleur stockée dans le sous-sol. L'utilisation des ressources géothermales se décompose en deux grandes familles : la production d'électricité et la production de chaleur. En fonction de la ressource, de la technique utilisée et des besoins, les applications sont multiples. Le critère de classement de cette énergie est la température. Ainsi, la géothermie est qualifiée de « haute énergie » (pour une température supérieure à 150°C), « moyenne énergie » (pour une température entre 90°C et 150°C), « basse énergie » (pour une température entre 30°C et 90°C) et « très basse énergie » (pour une température inférieure à 30°C) [6].

Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques. Elle est donc une énergie fiable et disponible dans le temps. L'une des principales difficultés rencontrées en exploitation thermique est le transport de la chaleur. Pour cette raison, les centrales géothermiques alimentent généralement leur environnement proche. Aussi le cout très élevé altère la rentabilité et donc le prix pour l'utilisateur [3].

I.6 L'HYDROGENE

Bien que l'hydrogène se trouve en abondance dans l'univers, il n'existe pas en état naturel. Il est lié à d'autres atomes (comme l'atome du carbone ou l'atome de l'oxygène), par exemple sous forme d'eau ou de méthane. Il peut être envisagé comme un vecteur énergétique au même titre que l'électricité. Il est utilisé comme carburant pour alimenter le moteur à combustion pour la production d'électricité, et aussi comme carburant dans les piles à combustion ou pour les moteurs à combustion interne.

En raison de l'absence de pollution lors de sa combustion et la possibilité de son stockage rend ce combustible intéressant pour remplacer les combustibles d'origine fossiles dont les réserves sont limitées [7].

I.7 ENERGIE EOLIENNE

L'énergie éolienne est l'énergie du vent qui a toujours apporté sa contribution au besoin énergétique de l'homme, sous forme mécanique puis sous forme d'électricité. Depuis une quinzaine d'années, elle s'impose comme une énergie susceptible à une contribution

importante au bilan énergétique, avec des machines de plus en plus fiables, et dont les couts d'investissement et de fonctionnement débouchent sur un prix du KWh compétitif avec d'autres sources. Cette contribution a toujours fluctué en fonction du cout des autres formes d'énergies et de la technologie, mais elle n'a jamais complètement disparu. Ajoutant que l'énergie éolienne n'a aucune influence sur l'environnement.

I.7.1 HISTORIQUE

Parmi toutes les énergies renouvelables, à part l'énergie du bois, l'énergie du vent était la première exploitée par l'homme. Depuis l'antiquité, elle est utilisée pour la propulsion des navires et ensuite pour faire tourner les moulins à blé et les constructions permettant le pompage d'eau.

Les Premières utilisations connues de l'énergie éolienne remontent à 2000 ans avant J.-C. Hammourabi, fondateur de la puissance de Babylone, avait conçu un projet d'irrigation appelé Mésopotamie utilisant la puissance du vent. Alors que la première description écrite de l'utilisation des moulins à vent en Inde date d'environ 400 ans avant J.-C.

En Europe, les premiers Moulins à vent ont fait leur apparition au début du moyen âge. 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. Dès le XIV siècle, ils sont devenus visibles en Europe et deviennent la principale source d'énergie. Vers le milieu du XIXème siècle, ils commencent à disparaître progressivement avec l'arrivée de la machine à vapeur (seulement en Hollande et en Danemark).

L'arrivée de l'électricité donne idée à Poul La Cour, en 1891, d'associer une génératrice à une turbine éolienne. Ainsi, l'énergie en provenance du vent a pût être « redécouverte » [8].

En Algérie, la première tentative de raccorder les éoliennes au réseau de distribution d'énergie électrique date de 1957. L'ingénieur français ANDREAU installa un aérogénérateur de 100 kW sur le site des Grands Vents (Alger, Figure I.4) [9].



Figure I.4 : Eolienne de 100 kW de Grand Vent 1957.

I.7.2 PRESENTATION DU SYSTEME EOLIEN

La demande en énergie de plus en plus importantes et l'épuisement annoncé des sources fossiles ont remis les éoliennes dans l'actualité énergétique. En hiver la demande de l'énergie électrique ne cesse d'accroître. Durant cette période la vitesse du vent est plus élevée par rapport aux autres saisons de l'année. Elle est souvent fluctuante et son captage reste assez difficile et nécessitant des équipements de grandes dimensions (des mats jusqu'au 100 mètres, des pales ...etc.). A cet effet, l'installation des éoliennes dans des zones géographiquement dégagées (les montagnes, l'offshore) est favorisée, afin d'éviter les phénomènes de turbulence et pour l'obtention d'un bon rendement.

I.7.3 DEVELOPPEMENT DE L'ENERGIE EOLIENNE

Plusieurs pays, confrontés à des problèmes d'approvisionnement électrique pendant et après la seconde guerre mondiale, ils se sont intéressés à l'éolienne. Les études scientifiques ont conduit à des réalisations radicalement différentes qui allaient cependant modeler le visage de l'éolienne futur [10].

Depuis les dernières décennies le développement de l'éolienne est soutenu dans presque tous les pays du monde avec une croissance de 30% par an (comme le montre la figure I.5). On cite quelques raisons poussant ces pays à choisir l'exploitation de l'énergie éolienne :

- C'est une énergie renouvelable contrairement aux énergies fossiles.
- C'est une énergie propre. Elle n'a aucun impact néfaste sur l'environnement comme les autres sources d'énergie causant un changement radical du climat par l'énorme production directe du CO₂
- L'énergie éolienne ne présente aucun risque et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs contrairement à l'énergie nucléaire.
- Bon marché : elle peut concurrencer le nucléaire, le charbon et le gaz lorsque les règles du jeu sont équitables [11].

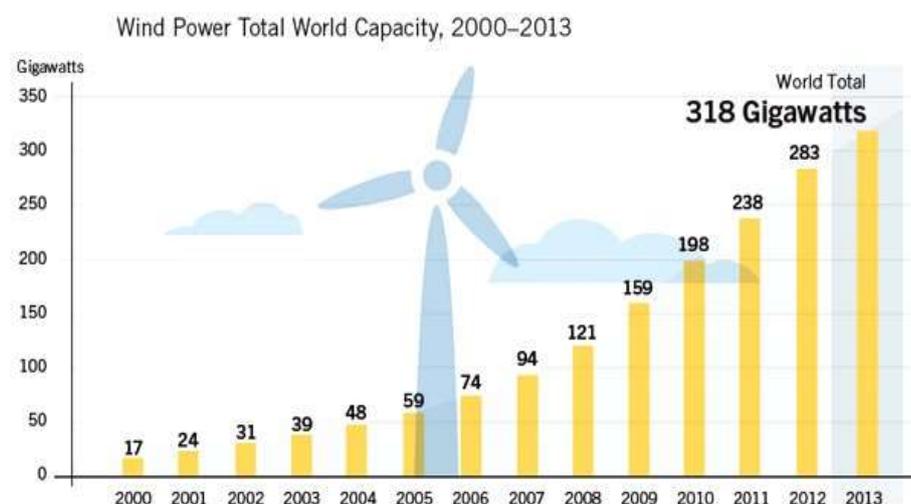


Figure I.5 : Evolution des puissances éoliennes installées dans le monde en GW

I.7.4 ESTIMATION DES RESSOURCES EOLIENNE EN ALGERIE

L'estimation des ressources éoliennes dans notre pays consiste à faire une étude préliminaire de l'évolution saisonnière et annuelle de la vitesse moyenne du vent et qui permet par la suite d'identifier les régions ventées et d'établir une carte (figure I.6).

La représentation de la vitesse sous forme de carte a deux objectifs : le premier est d'identifier les vastes régions de bonne prévision d'exploitation de l'énergie éolienne, le second est de mettre en évidence la variation relative des ressources à travers l'Algérie.

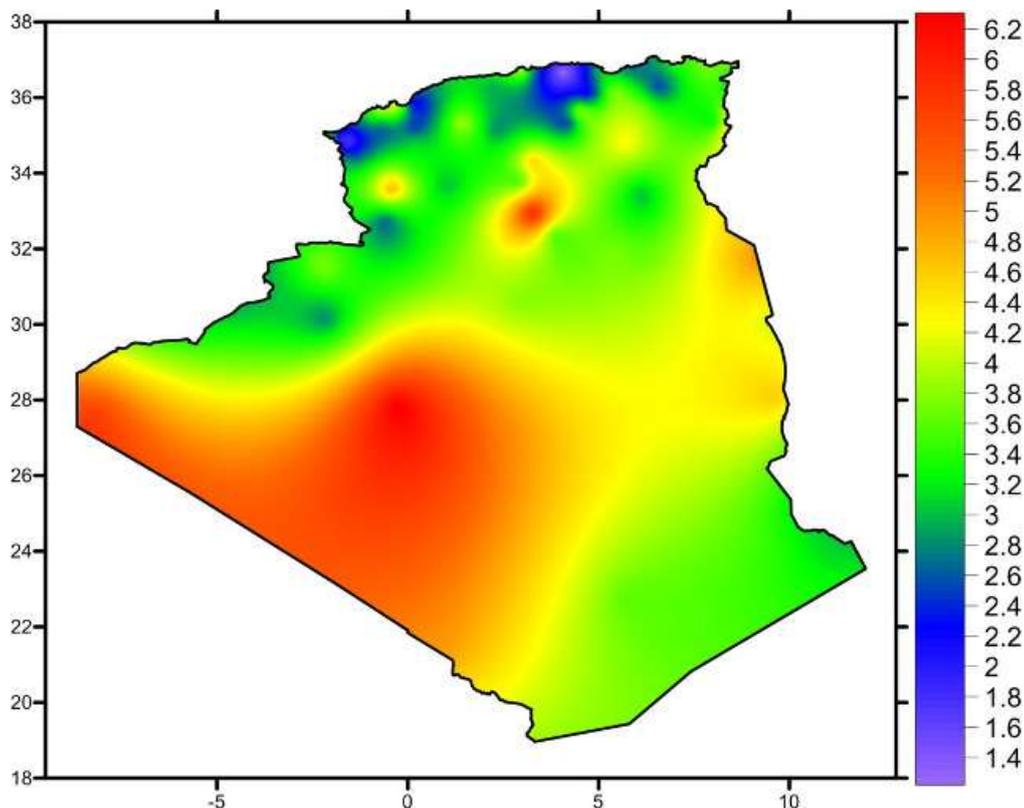


FIGURE I.6 : Carte annuelle des vents (m/s) à 10m du sol établie par Dr. BOUDIA

La carte de la figure I.6 montre que le sud est caractérisé par des vitesses plus élevées que le nord, plus particulièrement le sud-ouest avec des vitesses supérieures à 4m/s et qui dépassent même la valeur de 6 m/s dans la région d'Adrar. Au nord, on constate globalement que la vitesse est peu élevée. Cependant, on note l'existence des microclimats au Nord comme sur les sites côtiers d'Oran, de Bejaia, et d'Annaba, sur les hauts plateaux de Tiaret, et dans la région délimitée par Bejaia, ainsi qu'au sud Biskra.

Toutefois, elle n'est pas à négligée la variation de la vitesse du vent en fonction des saisons. En particulier, lorsqu'il s'agit d'installer un system de la conversion de l'énergie éolienne.

I.7.5 LES DIFFERENTS TYPES DES TURBINES EOLIENNES

Les turbines éoliennes se subdivisent en éolienne mécanique utilisée pour le pompage de l'eau et en éolienne aérogénérateur qui fournissent de l'électricité injectée dans le réseau ou stockée dans les batteries.

On peut distinguer deux architectures principales d'éolienne : turbines à axe vertical et turbines à axe horizontal.

I.7.6 LES EOLIENNES A AXE VERTICAL :

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour la production de l'électricité. Elles possèdent l'avantage d'avoir les oranges de commande et le générateur au niveau du sol ce qui facilite l'accessibilité et le de dépannage en cas disfonctionnement.

Néanmoins elles restent marginales, peu utilisées et même abandonnées à cause de leurs faibles vitesses, des turbulences qui affectent le capteur d'énergie situé au près du sol et la surface importante qu'elles occupent au sol [10].

Les éoliennes à axe vertical se subdivisent également en deux catégories :

- a- **Les éoliennes Savonius** : qui démarrent seules, mais ont une médiocre efficacité (figure I.7.a).
- b- **Les éoliennes Darrieus** : dont le fonctionnement est plus complexe, elles n'ont pas de couple à l'arrêt même par vent important mais elles ont une efficacité comparable à l'éolienne horizontale rapide (figure I.7.b).



Figure I.7 :a) Eolienne Savonius



b) Eolienne Darrieus

Comme Notre travail se base sur l'éolienne à axe horizontale nous le reprendrons en détails ci-dessous.

I.8 LES EOLIENNES A AXE HORIZONTAL

Elles sont constituées de plusieurs pales à la manière des ailes d'avions pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Celles destinées à la production d'électricité ont un nombre de pales variant entre 1 et 3 (figure I.8). Le rotor tripale est le plus utilisée car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le cout et la vitesse de rotation du capteur éolien.

Ces éoliennes sont plus utilisées que celles à axe vertical, vu leur cout moins important et elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques [12].



Figure I.8 : Eolienne à axe horizontale

I.8.1 LES DIFFERENTS COMPOSANTS D'UNE EOLIENNE A AXE HORIZONTALE

L'éolienne est constituée généralement des éléments mécaniques et électriques qui sont illustrée sur la figure I.9 et la figure I.10.

- a) **La fondation** : elle doit être solide pour assurer la résistance de l'ensemble en cas de grand vent et/ou en cas de conditions de givrage.

- b) **Le mat ou la tour** : c'est un tube d'acier, il doit être le plus haut possible pour bénéficier de l'énergie cinétique maximal du vent et pour éviter les perturbations.
- c) **Le rotor** : le rotor de l'aérogénérateur est constitué de pales qui sont elles-mêmes montées sur un moyeu. Le rôle essentiel du rotor est de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Le rendement maximal du rotor est d'environ 59% (limite de Betz).
- d) **La nacelle** : La nacelle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique (figure I.10). Les éléments regroupés sont :
- **Multiplicateur** : il sert à adapter la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique.
 - **Le système de refroidissement** : il se compose généralement d'un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice, et d'un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur.
 - **La génératrice électrique** : elle est l'élément principal de la conversion mécano-électrique. Généralement, c'est une machine asynchrone à cage ou à rotor bobiné. La puissance électrique de cette génératrice peut varier entre 600 KW et 5 MW.
 - **L'arbre lent** : il relie le moyeu au multiplicateur, il contient un système hydraulique permettant le freinage aérodynamique en cas de besoin.
 - **L'anémomètre et La girouette** : l'anémomètre mesure la vitesse du vent et la girouette est un composant qui indique la direction du vent. L'information est transmise au système d'orientation via un système de contrôle électronique pour ces deux composants.
 - **Le système d'orientation** : il permet d'orienter l'éolienne selon la direction du vent car il ne souffle pas toujours dans le Même sens.

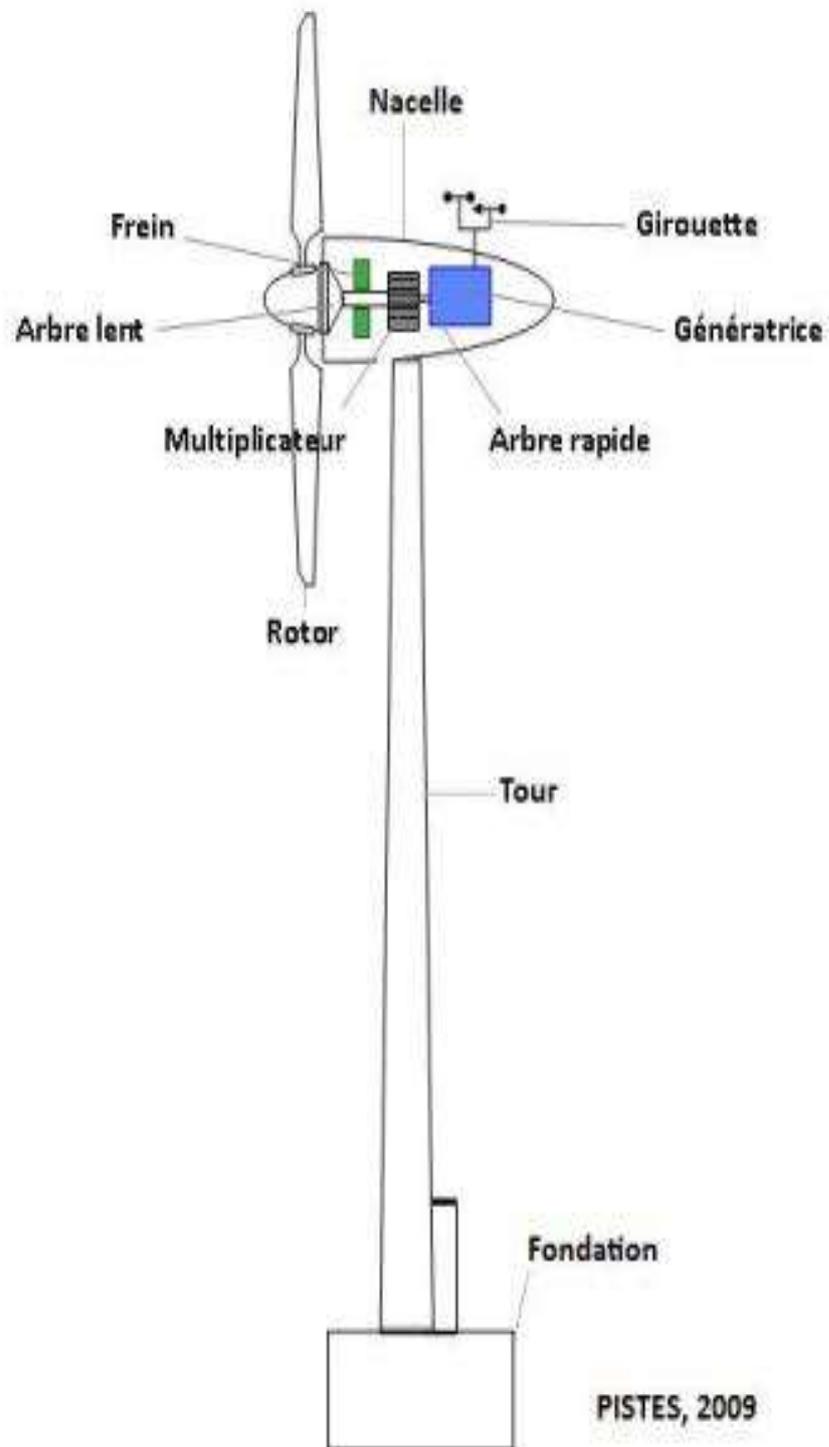


FIGURE I.9 : Les différentes composantes d'une éolienne.

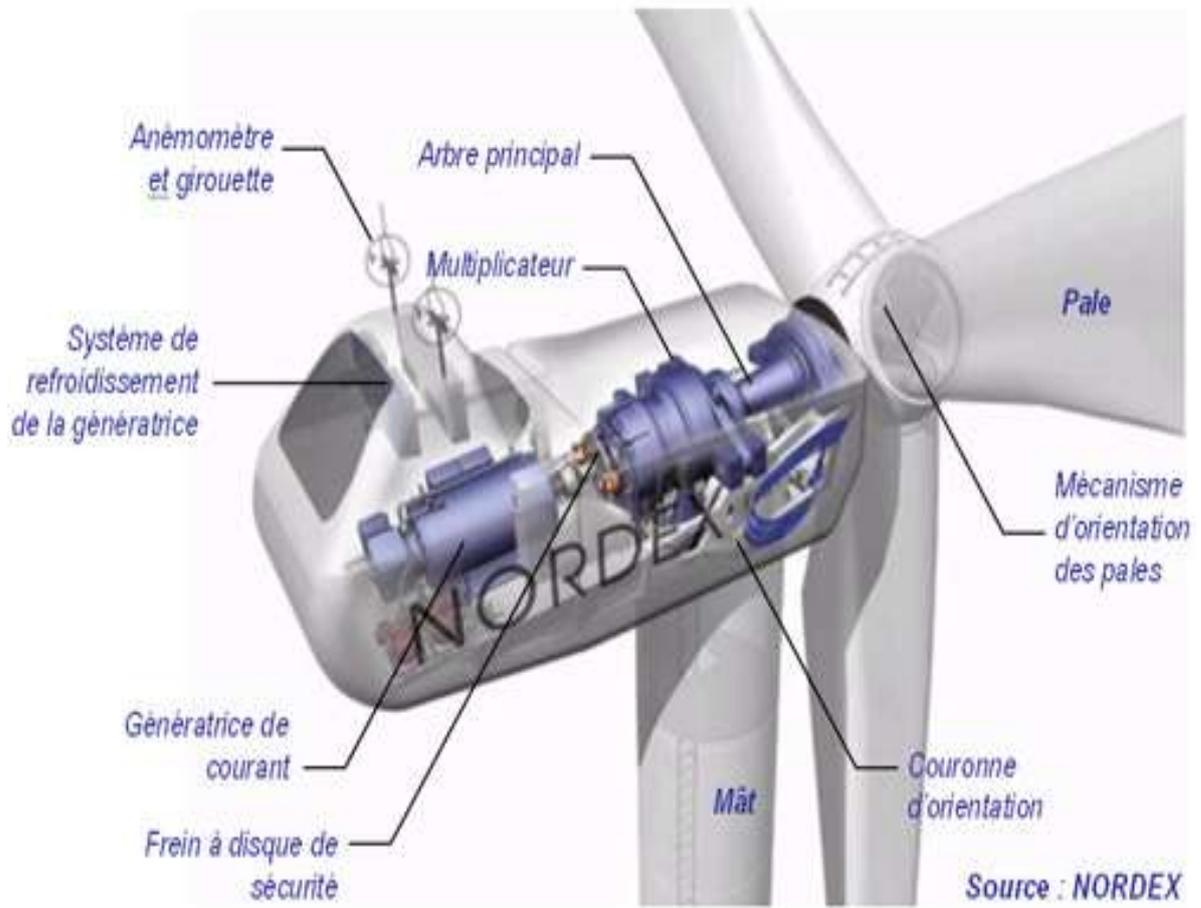


Figure I.10 : La nacelle

I.9 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

A la hauteur du mat, le vent souffle avec une vitesse $V_{wind.}$, lorsque cette dernière est inférieure à la vitesse de seuil, 3,6 m/s dans notre cas, les pales sont mises en drapeau parallèle au vent. Une fois la vitesse du seuil atteinte un signal est donné par le système de commande pour la mise en fonctionnement et l'aérogénérateur démarre.

L'énergie fournie par le vent est une énergie cinétique, elle est en fonction de la masse et la vitesse du volume d'air. Considérant la masse volumique de l'air constante. Alors l'énergie fournie par le vent est en fonction de sa vitesse (équation I.1) [12].

$$E_c = mv^2/2 \quad \text{I.1}$$

Où :

m : masse du volume d'air (en Kg)

V : vitesse instantanée du vent (en m/s)

E_c : en joules.

Considérons un dispositif de récupération de cette énergie quel que soit dont la surface S . En faisant l'hypothèse que la vitesse du vent est constante en chaque point de cette surface, le volume d'air qui traverse la surface S en 1 seconde est égal à Sv .

L'énergie récupérable en 1 seconde est égale en valeur à la puissance :

$$P = E_c / s = \frac{1}{2} \rho S v^3 \quad \text{I.2}$$

P : La puissance récupérable en Watt.

ρ : La masse volumique de l'air (celle-ci est de 1,25kg/m³ en atmosphère normale).

V : La vitesse du vent m/s.

S : La surface des pales m².

I.9.1 CONVERSION D'ENERGIE CINETIQUE EN ENERGIE MECANIQUE

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la figure I.11, où V_1 représente la vitesse du vent en amont de l'aérogénérateur et V_2 la vitesse en aval [13].

Supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne des vitesses du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et après passage à travers le rotor V_2 soit $\frac{V_1+V_2}{2}$, alors la masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales en une seconde est :

$$m = \frac{\rho S (v_1 + v_2)}{2} \quad \text{I.3}$$

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

$$P_m = \frac{m(v_1^2 + v_2^2)}{2} \quad \text{I.4}$$

Soit en remplaçant m par son expression dans

$$P_m = \frac{\rho S (v_1 + v_2)(v_1^2 - v_2^2)}{4} \quad \text{I.5}$$

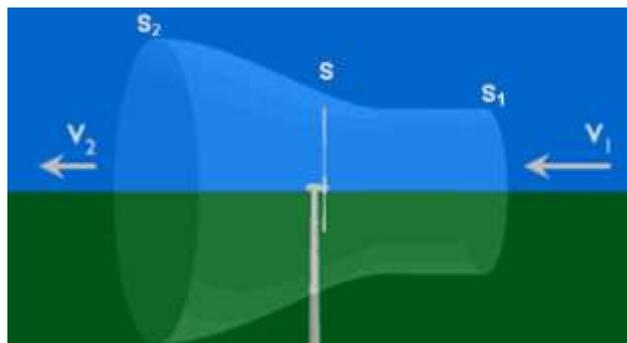


Figure I.11 : Tube de courant autour d'une éolienne

Théoriquement, un vent non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V_1 , en mettant $V_2=0$ dans (I.5) la puissance P_{mt} correspondante serait alors :

$$P_{mt} = \frac{\rho S v_1^3}{2} \quad \text{I.6}$$

ρ est la densité de l'air, elle est égale à $1,22 \text{ kg/m}^3$ à la pression atmosphérique et à 15°C . Selon la loi de *Betz*, cette puissance ne pourra jamais être extraite dans sa totalité. La puissance maximale pouvant être recueillie par une éolienne est égale à la limite de *Betz* [14]:

$$P_{\text{méc_max}} = \frac{16}{27} \cdot P_{mt} = 0,59 \cdot P_{mt} \quad \text{I.7}$$

Sous cette forme, la formule de *Betz* montre que l'énergie maximale susceptible d'être recueillie par un aérogénérateur ne peut dépasser en aucun cas 59% de l'énergie cinétique de la masse d'air qui le traverse par seconde. Alors le coefficient de puissance maximal théorique est défini par le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible :

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left(1 + \left(\frac{v_1}{v_2}\right)\right)\left(1 - \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^2\right)}{2} \quad \text{I.8}$$

D'après la caractéristique de la figure I.12, obtenue par la représentation de l'équation ci-dessus, on s'aperçoit que le ratio P_m/P_{mt} présente un maxima de $16/27$ soit 0,59. C'est la limite théorique appelée limite de *Betz* fixant la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent [13].

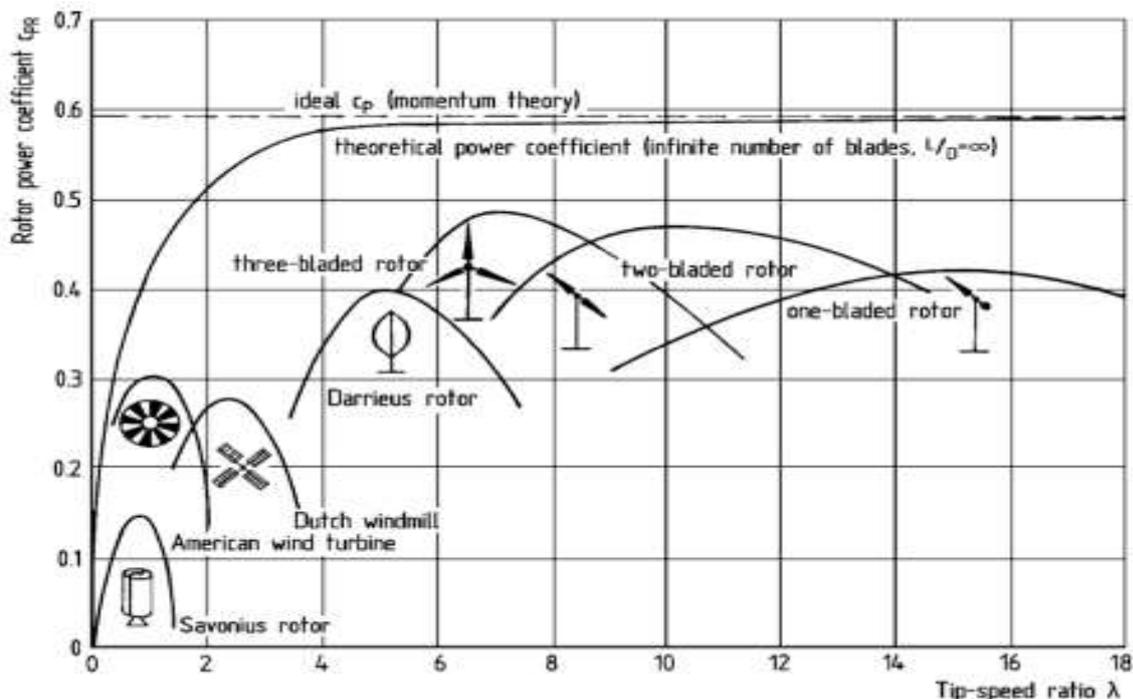


Figure I.12: Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes

En réalité, jusqu'à présent, seulement 60 à 70% de cette puissance maximale théorique peut être exploitée par les engins les plus performés. Ce rendement, aussi appelé coefficient de puissance C_P de l'éolienne (équation I.9), est propre à chaque voilure. Il lie la puissance éolienne à la vitesse du vent [14].

$$C_P = \frac{2P_{\text{méc}}}{\rho S v_1^3} \quad \text{I.9}$$

La puissance mécanique $P_{\text{méc}}$ disponible sur l'arbre du générateur électrique s'exprime par :

$$P_{\text{méc}} = \frac{1}{2} \cdot C_P \cdot \left(\frac{R \cdot \Omega_{\text{turbine}}}{K \cdot v_1} \right) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v_1^3 \quad \text{I.10}$$

Ω_{turbine} : vitesse de rotation avant multiplicateur [rad/s] et R : rayon de l'éolienne

I.9.2 LE MODE DE REGULATION

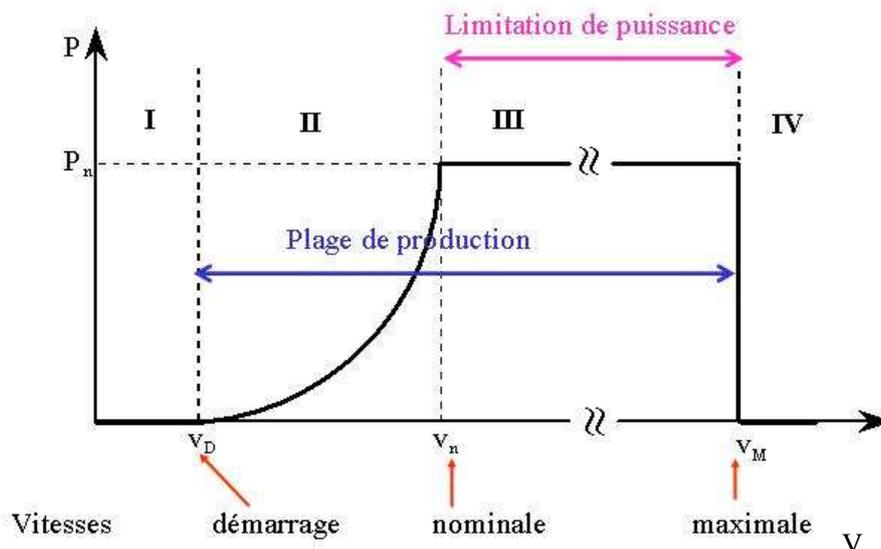


Figure I.13 : Puissance en fonction de la vitesse.

D'après la courbe de la figure I.13 on peut distinguer :

- La partie I où aucune puissance n'est délivrée pour les vitesses inférieures à la vitesse de démarrage v_{min} (3.6 m/s),
- La partie II qui représente le fonctionnement normal. La puissance maximale de la turbine évolue selon le cube de vitesse du vent.

- La partie III montre que la puissance est limitée à la puissance nominale P_n lorsqu'elle l'atteint.
- La partie IV montre qu'au-delà d'une certaine limite de vitesse du vent, la turbine doit être arrêtée.

Il existe quatre méthodes pour limiter la puissance éolienne dans le cas de forte valeur de la vitesse du vent :

- Par variation de l'angle de calage « Pitch régulation »,
- Par décrochage aérodynamique « Stall-régulation »,
- Par limitation de la puissance et de la déviation de l'axe sur un plan vertical (un basculement de la nacelle) ou horizontale (une rotation autour de l'axe du mat).
- Par régulation de la puissance éolienne en limitant la vitesse de rotation Ω_{mec} par une action électrique. [15].

I.9.3 CONTROLE DE LA PUISSANCE FOURNIE PAR UNE EOLIENNE

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

1. La turbine extrait une quantité de l'énergie cinétique du vent pour la convertir en énergie mécanique via les pales de la turbine.
2. La vitesse de rotation de l'éolienne est adaptée à celle de la génératrice par un multiplicateur de vitesse selon le type de générateur utilisé.
3. La génératrice convertit l'énergie mécanique en énergie électrique, ensuite et via un convertisseur de puissance l'énergie électrique est transmise au réseau électrique.

Il doit donc y avoir conversion et transmission régulières de l'énergie. Ce fonctionnement général est illustré par la figure I.14.

Pour les vitesses de vent fortes, un dispositif de contrôle et de protection est nécessaire dans chaque système éolien. Le contrôle de la puissance éolienne fournie peut se faire soit au niveau de la turbine soit au niveau de la génératrice [15].

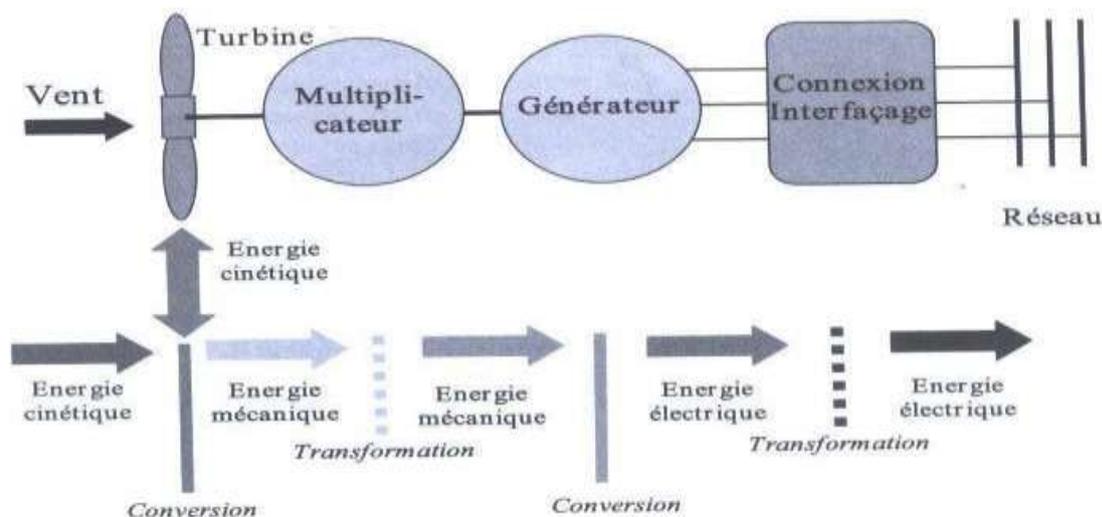


Figure. I.14: Principe de la conversion d'énergie.

I.10 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'ENERGIE EOLIENNE

Comme toute source d'énergie, l'éolienne possède des avantages et des inconvénients [16].

AVANTAGES

Les avantages cités ci-dessus permettent à l'éolienne d'être une bonne alternative aux sources d'énergies fossiles. Ils sont récapitulés comme suit :

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable et respecte l'environnement.
- C'est l'énergie la moins chère des énergies renouvelables.
- La production d'énergie éolienne ne produit pas d'émission de CO₂.
- L'énergie éolienne ne présente pas de risque comme l'énergie nucléaire.
- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie.
- En fonctionnement, les éoliennes peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires.

INCONVENIENTS

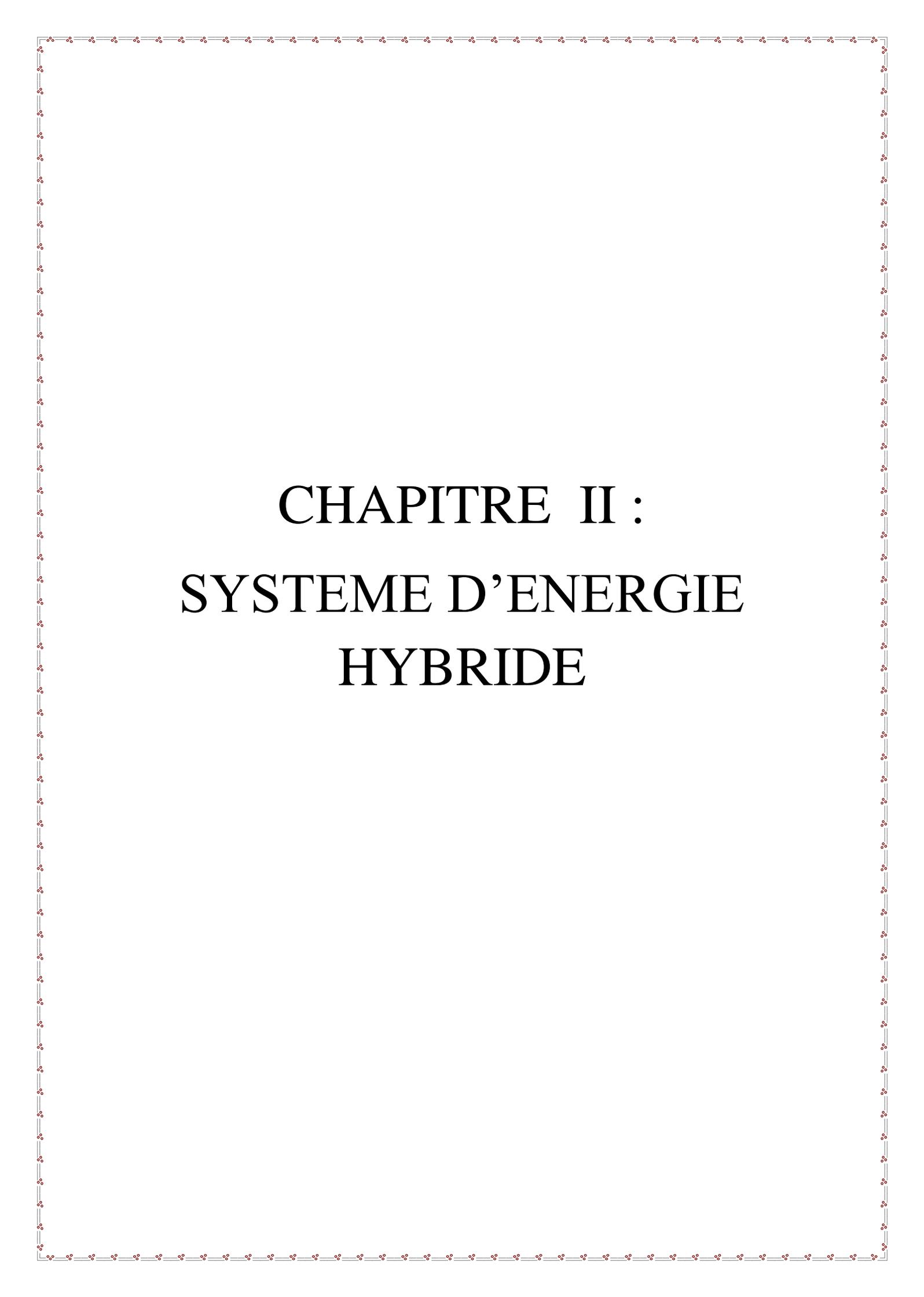
- L'impact visuel.
- Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classiques.

- La puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne.
- Le bruit mécanique et l'impact sur les oiseaux.

CONCLUSION

Dans ce premier chapitre nous avons cité les différentes sources d'énergies renouvelables. Ensuite une brève présentation sur l'historique du développement des éoliennes dans le monde et en Algérie est donnée.

Par la suite, nous allons présenter les différents types des éoliennes celle de l'axe vertical et plus particulièrement à axe horizontales aussi ses avantages et désavantages. Comme nous allons utiliser l'éolienne à axe horizontale dans notre travail, ses composantes constitutives étaient plus détaillées.



CHAPITRE II : SYSTEME D'ENERGIE HYBRIDE

INTRODUCTION

Les applications des systèmes d'énergie hybrides demeurent au stade embryonnaire en Algérie, il est important de réaliser des partenariats avec les pays dominants dans ce domaine. Nous allons présenter dans ce chapitre les différentes structures existantes des systèmes hybrides (SH) ainsi que leurs classifications.

II.1 ETAT DE L'ART

Les systèmes autonomes sont intéressants pour répondre aux besoins énergétiques des habitants isolés dans le désert Algérien, vu que le coût de raccordement au réseau est important et parfois ce raccordement est impossible. L'utilisation de générateurs à carburant fossiles représente la solution générale et actuelle malgré quelques avancées faites pour l'utilisation des générateurs basés sur l'énergie renouvelable.

L'utilisation de ses énergies renouvelables est limitée par la variabilité des ressources, et la fluctuation des charges selon les périodes annuelles et journalières liées aux conditions climatiques. La présence d'un système hybride de génération d'énergie est une solution à ce problème de limitation d'utilisation. Il rentre en application afin d'alimenter en énergie électrique des relais de télécommunication, des postes frontières, les habitats isolés, les dispensaires ...etc.

La baisse continue du cout et la fiabilité croissante ont mené à une utilisation considérable de la génération d'énergie électrique par les énergies renouvelables dans le monde. Plusieurs applications sont réalisées : au Khartoum [17] l'utilisation d'un système hybride afin d'alimenter des petites maisons, en Inde [18] l'intégration d'un système hybride dédié à fournir de l'énergie électrique pour des îles isolées. En Arabie saoudite une étude est présentée dans le cadre d'examiner la possibilité de l'utilisation d'un système hybride pour répondre au besoin de demande de l'énergie électrique à un petit village qui s'appelle Qtqt [19].

Dans la littérature, les systèmes hybrides ont été étudiés en fonctionnement isolé ou relié à un réseau électrique. Leur étude est basée sur plusieurs paramètres, le dimensionnement de système est le premier a considéré. Cependant, il est difficile de trouver comment dimensionner les différents composants d'un système autonome dans la littérature. La plupart des ouvrages portent sur la théorie de base des technologies, mais rarement sur le dimensionnement précis des équipements de base (par exemple les panneaux solaires, les

éoliennes ou bien les génératrices). Les articles quant à eux ne fournissent pas ces informations, mais plutôt des informations très spécifiques sur l'étude réalisée et des comparaisons des résultats [20].

Dans [20] une étude complète d'un système hybride éolien/photovoltaïque/diesel autonome été présentée, les résultats ont été bien illustrés. Cette installation est préférée par rapport à d'autres installations basées sur une source renouvelable ou deux.

Dans [21] on montre la nécessité de méthode d'optimisation pour garantir une efficacité de fonctionnement dans le cas d'un système hybride autonome éolien/photovoltaïque. La méthode étudiée par les auteurs est basée sur l'algorithme génétique pour une optimisation parfaite du système en comparaison avec les méthodes classiques utilisées. Un autre travail présenté par Riad Chedid et Saifur Rahman dans [22] donne un outil qui aide à déterminer une bonne configuration d'SH afin de bénéficier d'une construction optimale. Dans la même conception et dans [23], les auteurs ont fait apparaître une méthode d'analyse pour l'optimisation du même système.

L'architecture, et même le choix de la stratégie de fonctionnement de système hybride peut aussi influencer sur l'image complète du système. D'autres paramètres permettent de faire évaluer les performances comme l'économie de carburant, le coût du KW, le nombre et la durée des pannes et le nombre d'arrêts pour l'entretien [24].

En 2007, D. Saheb-Koussa et al ont établi un modèle de dimensionnement pour un système hybride qui peut être situé dans différentes zones climatiques algériennes. Ils ont fait une étude économique afin de comparer les contraintes financières relatives à chacun des systèmes et de choisir le système qui présente une couverture totale de la charge et les aspects techniques les plus pertinents d'un système hybride [25].

Dans la même année, S. Diaf et al ont fait une étude de classement et une optimisation technique et économique d'un système hybride autonome photovoltaïque/éolien (HPWS) avec un stockage des batteries. L'objectif principal de cette étude est de trouver la taille optimale du système qui est capable d'accomplir les besoins en énergie d'une répartition de charges données pour trois sites situés sur l'île de Corse et d'analyser l'impact de différents paramètres sur la taille de système [26].

En 2008, D. Saheb-Koussa et al ont fait une étude qui est basé sur l'alimentation d'une habitation situé dans des différents sites algériens en utilisant un système hybride avec stockage électrochimique. Cette étude est localisée sur une modélisation détaillée des composantes du système, l'ensemble du système et l'application des modèles ainsi que le dimensionnement du système, ce qui a amené cette étude à de meilleurs performances afin d'élaborer une étude économique et faire une comparaison avec les contraintes financières [27].

Dans la même année, D. Saheb-Koussa et al ont fait une étude dont le but est d'estimer la dimension appropriée de système photovoltaïques hybrides autonomes photovoltaïque/éoliens/diesel/batteries. Ce système garantit l'autonomie d'énergie du consommateur à distance typique avec un faible coût de l'énergie. Cette étude a aussi un deuxième but qui est l'impact de la qualité du potentiel énergétique sur la taille de système [28].

Dans la même année, S. Diaf et al ont fait une étude d'optimisation technico-économique d'un système hybride PV/Wind(HPWS) autonome en île de Corse. Pour établir cette étude ils ont conclu que l'impact de la qualité du potentiel de l'énergie renouvelable sur la taille du système et les dimensions optimales du système doivent être défini pour cinq sites pour l'île de Corse. Pour cela ils ont développé un modèle complet de classement par taille qui est capable de prévoir la configuration du système optimale sur la base du LCE, par conséquent une analyse intégrées de bilan énergétique est effectuée pour la période de temps plein étudiée [29].

En 2010, une étude a été faite par D. Saheb-Koussa et al. Ils ont déterminé le prix du kWh fournit par le système hybride pour le site d'Adrar en utilisant le logiciel HOMER, ce prix peut s'élevé à 1.417 \$/kWh [30]. Ils ont conclu aussi que le système hybride dépend des ressources énergétiques disponibles et des contraintes d'utilisations et d'autre part ils ont mis en évidence le rôle de l'utilisation des énergies renouvelables dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre avec un taux de CO₂ = 16086 kg/an pour un système utilisant seulement le groupe électrogène et un taux de 599 kg/an pour le système hybride étudié [30].

En 2011, D. Saheb-Koussa et al ont étudié quatre zones rurales Adrar, Djelfa, Illizi et Djanet dont les ressources solaires et de vent sont disponibles. À l'aide du logiciel HOMER, ils ont fait une optimisation du système du point de vue du rendement énergétique basé sur le

potentiel renouvelable, pour ces quatre régions, et pour deux types de charge à savoir une et vingt maisons. Ils ont trouvé que le coût de l'énergie (kWh) varie de 1.49, 2.46, 1.84 et 4.1 USD à 1.19, 2.16, 1.33, et 1.52 USD respectivement pour : Adrar, Djelfa, Illizi et Djanet et d'autre part qu'il dépend aussi en grande partie de la qualité du potentiel énergétique (Adrar : 1.19 USD et Djelfa 2.16 USD) [31].

Dans la même année, A. Kaabeche et al ont réalisé un modèle d'optimisation de système hybride PV-éolien intégré, ce modèle utilise la technique d'optimisation itérative suivant la probabilité de l'insuffisance d'alimentation d'énergie (DPSP), la puissance excessive relative générée (REPG), le coût actuel net (TNPC), le coût annualisé (TAC) et l'analyse équilibrée de distance (BEDA) pour des coûts de fiabilité et de système de puissance. Ils ont fait une illustration de l'organigramme du modèle optimal hybride de classement par taille, ce modèle est fusionné, pour que la taille optimale du système de conversion hybride d'énergie (PV-éolien), en utilisant une banque de batterie, peut être exécutée techniquement et économiquement selon les conditions de fiabilité de système. Ensuite, une analyse de sensibilité a été effectuée afin d'apprécier les paramètres les plus importants influençant sur les performances économiques du système hybride [32].

En 2016, D. Saheb-Koussa et al ont fait plusieurs études sur la production d'électricité éolienne et photovoltaïque couplée au réseau conventionnel. Les principaux intérêts d'un tel système sont la production propre sur le lieu de consommation, l'hybridation et la mutualisation des ressources ainsi que la contribution à la protection de l'environnement [33].

En 2017, Dekkiche, Mohamed, et al. On réalisé un modèle d'optimisation de système hybride PV/éolien/diesel avec stockage, à l'aide de Logiciel HOMER qui a donné un système optimal purement basé sur le côté économique et aussi la disponibilité des ressources, enfin une étude technico-économique a été faite pour le site Ouled Fares. Ils ont trouvé que ce site est adéquat pour un système PV-Diesel [34].

II.2 SYSTEMES D'ENERGIE MULTI-SOURCES

La puissance produite par les sources d'énergie renouvelables peut ne pas être suffisante tout le temps pour alimenter les charges. Le couplage des sources d'approvisionnement et la formation d'un système dit hybride est une solution garantissant la disponibilité permanente de la puissance nécessaire. Un système hybride à sources d'énergie renouvelables (SHSER) est un système électrique, comprenant plus d'une source d'énergie, parmi lesquelles une au

moins est renouvelable et une autre source conventionnelle telle que le générateur diesel afin d'assurer une production électrique continue. Le système hybride peut aussi contenir un dispositif de stockage [35].

Un système hybride doit notamment :

- Assurer en continue l'énergie suffisante demandée par la charge et si possible de produire le maximum d'énergie à partir des sources d'énergie renouvelable.
- Obéir aux règles d'exploitations en temps réel basé sur une priorité économique des ressources énergétique disponible.
- Compter sur une gestion automatisée des composantes de système afin de garantir la stabilité en tout temps, y inclus dans les transitions entre les différentes modes d'opération du système. Exemple : dans un système éolien-diesel, trois modes d'alimentations du réseau local existent selon la qualité du vent ; éolien seul, diesel seul, éolien diesel [36].

II.2.1 INTERET D'UN SYSTEME D'ENERGIE HYBRIDE

Les systèmes d'énergies hybrides (SEH) sont conçus pour assurer la production continue de l'électricité, aussi dans l'intention d'économiser le carburant et de baisser le coût obtenu par la génération hybride. Ce coût doit au moins couvrir l'investissement envisagé de l'énergie renouvelable et les autres composants auxiliaires du système.

II.2.2 LES CLASSIFICATIONS GENERALES D'UN SEH

Les classifications des systèmes hybrides sont réalisées selon différent critère. Voici les classifications les plus répandues.

II.2.2.1 Classification selon le régime du fonctionnement

Les systèmes hybrides peuvent être divisés en deux groupes : les systèmes hybrides fonctionnant en parallèle avec le réseau électrique, ils contribuent à satisfaire la charge du système électrique d'un pays ou d'une région ; les systèmes hybrides fonctionnant en régime isolé ou en mode autonome, ils doivent répondre aux besoins des consommateurs situés dans des sites éloignés du réseau électrique (refuges de montagne, îles, villages isolés, panneaux de signalisation routière etc....) [35].

II.2.2.2 Classification Selon La Structure

Trois critères peuvent être pris en compte dans le classement en fonction de la structure du système :

1. La présence ou non d'une source d'énergie classique. Cette source conventionnelle peut être un générateur diesel, une micro turbine à gaz...etc.
2. La présence ou non d'un dispositif de stockage. Le stockage permet d'assurer une meilleure satisfaction des charges électriques en périodes d'absence d'une ressource primaire à convertir en électricité.
3. Le dernier critère de classification est relatif au type de sources d'énergie renouvelables utilisées. La structure du système peut contenir un système photovoltaïque, une éolienne, un convertisseur d'énergie hydraulique ou une combinaison de ces sources [35].

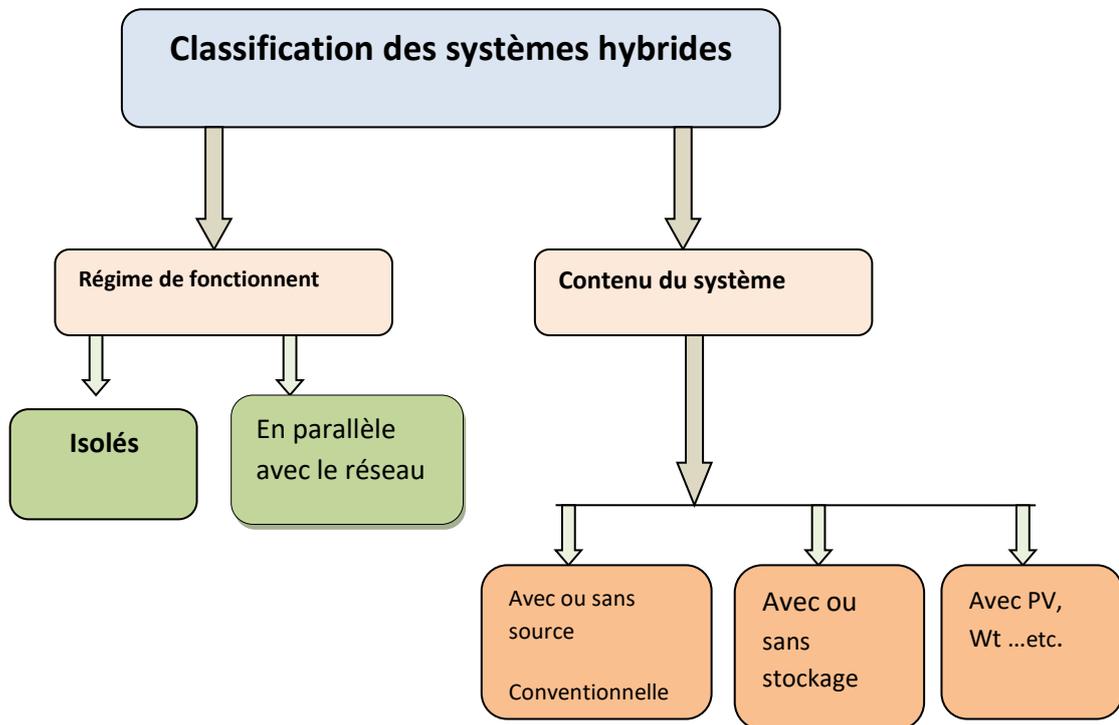


Figure II.1 : Structure générale des systèmes hybrides.

II.2.3 ARCHITECTURE DES SEH

Les générateurs électriques d'un SEH peuvent être connectés selon différentes configurations. Ces configurations constituées de sources d'énergies éoliennes, de batteries et des générateurs diesels se résument en trois types d'architecture : architecture à bus CC (bus à

courant continu), architecture à bus CC-CA (la connexion mixte, bus à CA et bus à CC), et architecture à bus CA (bus à courant alternatif) [36]. Nous présenterons ici la description ainsi que les avantages et les inconvénients des deux premières architectures :

a) Architecture à bus à Courant Continu (CC) :

Dans le système hybride (figure II.2), la puissance fournie par chaque source est centralisée sur un bus à CC. Le ou les générateur(s) diesel(s) sont connectés en série avec l'onduleur pour alimenter indirectement les charges à CA. En effet, l'onduleur doit alimenter les charges à CA à partir du bus à CC et doit suivre la consigne fixée pour l'amplitude et la fréquence. Les batteries et l'onduleur sont dimensionnés pour alimenter des pics de charge, alors que le générateur diesel est dimensionné pour alimenter les pics de charge et les batteries en même temps. Quant à la puissance délivrée, elle peut être contrôlée par la commande du courant d'excitation de la partie électrique du générateur diesel ou en incorporant un régulateur de charge dans les sources d'énergie éolienne [36].

Avantages:

- La connexion de toutes les sources sur un bus à CC simplifie le système de commande.
- Le générateur diesel peut être dimensionné de façon optimale pour qu'il fonctionne en puissance nominale durant le chargement des batteries jusqu'à 75-85 % de l'état de charge de ces derniers.

Inconvénients:

- Le rendement de l'ensemble du système est faible. Une certaine quantité d'énergie est perdue à cause des batteries et des pertes dans les convertisseurs.
- Les générateurs diesels ne peuvent pas alimenter directement la charge, l'onduleur doit donc être dimensionné pour assurer le pic de charge.

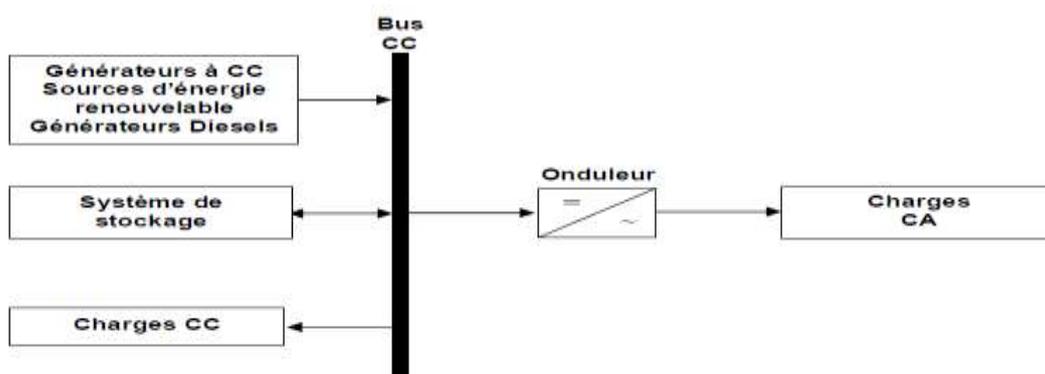


Figure II.2 : Configuration du SEH à bus CC.

b) Architecture mixte à bus à Courant Continu / Courant Alternatif (CC/CA) :

La configuration aux deux bus à CC et à CA est présentée dans la figure II.3. Celle-ci a des performances supérieures à celles de la configuration antérieure (un couplage CC). Dans cette configuration, les sources d'énergie renouvelable et les générateurs diesels peuvent alimenter une partie de la charge à CA directement, ce qui permet d'augmenter le rendement du système et de réduire la puissance nominale du générateur diesel et de l'onduleur. La synchronisation de la tension de sortie du générateur diesel et celle l'onduleur permet le fonctionnement en autonome ou en parallèle [36].

Les convertisseurs situés entre les deux bus (le redresseur et l'onduleur) peuvent être remplacés par un convertisseur bidirectionnel. Ce dernier réalise la conversion CC/CA (fonctionnement en onduleur). En cas de surplus d'énergie produite par le générateur diesel, il charge les batteries (fonctionnement redresseur), aussi, il peut alimenter les pics de charge quand le générateur diesel est surchargé. Pour les systèmes hybrides ayant une puissance en-dessous de 100 kW, la connexion mixte, bus à CA et bus à CC, avec des batteries de stockage est très répandue [37].

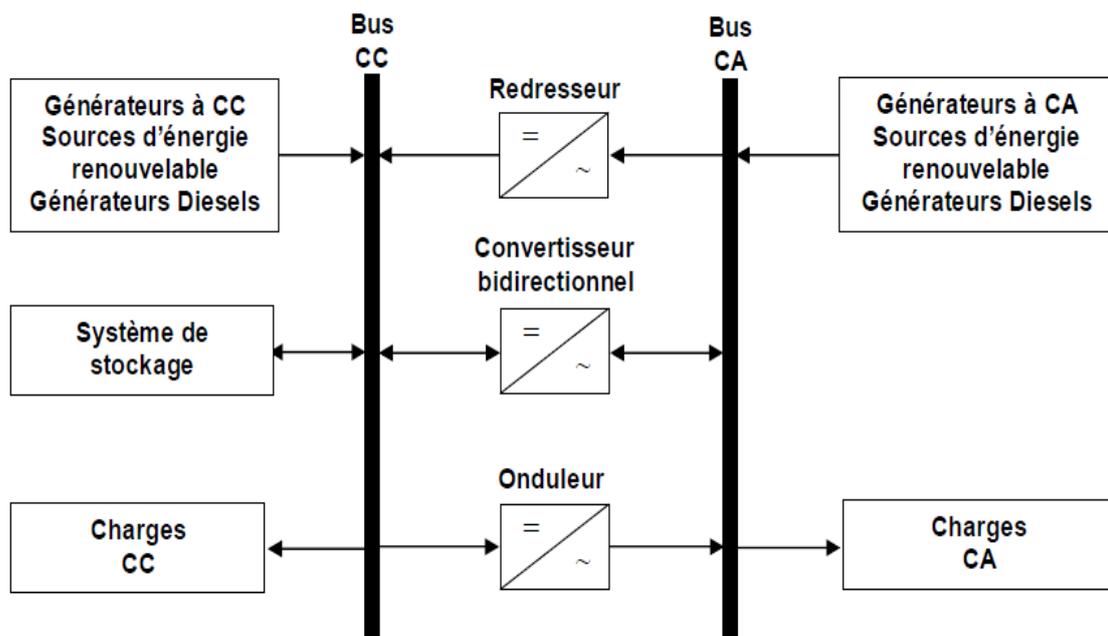


Figure II.3 : Configuration du SEH à deux à CC et à CA

Avantages :

- Le générateur diesel et l'onduleur peuvent fonctionner en autonome et en parallèle. Si le niveau de la charge est bas, l'un ou l'autre génère le nécessaire d'énergie. Cependant, les deux sources peuvent fonctionner en parallèle pendant les pics de charge [37].
- La possibilité de réduction de la puissance nominale de générateur diesel et de l'onduleur sans affecter la capacité du système d'alimenter les pics de charge.

Inconvénient : La réalisation de ce système est relativement compliquée du au fonctionnement parallèle (l'onduleur fonctionne en autonome et non-autonome en synchronisant sa tension en sortie avec la tension en sortie du générateur diesel) [37].

II.3 COMPOSANTS D'UN SYSTEME HYBRIDE

En général, les système hybrides sont constituée de source d'énergie classique (groupe électrogène), de source d'énergie renouvelable (éolienne,solaire). Ils peuvent aussi inclure d'autre sources d'énergie (hydroélectrique, marémotrice, ...etc), et des convertisseur statiques et dynamique, des système de stockage (batterie,volant d'inertie, stockage hydrogène,... etc), des charges principales,délestage et un système de surveillance [38].

II.4 SYSTEME D'ENERGIE HYBRIDE EOLIENNE-DIESEL

L'énergie dans ce système est produite par un ou plusieurs générateurs diesels et une éolienne. Ce système est constitué, en plus des deux sources d'énergie, d'un système de stockage, des convertisseurs, des charges, des charges de délestage et d'un dispositif de gestion des charges ou un system de supervision(Figure II.4). Toutes ces composantes peuvent être connectées en différentes architectures. Dans la plupart des cas, les systèmes hybrides classiques contiennent deux bus : un bus à CC pour les sources, les charges à CC et les batteries; et un bus à CA pour les générateurs à CA et le système de distribution [39].



Une Eolienne



Groupes Diesel



Banc de batteries



Convertisseurs



Charge alternative

Figure II.4 : Principaux éléments d'un système E-D.

II.4.1 LE GENERATEUR EOLIEN

Le fonctionnement des éoliennes est basé sur des machines asynchrone ou synchrone.

a) Système utilisant la machine asynchrone :

Les machines asynchrones sont très utilisées (80% des moteurs de la planète sont des moteurs asynchrones) car leur coût est inférieur à celui des autres machines. La robustesse ainsi que l'absence de ballais-collecteur ou de contact glissant sur les bagues la rendant tout à fait approprié pour l'utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne. En effet, Il existe plusieurs configuration utilisant cette machine parmi lesquelles : la machine asynchrone à rotor bobiné ; la machine asynchrone à cage; la machine asynchrone à double stator, MADA ...etc[40].

b) Système utilisant la machine synchrone :

Les machines asynchrones ont de bons caractéristiques. Cependant, ils ont le défaut d'imposer un multiplicateur de vitesse, car elles possèdent un couple mécanique insuffisant pour un couplage mécanique direct aux pales, contrairement aux machines synchrones qui

peuvent fournir un couple important en dimension géométrique convenable [40]. L'adaptation de cette machine à un système éolien pose des problèmes pour maintenir la vitesse de rotation de l'éolienne strictement fixe et pour synchroniser la machine avec le réseau lors des phases de connexion [40].

II.4.2 GENERATEUR DIESEL

Les installations à source d'énergie renouvelables autonomes nécessitent le stockage ou l'ajout d'un ou plusieurs groupes électrogènes diesels. Pour les SEH, le générateur classique est généralement le moteur diesel directement couplée au générateur synchrone (Figure II. 4). La vitesse du moteur est maintenue par un gouverneur (régulateur de vitesse). Ce gouverneur ajuste le flux du carburant au diesel, maintient la fréquence du courant alternatif à la sortie et garde la vitesse du moteur et celle du générateur constant. La fréquence du réseau est directement liée à la vitesse de rotation du générateur, donc elle est maintenue au niveau désiré [37].

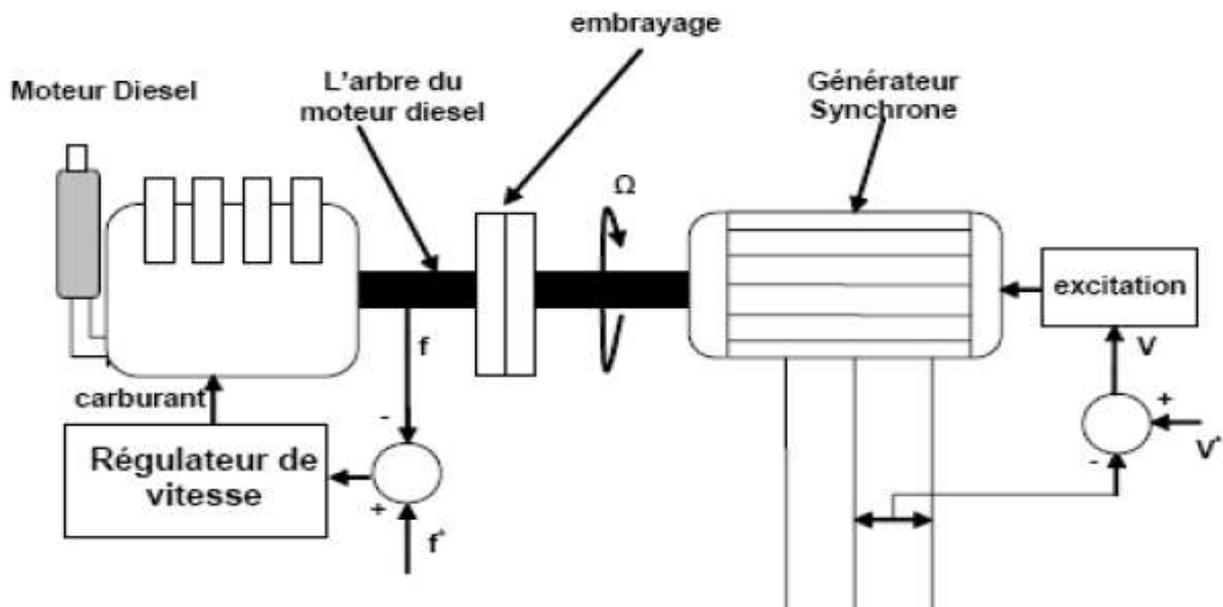


Figure II.5 : Configuration du générateur diesel

II.4.3 BATTERIE

Le stockage d'énergie est un facteur clef dans un système d'énergie hybride en site isolé. Dans la plupart des cas, la station devra comporter un moyen de stockage d'énergie pour couvrir les périodes sans vent. Actuellement Il existe différents moyens de stockage, cependant les batteries d'accumulateurs au plomb sont les plus faciles et les moins couteux à mettre en œuvre en stations isolées. Le stockage est une partie très importante, en effet 20 à 50 % de l'investissement dans une station alimentée en énergie électrique par aérogénérateur lui est destiné [41].

II.5 FONCTIONNEMENT D'UN ACCUMULATEUR AU PLOMB

L'accumulateur est un système électrochimique capable de récupérer sous forme électrique l'énergie chimique stockée. En plus, les réactions internes sont réversibles. Ce système contient deux électrodes (un positive et l'autre négative) et d'un électrolyte. L'électrode positive est en dioxyde de plomb (PbO_2) et l'électrode négative en plomb. L'électrolyte est une solution d'acide sulfurique (H_2SO_4) qui permet le flux d'ions entre les deux électrodes et crée un courant. La différence de potentiel entre les deux électrodes est de 2V [42].

II.6 GESTION DU STOCKAGE

Deux types de stockage sont utilisés dans les systèmes hybrides :

- Le stockage à court terme « Peak Chaving Starategy » permet le filtrage les fluctuations des énergies renouvelables et /ou de la charge. Il réduit également le nombre de cycles de démarrage/ arrêt des générateurs diesels, en conséquence la réduction de la consommation de carburant[37].
- Le stockage à long terme « Cycle Charge Strategy » permet l'alimentation de la charge sur une période de temps plus longue ou lorsque l'énergie renouvelable est insuffisante. Aussi il permet l'amélioration de l'équilibre énergétique et la réduction des cycles de démarrage /arrête des générateurs diesels, donc la consommation du carburant est réduite. En effet, le générateur diesel est arrêté et ne redémarre que si le système de stockage atteint un niveau minimal. Il reste en fonctionnement jusqu'à ce que le système de stockage atteigne son niveau maximal et le cycle se répète continuellement [37].

II.7 LE REGULATEUR DE LA CHARGE DES BATTERIES

Un régulateur de charge appelé aussi contrôleur de charge, est un système électronique fonctionnant de façon automatique et auquel sont raccordés le générateur éolienne et la batterie.

Le régulateur de charge principale surveille en permanence l'état de charge de la batterie. Il permet, en effet, d'assurer la charge complète et coupe l'alimentation du générateur lorsque l'état de charge de la batterie atteint l'une des valeurs limites correspondant au déclenchement de la sécurité. Il existe plusieurs valeurs limites correspondant chacune à un type de protection différent : surcharge, décharge profonde, température de fonctionnement, court-circuit, ...etc. Cette surveillance permanente permet la prolongation de façon importante les performances et la durée de vie des batteries [43].

II.8 SYSTEME D'EXPLOITATION

Le système d'exploitation supervise et commande l'exécution des fonctions spécifiques pouvant inclure le démarrage et l'arrêt des générateurs diesels, l'ajustement de leurs points de fonctionnement, le chargement des batteries et la répartition de la puissance pour les différents types de charges [37].

La plupart des systèmes hybrides contiennent plusieurs formes de commande comme :

- Commande de Chargeurs des batteries pour empêcher leur surcharge au-dessus de seuil maximal ou leur décharge au-dessous du seuil minimal [37].
- Commande des réseaux multi-diesel pour gérer les générateurs diesels et régler le flux de puissance. Parfois, la commande est intégrée individuellement dans chaque composant du système [37].
- Commande du gouverneur de vitesse sur le moteur diesel, du régulateur de tension sur l'alternateur ou sur l'éolienne.
- Commande plus global permet la surveillance de certains ou de tous les composants. Ce système de surveillance est automatique [37].

II.9 CONVERTISSEURS

Dans un système d'énergie hybride (SEH), des convertisseurs sont utilisés pour charger les batteries de stockage et pour transformer le CC en CA et vice-versa. Trois types de

convertisseurs sont souvent rencontrés dans les SEH : les redresseurs, les onduleurs et hacheurs.

- a) Les redresseurs réalisent la conversion AC/CC. Ils sont souvent utilisés pour charger les batteries à partir d'une source à CA. Ce sont des appareils relativement simples, ne sont pas chers et ils ont un bon rendement.
- b) Les onduleurs convertissent le CC en CA. Ils peuvent fonctionner en autonome pour alimenter des charges à CA ((ils imposent leur propre fréquence à la charge) ou en parallèle avec des sources à CA (Ils exigent la présence d'une source à CA pour fonctionner). Il existe aussi des onduleurs qui peuvent assurer les deux régimes de fonctionnement : autonome ou en parallèle avec un autre générateur.
- c) Les hacheurs réalisent la conversion CC/CC, par exemple. Pour adapter la tension entre deux sources [37].

II.10 CHARGES

Les charges électriques représentent l'ensemble des appareils et dispositif consommant l'énergie électrique. Il existe des charges à caractère résistif, comme les ampoules à incandescence, les chauffes à eau ... etc. Les appareils utilisant des machines électriques sont des charges résistives et inductives. Elles sont les principaux consommateurs de puissance réactive. La présence de charge inductive cause des transitions de tension et de courant pendant les changements dans le fonctionnement du système [36].

II.11 CLASSIFICATION ENERGETIQUE DES SYSTEMES HYBRIDES

On peut classer les SEH selon la puissance produite en KW (tableau II.1)

Tableau II.1 : Classification des SEH par gamme de puissance

PUISSANCE DU SEH [KW]	APPLICATION
Faible < 5	Systèmes autonomes : stations de télécommunications, de pompage de l'eau, autres applications isolées.
Moyenne : 10 -250	Micro réseaux isolés : alimentation d'un village isolé, d'un hameau, des zones rurales...
Grande : > 500	Grands réseaux isolés (exemple: réseaux insulaires)

II.11.1 CLASSIFICATION DES SYSTEMES EOLIEN-DIESEL

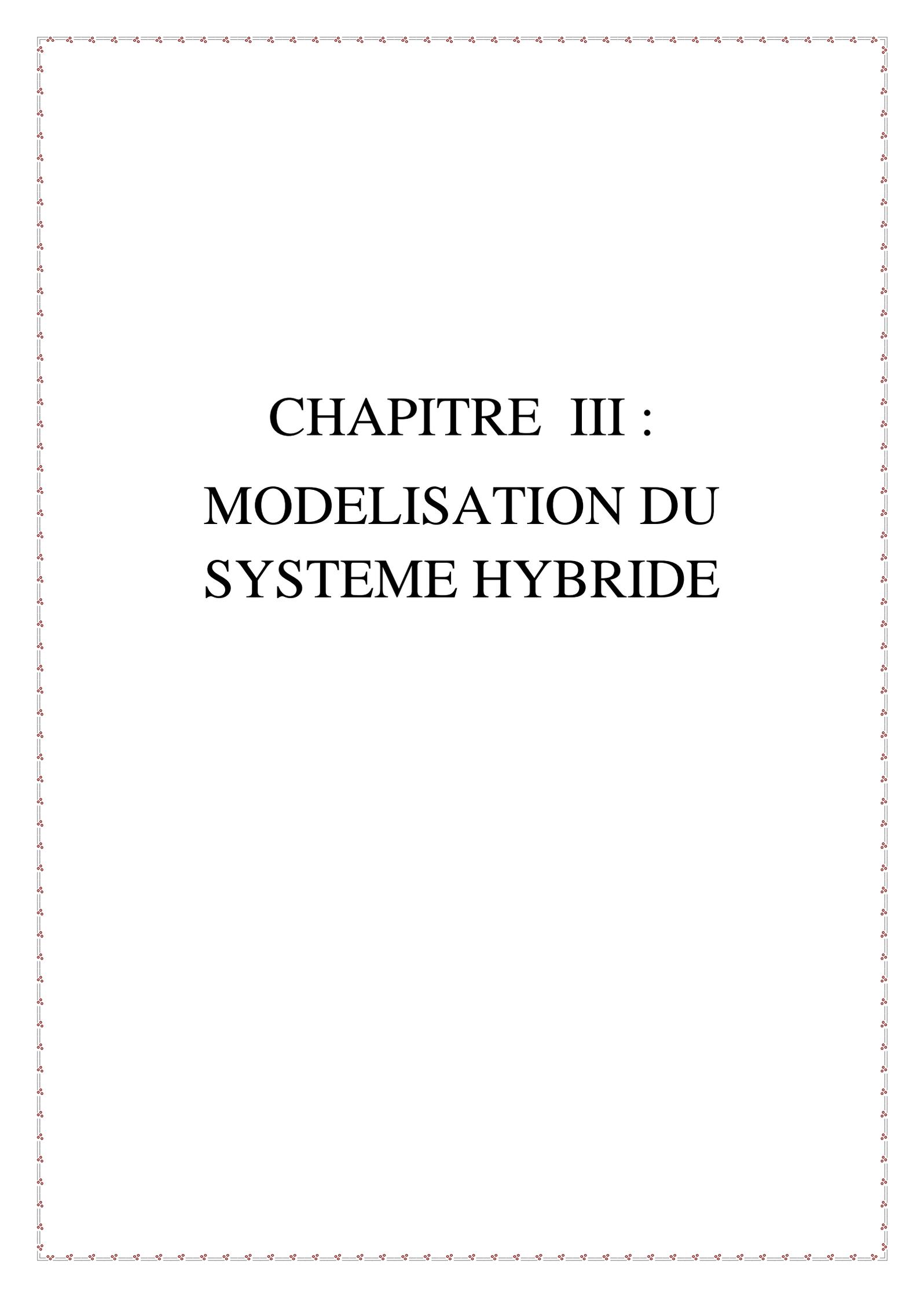
Une classification des grands systèmes éolien-diesel en trois niveaux sépare les systèmes en fonction de taux de pénétration de l'énergie éolienne et donne leurs caractéristiques de fonctionnement (tableau II.2).

Tableau II.2 : Classification des systèmes Eolien-Diesel basés sur le taux de pénétration de l'énergie éolienne

Niveau de pénétration	Caractéristique de fonctionnement	PENETRATION	
		Pic Instantané	Moyenne annuelle
Faible	<ul style="list-style-type: none"> -GD fonctionne sans arrêt. -La production éolienne réduit la charge du diesel. - L'énergie éolienne alimente la charge principale. -Il n'y a pas de système de supervision. 	< 50%	< 20%
Moyen	<ul style="list-style-type: none"> -GD fonctionne sans arrêt. -Commande relativement simple. - Niveaux élevés d'énergie éolienne : des charges secondaires sont réparties assurant une charge suffisante pour le diesel ou pour la production éolienne est réduite. 	50%-100%	20% - 50%
Elevée	<ul style="list-style-type: none"> - GD peut être arrêté en fonction de la production éolienne. - Systèmes auxiliaires pour contrôler la tension et la fréquence. -Commande complexe. 	100%-400%	20%-150%

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté une description générale du système hybride étudié dans ce travail : éolien-diesel –batteries. Toutes les composantes ainsi que les différents types d'architectures existants ont été introduits afin de permettre une bonne compréhension du fonctionnement du SEH étudié.



CHAPITRE III :

MODELISATION DU SYSTEME HYBRIDE

INTRODUCTION

La modélisation est une représentation mathématique d'un phénomène physique (réel). Elle permet de prédire le comportement d'un système. L'objectif essentiel de la modélisation du système est de prendre en compte l'évolution des différentes conditions météorologiques données ou estimées qui caractérisent ses performances sur une longue période.

Ainsi, dans ce chapitre nous présenterons la modélisation du système hybride éolien-diesel-batteries en utilisant des modèles mathématiques de type « entrée-sortie » élaboré, permettant de calculer la puissance électrique produite à partir de la variation d'énergie de ce dernier. Dans tous les cas, nous utiliserons des modèles de la littérature.

III.1 MODELISATION DU GENERATEUR EOLIEN

III.1.1 MODELISATION DU POTENTIEL EOLIEN

Afin de pouvoir caractériser un site éolien, il est impératif de connaître la hauteur sur laquelle les mesures sont prises et ensuite adapter les résultats à la hauteur de mat de l'éolienne.

Notant que la vitesse du vent augmente avec l'altitude et dépend de la rugosité du sol. En effet, en plus la rugosité du sol est importante, plus la vitesse du vent est freinée. La méthode la plus utilisée pour l'extrapolation de ces vitesses à une hauteur différente de celle mesurée est celle utilisant la loi de puissance qui est définie par l'équation suivante :

$$\frac{V(Hm)}{V(H)} = \frac{\ln\left(\frac{H}{A}\right)}{\ln\left(\frac{Hm}{A}\right)} \quad (\text{III.1})$$

Où : H est la hauteur à laquelle le vent est estimé (hauteur du moyeu de l'éolienne).

Hm : est la hauteur des appareils de mesure (généralement 10 m).

$V(Hm)$ et $V(H)$: Sont respectivement la vitesse du vent à la hauteur des mesures et la vitesse du vent à la hauteur H .

A : est un facteur empirique exprimant les influences de la rugosité de la surface du sol.

Relation utile dans le cadre de notre étude de la ressource éolienne (nécessité de déduire à partir d'une vitesse mesurée à 10 m de hauteur, la vitesse au niveau du moyeu, à des hauteurs de 15.2, 19.8 et 29.4 m).

III.1.2 LA VITESSE MOYENNE DU VENT

La vitesse moyenne du vent est le plus simple indicateur de la qualité des ressources éolienne d'une région. La moyenne des vitesses générées à chacun des N instants de mesure est donnée par la formule suivante :

$$\bar{V} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i \quad (\text{III. 2})$$

Avec V_i : vitesses instantanées.

\bar{V} : vitesse moyenne.

III.1.3 MODELISATION DU GENERATEUR EOLIEN PAR INTERPOLATION

Pour estimer la puissance produite par un aérogénérateur, nous avons utilisé la courbe de puissance caractéristique de ce dernier. Cette courbe permet de connaître la puissance produite à partir de la vitesse du vent. Elle est spécifique pour chaque aérogénérateur.

La modélisation des éoliennes nécessite une méthode d'approche. De ce fait, nous utiliserons dans le cadre de notre projet les courbes réelles de puissance des deux aérogénérateurs auxquelles, nous appliquerons une méthode d'interpolation pour les modéliser.

Nous donnons sur la figure III.1 les courbes réelles de puissance des deux aérogénérateurs en fonction des valeurs de la vitesse du vent données par le concepteur tracé moyennant le logiciel MATLAB.

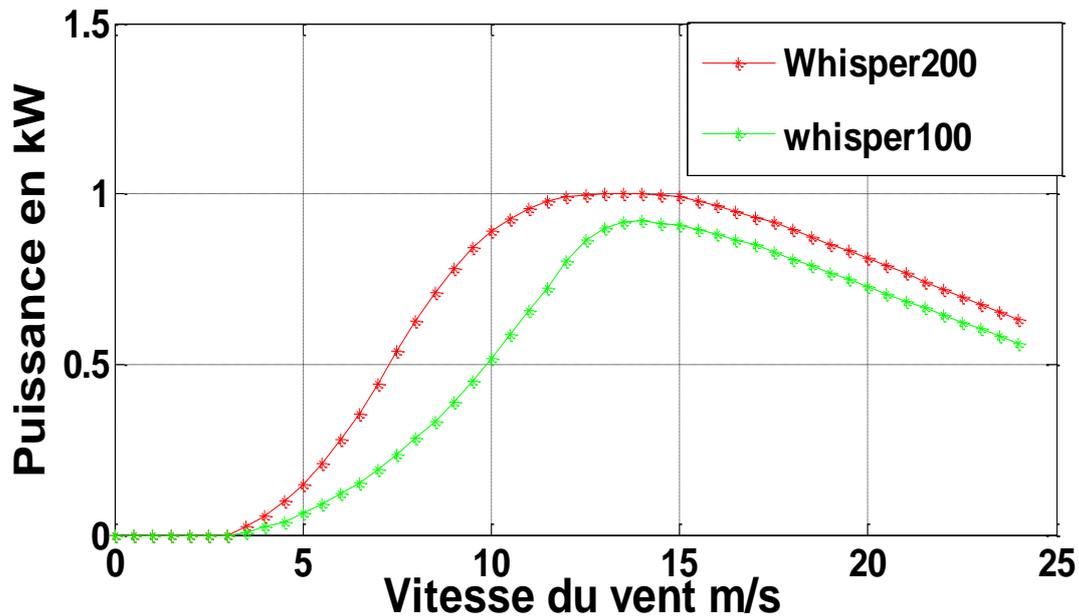


Figure III.1 : courbes caractéristique des aérogénérateurs Whisper100 et Whisper200.

Ainsi, en se basant sur les puissances $p(v)$ données par le concepteur des deux aérogénérateurs Whisper100 (annexe 1) et Whisper200 (annexe 2), nous avons élaboré un rapprochement de ces dernières par régression représenté par les équations suivantes :

$$P(v) = n(1).v^7 + n(2).v^6 + n(3).v^5 + n(4).v^4 + n(5).v^3 + n(6).v^2 + n(7).v + n(8) \quad (\text{III.3})$$

$$P(v) = s(1).v^{12} + s(2).v^{11} + s(3).v^{10} + s(4).v^9 + s(5).v^8 + s(6).v^7 + s(7).v^6 + s(8).v^5 + s(9).v^4 + s(10).v^3 + s(11).v^2 + s(12).v + s(13) \quad (\text{III.4})$$

Les deux équations III.3 et III.4 représentent respectivement les modèles mathématiques de la puissance des deux aérogénérateurs Whisper200 et Whisper100 où $n(1,2,3,4,5,6,7,8,9)$ et $s(1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13)$ sont les constantes de régression des deux polynômes et v est la vitesse du vent.

Les valeurs de ces paramètres des deux éoliennes sont résumées dans les tableaux III.1 et III.2.

Tableaux III.1 et III.2 : Les constantes de régression de la Whisper100 et la Whisper200 utilisées dans la présente étude.

Type	Whisper200
$n(1)$	5,46735028285135e-08
$n(2)$	-4,94611691387940e-06
$n(3)$	0,000175521670282990
$n(4)$	-0,00302929696066370
$n(5)$	0,0249659522999750
$n(6)$	-0,0771734343443175
$n(7)$	0,0779619684830266
$n(8)$	-0,0108696154680760

Type	Whisper100
$s(1)$	1.376274584815030e-12
$s(2)$	-2,09599075124903e-10
$s(3)$	1,39314265759912e-08
$s(4)$	-5,29910719764705e-07
$s(5)$	1,27113167042640e-05
$s(6)$	-0,000199865315300149
$s(7)$	0,00207591865864019
$s(8)$	-0,0140255294442270
$s(9)$	0,0591600476922587
$s(10)$	-0,143383470465817
$s(11)$	0,174284175062742
$s(12)$	-0,0790081926815860
$s(13)$	0,00281174657572066

III.2 MODELISATION DU SYSTEME DE STOCKAGE PAR INTERPOLATION

Pour modéliser notre système de stockage, nous avons eu recours à la même méthode d’approche précédente. Ainsi, nous utiliserons la courbe réelle du constructeur d’état de charge de deux batteries (annexe 3) en série auxquels, nous appliquerons une méthode d’interpolation pour les modéliser.

La figure III.2 représente la courbe réelle d’état de charge de deux batteries en fonction de la tension, tracé moyennant le logiciel MATLAB à partir des valeurs données par le concepteur.

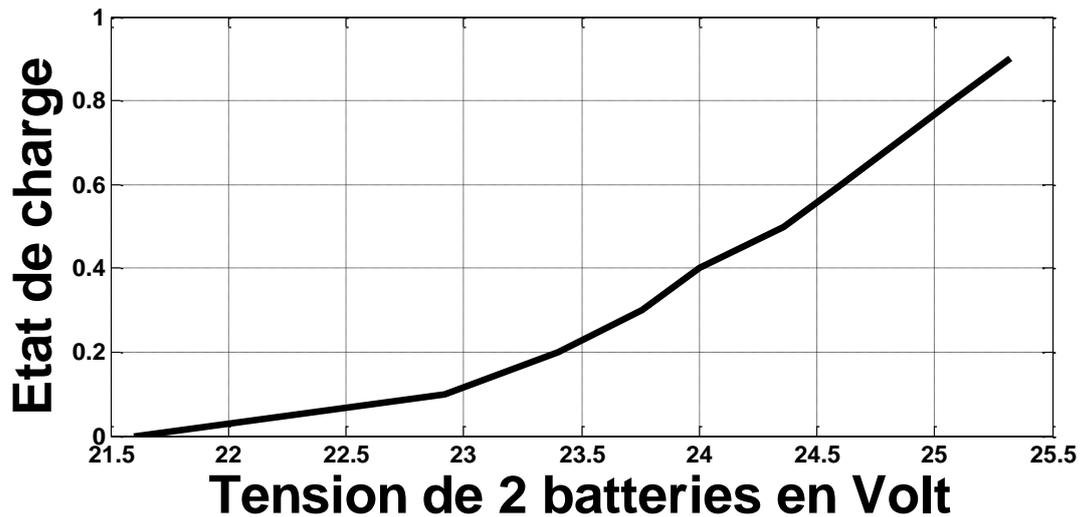


Figure III.2: Courbe caractéristique d'Etat de charge en fonction de la tension.

Ainsi, en se basant sur l'Etat de charge $Soc(V)$ donné par le concepteur, nous avons élaboré un rapprochement de ce dernier par régression représenté par le polynôme suivant :

$$Soc(V) = t(1).V^3 + t(2).V^2 + t(3).V + t(4) \quad (\text{III.5})$$

L'équation III.5 représente le modèle mathématique de l'état de charge des batteries ou $t(1), t(2), t(3), t(4)$ sont les constantes de régression du polynôme et V la tension en Volt.

Les valeurs de ces paramètres sont résumées dans le tableau III.3.

Tableau III.3 : Les constantes de régression du polynôme utilisée dans la présente étude.

Constantes	$t(1)$	$t(2)$	$t(3)$	$t(4)$
	0.0071839	0.5721530	14.7166590894	123.334201379

III.3 CHOIX DU REGULATEUR

Les éoliennes situées en site isolé utilisent un système de stockage pour emmagasiner l'énergie produite. Le régulateur de charge, appelé aussi contrôleur de charge, protège les batteries de surcharges ou de décharges profondes.

La variabilité du vent entraîne une variabilité du courant produit. Les turbulences créent des variations brutales. Les éoliennes couplées à un système de stockage doivent être équipées d'un régulateur de charge. Celui-ci permet :

- D'éviter les surcharges.
- D'éviter les décharges profondes.
- De réguler la charge de la batterie.
- De protéger le générateur (l'éolienne).

L'objectif du régulateur est donc de protéger la batterie pour lui assurer une meilleure durée de vie.

Ainsi, le choix du régulateur est primordial dans un système de production d'électricité, nous nous baserons sur les paramètres suivants pour le choisir :

- **La puissance nominale :**

Selon la puissance maximale que l'onduleur doit délivrer. Si on considère que le rendement de celui-ci est de 80%, alors la puissance appelée P_u sera de $P_{max} \times 80\%$. Donc la puissance nominale du régulateur sera égale à :

$$P_{\eta_{rég}} = \frac{P_u}{\eta_{rég}} \quad (\text{III. 6})$$

Avec: $P_{\eta_{rég}}$ et $\eta_{rég}$: sont respectivement la puissance nominale du régulateur et son rendement.

- **Tension nominale :**

La tension nominale du régulateur est conditionnée par la tension de service du convertisseur. Afin de minimiser le courant de consommation, et réduire la capacité de la batterie nous avons opté pour une tension de service de 24V. De là, la tension nominale du régulateur sera donc de 24V.

III.4 CHOIX DE L'ONDULEUR

Le convertisseur ou l'onduleur a pour rôle de convertir le courant continu du générateur éolien et des batteries, à un courant alternatif qui peut ensuite être utilisé ou réinjecté sur le réseau de distribution électrique.

III.4.1 DETERMINATION DE LA PUISSANCE DE L'ONDULEUR

Connaissant que notre installation utilise des appareils fonctionnant en courant alternatif (AC), il est alors nécessaire de convertir le courant continu stocké dans les batteries, en courant alternatif compatible et utilisable par ces appareils. Dès que le nombre d'appareils devient important, il est avantageux de choisir un onduleur performant, de façon à ce qu'il assure les meilleures conditions de qualité et sécurité aux appareils, donc il faut suivre les paramètres suivants pour un choix judicieux :

- **Sa puissance nominale :**

Le choix de l'onduleur (annexe4) doit être surdimensionné par rapport à la consommation de notre charge. Ainsi, Il faut connaître la puissance totale nécessaire au fonctionnement des appareils utilisant le courant alternatif (charge CA) pour pouvoir choisir sa taille et sa puissance nominale.

De ce fait afin d'éviter la surcharge de l'onduleur, il est recommandé d'ajouter au moins 30% au pic de puissance journalier de la charge demandée. Le pic de puissance du profil de notre charge est égal à : $P_{max} = 0.525 \text{ kW}$. Ainsi, la puissance nominale de l'onduleur doit être égale à $P_{nominale} = 0.525 + (0.525 \times 30) / 100 = 0.6793 \text{ kW} \approx 0.7 \text{ kW}$.

- **Puissance maximale ou puissance crête :**

Un courant important est exigé lors du démarrage de la majorité des appareils équipés d'un moteur tel que les réfrigérateurs et les outils électriques, équivalent à une puissance très élevée, appelée aussi puissance crête. L'onduleur doit pouvoir supporter cette puissance pendant ce court instant lors du démarrage.

- **Tension d'entrée :**

Choisir une tension d'entrée en courant continu pouvant supporter la tension de la batterie. Cette tension correspond à la tension de la source d'alimentation.

- **Tension de sortie :**

Elle doit correspondre à la tension des appareils qui seront utilisés (220/230 Volts alternatif) et doit être réglée pour rester stable quel que soit le niveau de tension dans la batterie (tant que la batterie reste dans une plage de tension acceptable).

- **Rendement :**

Le rendement s'exprime en % et correspond au rapport entre la puissance utile et la puissance absorbée du convertisseur. Plus le rendement est élevé moins les pertes seront importantes et plus l'appareil sera considéré comme performant.

III.5 CHOIX DU GROUPE ELECTROGENE

Le choix de la puissance du groupe électrogène dépend de la puissance du système, du pic journalier de la consommation et des appareils utilisés.

La puissance nominale du groupe électrogène doit être supérieure à la puissance moyenne de la consommation journalière, afin de ne pas entraîner une surcharge à l'appareil et son endommagement irréversible. D'un autre côté, le choix surdimensionné conduit à une surconsommation de carburant par rapport aux besoins.

Ainsi, pour notre cas d'étude, nous avons choisi un groupe électrogène de type (AC) d'une puissance nominale de 1kW et une durée de vie estimée à 15000 heures. Par ailleurs, rappelons que la puissance fournie par le groupe diesel est proportionnelle à la puissance nominale.

Nous présentons sur la figure III.3 les caractéristiques technico-économiques du groupe diesel choisi.

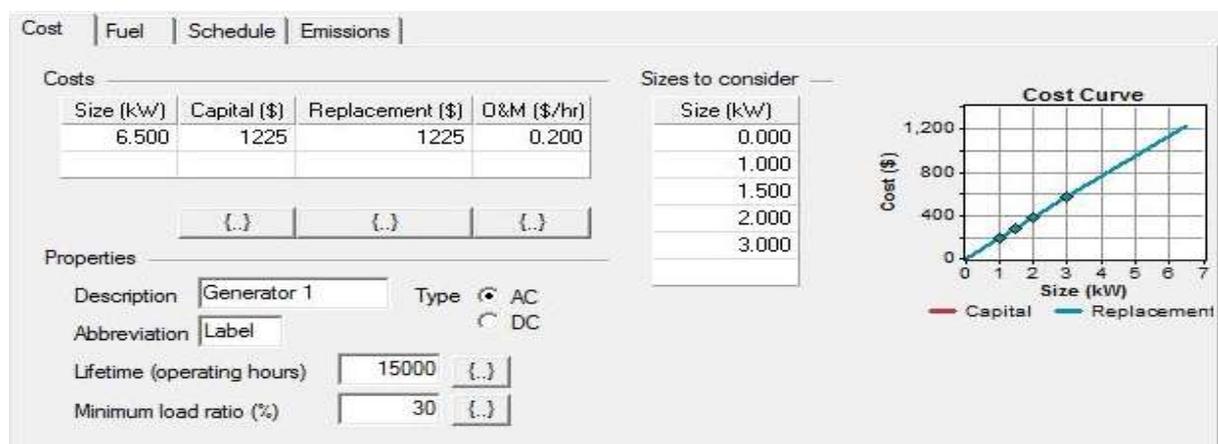


Figure III.3 : Caractéristiques technico-économiques du groupe diesel choisi.

D'après la table des coûts de la figure III.3, nous remarquons que le choix du groupe dépend de sa taille (en kW), son coût à l'achat, son coût en remplacement et ses coûts d'opération et maintenance.

Les coûts d'opération et maintenance comprennent ceux de l'opérateur plus à 5% de l'investissement par an. Ils ne comprennent pas ceux liés à la consommation de carburant.

III.6 CONFIGURATION DU SYSTEME ETUDIE

Dans le cadre de notre étude, nous avons choisi une architecture combinant un groupe électrogène avec une source d'énergie éolienne associé à un système de stockage. Cette combinaison a été choisie afin d'atténuer le caractère aléatoire du gisement éolien.

La figure III.4 montre un synoptique du système étudié.

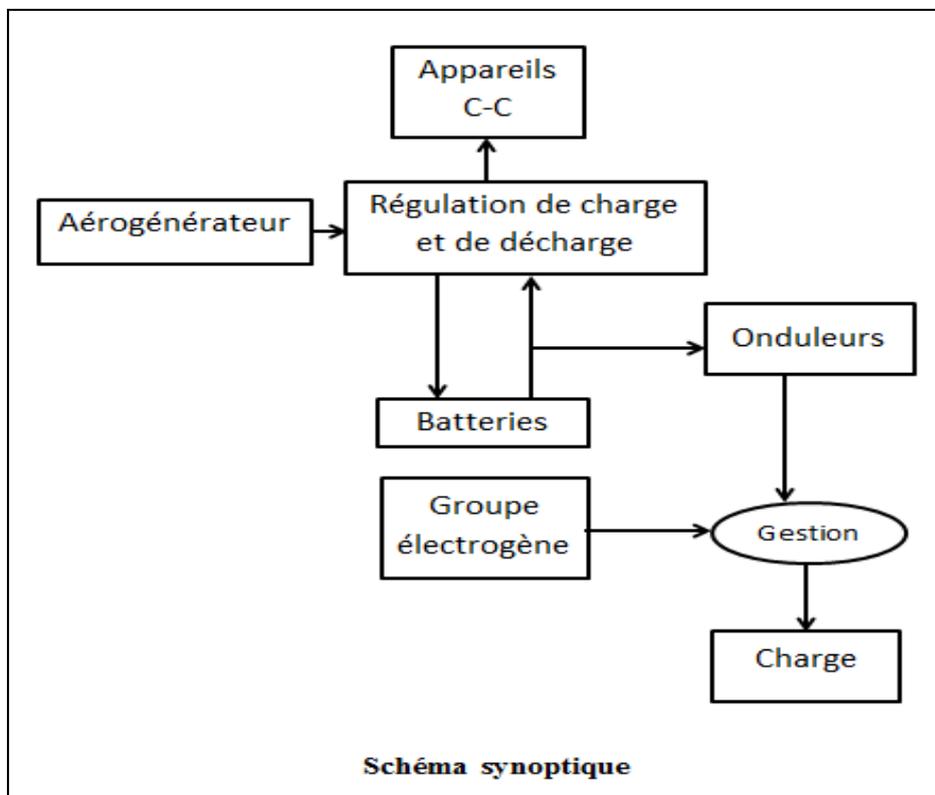


Figure III.4 : Schéma synoptique du système étudié.

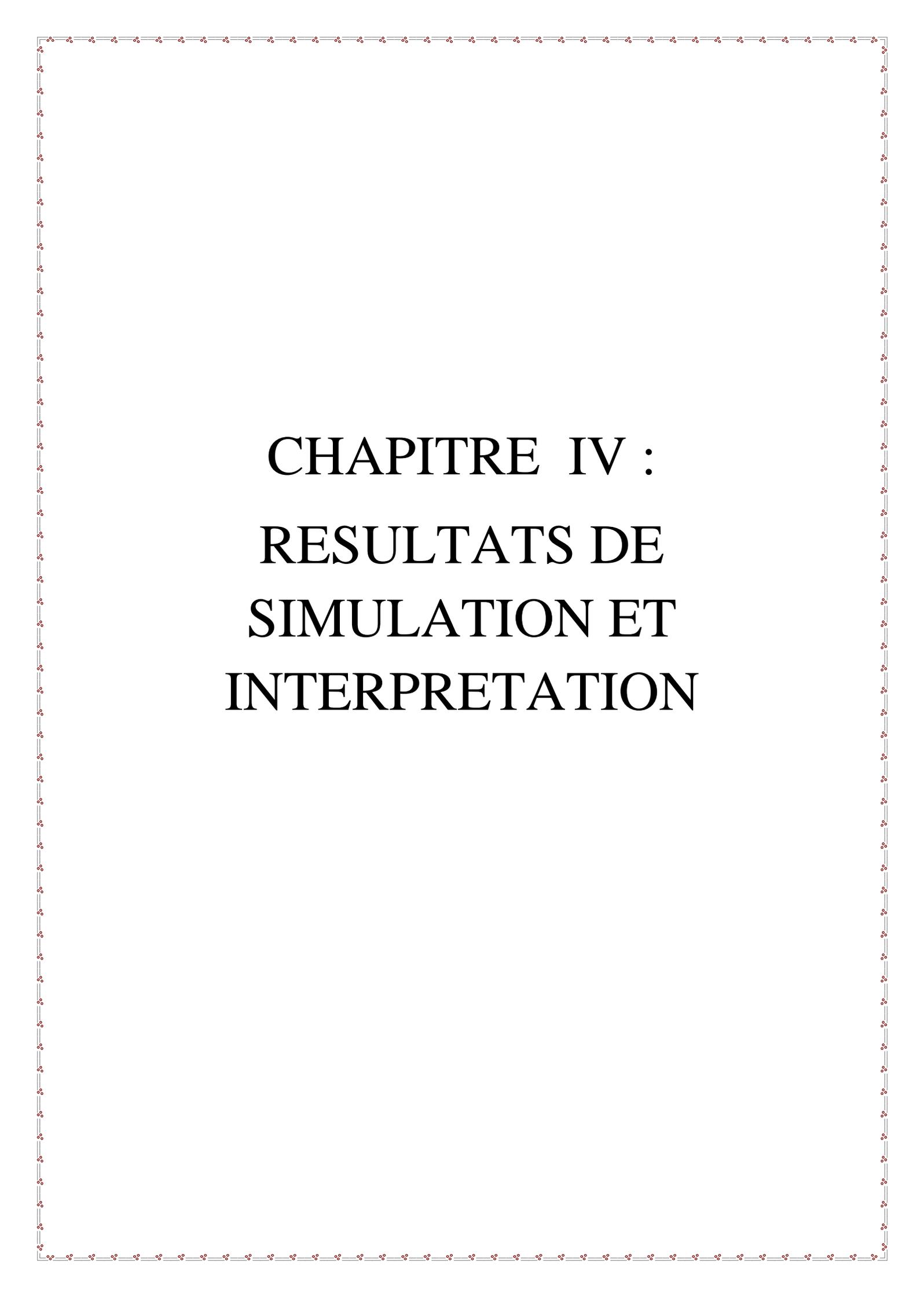
Le système se compose principalement des périphériques suivants :

- Un aérogénérateur.
- Un groupe électrogène.

- Une charge CA.
- Un dispositif de stockage (batteries)
- Un onduleur.

CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons modélisé où choisi chaque composant du système hybride éolien-diesel-batteries. Ainsi, la modélisation nous a permis de représenter le comportement du système étudié sous forme d'équations mathématiques afin d'évaluer la caractéristique de chaque élément constituant notre installation.



CHAPITRE IV : RESULTATS DE SIMULATION ET INTERPRETATION

INTRODUCTION

Après avoir modélisé et choisi toutes les parties constituant notre système hybride, nous présentons dans ce chapitre le site de l'implantation, ainsi que ces coordonnées, les caractéristiques de notre charge, l'étude de la faisabilité ainsi que la gestion adoptée pour ce système.

IV.1 PRESENTATION DES DONNEES DU SITE

La wilaya de Djelfa est une wilaya algérienne située dans les hauts-plateaux, à 300 km au sud d'Alger et s'étend sur une superficie totale de 32.280,41 km², représentant 1,36 % de la superficie totale du pays. Sa population est estimée à 272 991 habitants en 2010 [44].

Elle est limitée par :

- Au Nord: les wilayas de Tissemsilt et Médéa.
- A l'Est : les wilayas de M'Sila et Biskra .
- A l'Ouest : les wilayas de Laghouat et Tiaret .
- Au Sud : les wilayas de Ourgla et Ghardaia .

Coordonnées du site [45] :

- Latitude : 34.3333°.
- Longitude : 3.66667°.
- Altitude : 1138m .



FigureIV.1 : Position géographique du site de Djelfa.

IV.2 CARACTERISTIQUE DE LA CHARGE

Le dimensionnement d'un système de production électrique dépend essentiellement du profil de la consommation en matière d'énergie à satisfaire. Ainsi, dans le cadre de notre travail nous avons choisi une charge de type AC fonctionnant durant toute la journée.

La charge choisie inclue l'éclairage et les équipements électriques (réfrigérateurs, téléviseurs...etc). Comme application sur le site choisi nous avons considéré une maison de type F3 (cas réel), avec une consommation journalière de 3.52 kWh/jour et un pic de 0.525 kW.

Ainsi, nous donnons sur la figure IV.2 le profil journalier de la charge considérée:

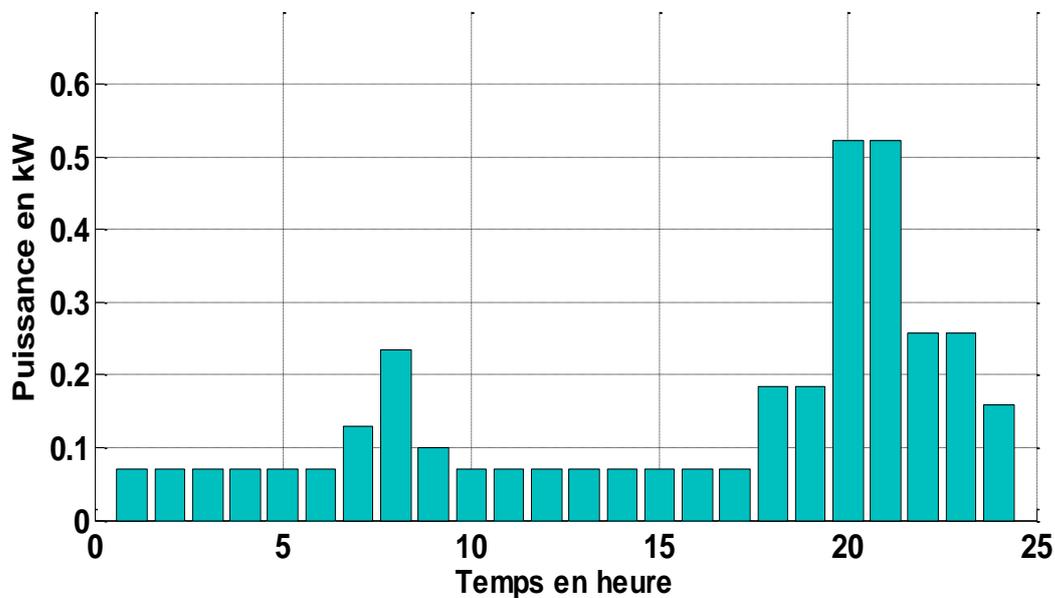


Figure IV.2 : Profil journalier de la charge.

Nous remarquons d'après la figure ci-dessus que le profil de consommation journalière évolue généralement de la même façon sur ces périodes de la journée 8h, de 18h à 19h et de 22h à 24h, telle qu'il y'a un pic entre 20 h et 21 h. Nous remarquons aussi que la consommation minimale d'énergie a lieu durant ces périodes : de 0h à 7h et de 9h à 17h.

IV.3 VALIDATION DU MODELE DE LA PUISSANCE DEVELOPPEE

Afin de développer un modèle de la puissance que peut fournir un aérogénérateur donné, nous avons fait appel à la courbe caractéristique $p=f(v)$ donnée par le concepteur comme ça

était expliqué dans le paragraphe III.2.3 du chapitre précédent tel que ces modèles nous ont permis de faire ressortir des équations avec 99.00% et 98.86 % de précision, respectivement pour le Whisper100 et Whisper200. Ainsi, Les deux courbes données par le concepteur et relatives aux aérogénérateurs Whisper100 et Whisper200 ainsi que les modèles développés ont été tracé sur les deux figures IV.3 et IV.4 sur lesquelles nous constatons effectivement une bonne concordance entre les valeurs du concepteur et les valeurs calculées.

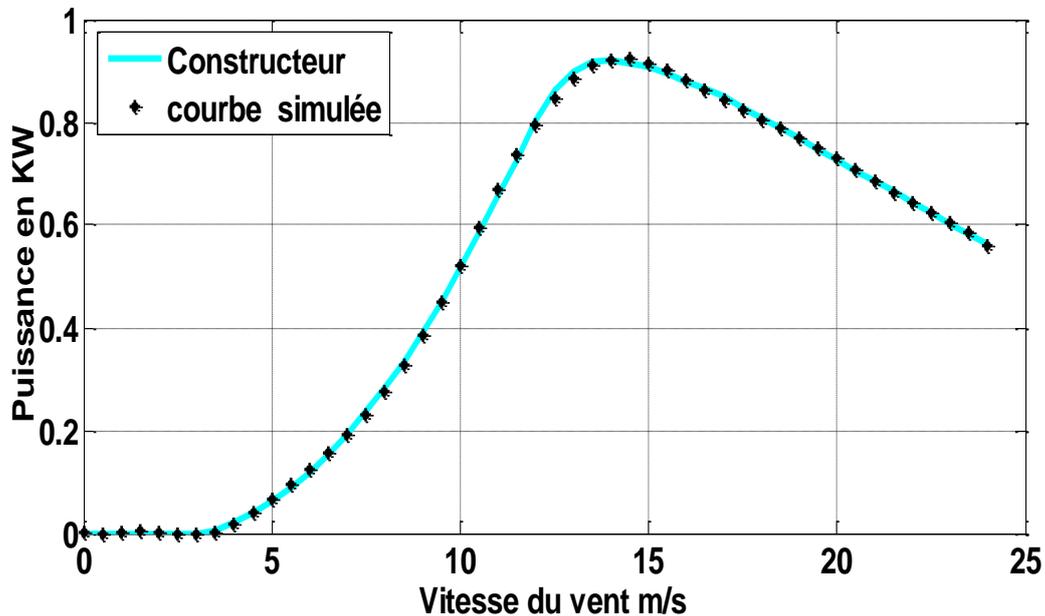


Figure IV.3 : Puissance produite par l'aérogénérateur Whisper100.

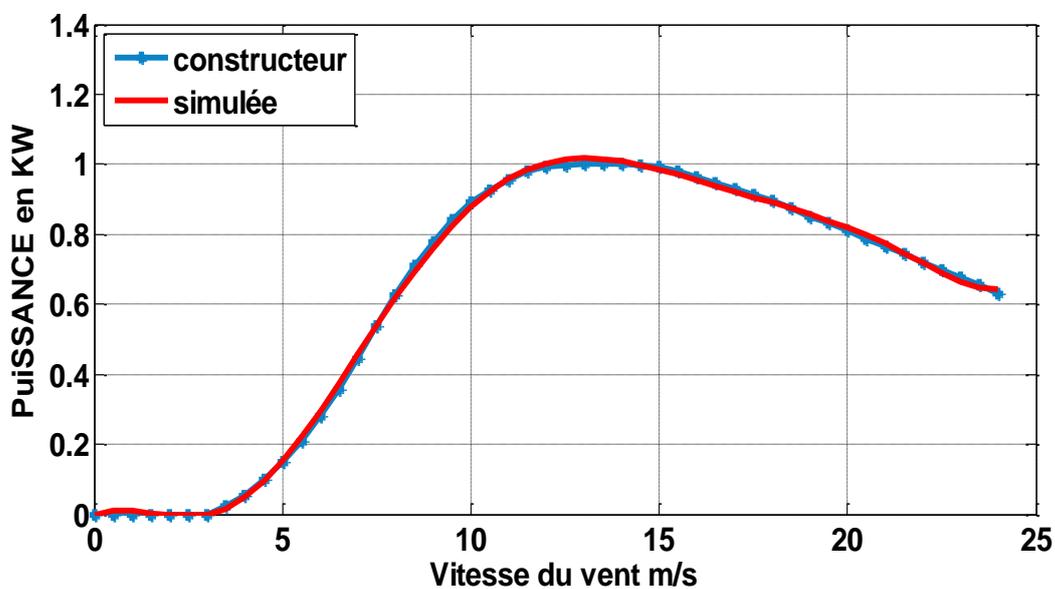


Figure IV.4 : Puissance produite par l'aérogénérateur Whisper200.

IV.4 CARACTERISTIQUES TEMPORELLE DES VITESSES DU VENT SUR LE SITE DE DJELFA

IV.4.1 MESURE HORAIRE DE LA VITESSE

La figure ci-dessous représente le profil des vitesses du vent à la hauteur de 10 m données par météonorme7.

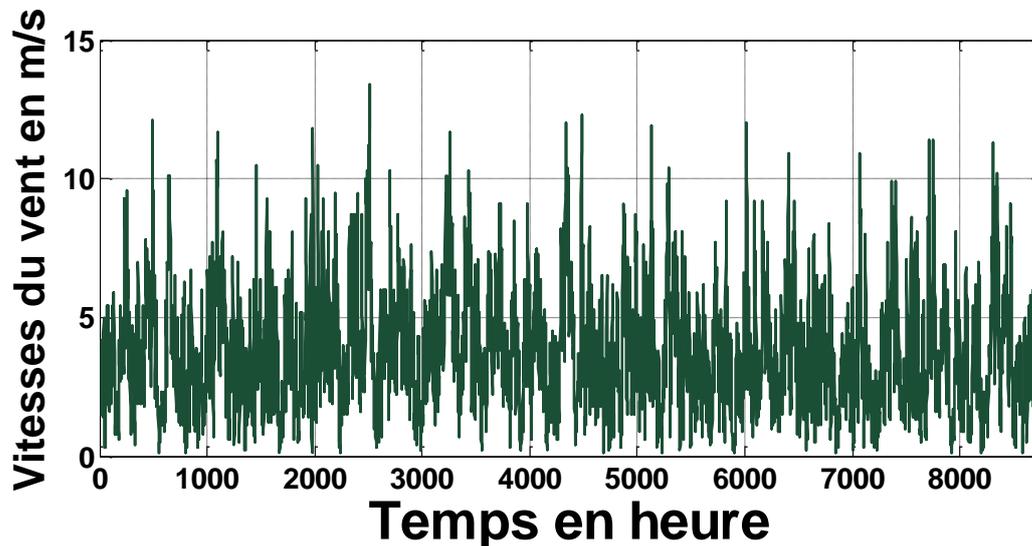


Figure IV.5 : Mesures horaire de la vitesse du vent enregistrées à Djelfa.

Nous remarquons que la variation des vitesses du vent est aléatoire cela est dû au fait que les vents varient différemment selon la journée l'année et la saison.

IV.5 RECONSTITUTION DU POTENTIEL EOLIEN EN DIFFERENTES HAUTEURS A PARTIR DES MESURES ENREGISTREES A 10 m

IV.5.1 EXTRAPOLATION DE LA VITESSE DU VENT DE 10 m A 15.2, 19.8, 29.4 m

Afin d'établir un lien de corrélation entre la vitesse du vent et la hauteur du mat, nous avons représenté sur la figure IV.6 les vitesses du vent aux différentes hauteurs du mat (10,15.2, 19.8 et 29.4 m) reconstruit à partir de l'équation III.1 sachant que ces hauteurs correspondent à la hauteur du moyeu de l'aérogénérateur considéré.

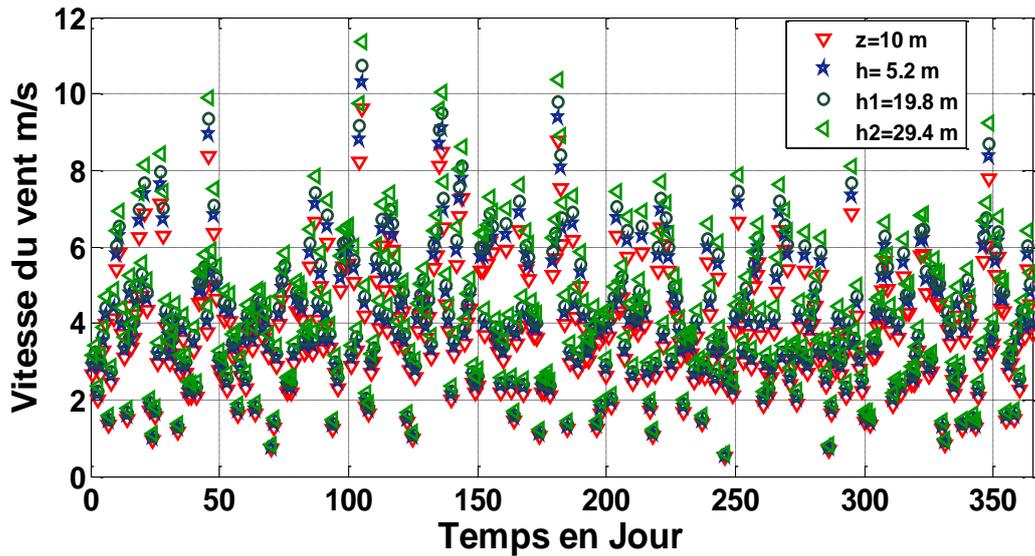


Figure IV.6 : Extrapolation verticale de la vitesse du vent pour différentes hauteurs du mat.

IV.5.2 INTERPRETATION DES RESULTATS

Comme paramètres d'entrées, les vitesses du vent mesurées durant une année à une hauteur de 10 m relatives au site de Djelfa. Ces dernières sont stockées dans des fichiers de MATLAB, puis extrapolées à 15.2 19.8 et 29.4 m moyennant l'équation III.1. Nous donnons sur la figure ci-dessus l'évolution annuelle des valeurs des vitesses du vent mesuré à 10 m ainsi que celles calculées à partir de l'équation III.1 pour des hauteurs de (15.2, 19.8 et 29.4 m). Pour mieux interpréter les résultats obtenus nous avons pris une portion de 0 à 12 jours.

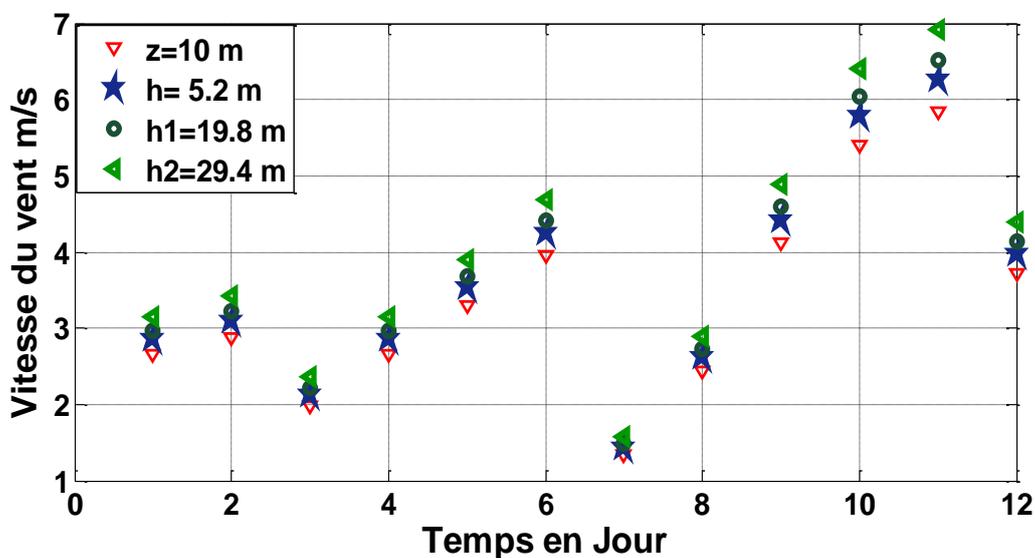


Figure IV.7 : Extrapolation de la vitesse du vent aux différentes hauteurs du mat durant 12 jours.

D'après la figure IV.7 nous constatons que les grandeurs des vitesses du vent évoluent dans le même sens que la hauteur du mat. ce qui nous permet de déduire la hauteur optimale et adéquate pour l'installation du mat de notre aérogénérateur.

IV.6 VALIDATION DU MODELE DEVELOPPE DE LA BATTERIE

Dans le chapitre précédent, nous avons développé un modèle mathématique d'état de charge de la batterie représenté par l'équation III.5 tel que ce modèle nous a permis de faire ressortir une équation avec 99.00 % de précision.

Ainsi, sur la figure IV.8 nous avons tracé simultanément la courbe d'état de charge donnée par le concepteur ainsi que le modèle développé.

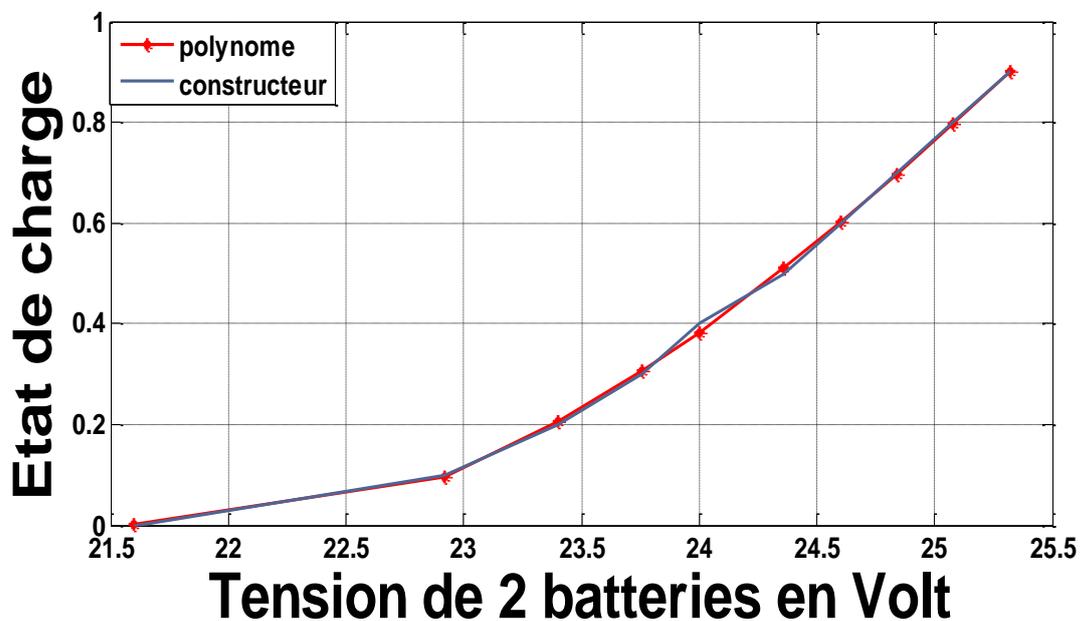


Figure IV. 8 : état de charge de la batterie.

Suivant cette dernière nous constatons effectivement une bonne concordance entre les valeurs du concepteur et celles calculées.

IV.7 ETUDE DE FAISABILITE DU SYSTEME

Pour l'étude de la faisabilité de notre système hybride : nous avons utilisé le logiciel HOMER.

IV.7.1 PRESENTATION DU LOGICIEL HOMER

La durée de vie, le rendement et les performances de tout système électrique hybride dépendent de sa conception, c'est -à -dire le dimensionnement des composants du système.

Pour ce fait nous avons eu recours au logiciel HOMER qui est destiné à la simulation et l'optimisation de systèmes de génération Électrique distribuée. Ce logiciel a été développé en 1993 par le National Renewable Energy Laboratory (NREL-USA) pour les programmes d'électrification rurale. Le modèle doit être renseigné des ressources disponibles, des options technologiques, des coûts et des charges à respecter par le système. Plusieurs composants peuvent être modélisés : les champs photovoltaïques, des éoliennes, des générateurs Diesel, des batteries, etc. Les éléments clés du modèle sont les deux bus AC et DC auxquels chaque convertisseur doit être lié. Les charges peuvent être saisies en tant que profil de charge quotidien ou importées d'un fichier de données horaires. En tout état de cause, les valeurs horaires des charges doivent être définies pour chacune des 8760 heures d'une année.

Pour une simulation d'une installation par le logiciel HOMER, il faut d'abord définir les éléments de cette dernière, en utilisant les éléments définies dans la bibliothèque du logiciel (éoliennes, hydrauliques, les batteries, biomasse, turbines ...). Et cela en appuyant sur la commande Add/Remove.

Si un composant donné ne figure pas dans cette bibliothèque, il faut le rajouter en introduisant toutes ces caractéristiques techniques ainsi que son coût. Il faut aussi spécifier le nombre de chaque composant dans l'installation à simuler. Il affiche ensuite la liste des configurations du système trié par le coût actuel net (qui combine le coût en capital-annualisé par l'amortissement du composant au cours de sa durée de vie en utilisant les taux d'actualisation réelle et celui de remplacement, fonctionnement et entretien).

IV.7.2 CONSTRUCTION DU SCHEMA DE CONCEPTION DU SYSTEME HYBRIDE

Sur le logiciel HOMER, nous avons défini chaque élément de notre installation, le potentiel éolien disponible, la source conventionnelle ainsi que la charge à satisfaire.

D'autres données sont notamment nécessaires tel que :

- Les coordonnées du site (longitude, latitude,).
- La durée de vie du projet.
- La variation de la vitesse avec la hauteur ainsi que la rugosité du terrain.

- Les durées de vie des composants, ainsi que leurs coûts.

La figure IV.9 représente le diagramme relatif au logiciel HOMER du système hybride.

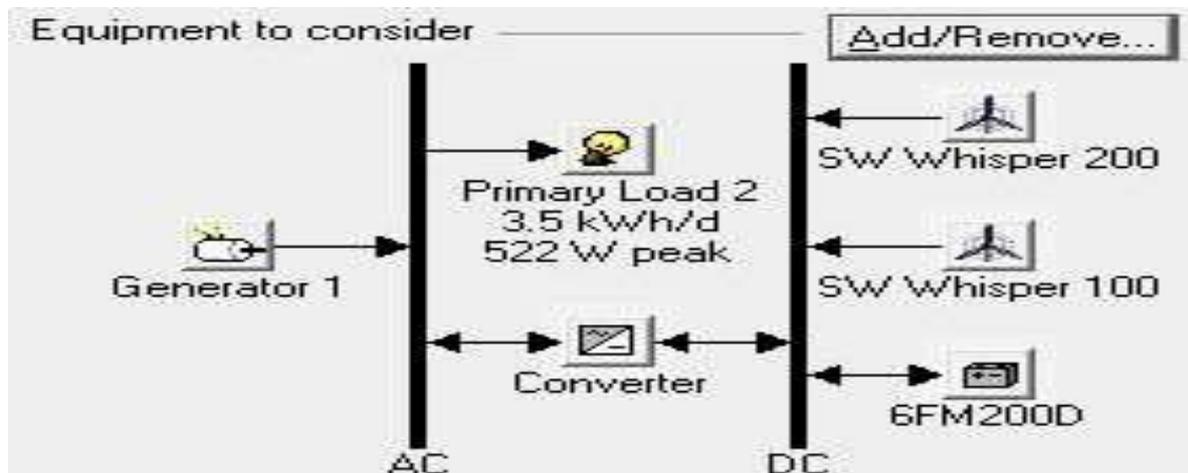


Figure IV.9 : Montage électrique du système hybride.

IV.7.3 VALIDATION DU MODELE DE LA PUISSANCE DEVELOPPEE PAR HOMER

Avant d'entamer l'étude de faisabilité de notre système, nous avons commencé par vérifier la validité des modèles de puissance développés dans le chapitre précédent. Pour ce fait, nous avons procédé de cette manière :

Comme paramètres d'entrées, les vitesses du vent mesurées durant une année à une hauteur de 10 m relatives au site de Djelfa ainsi que ces coordonnées géographiques. Ces vitesses du vent ont été stockées dans des fichiers du logiciel HOMER, puis extrapolées à une hauteur de 29.4m moyennant ce logiciel, en suite de ces nouvelles valeurs de vitesse HOMER à calculer les puissances des deux aérogénérateurs, et enfin nous avons enregistré les valeurs de ces dernières dans des fichiers de MATLAB. D'autre part, sur le logiciel MATLAB nous avons calculé les puissances des deux aérogénérateurs Whisper100 et Whisper200 moyennant les deux équations III.3 et III.4 à partir des valeurs de la vitesse extrapolée auparavant à 29.4m suivant l'équation III.1.

Nous donnons sur les figures IV.10 et IV.11 le traçage simultané des résultats de l'évolution annuelle de la puissance des deux aérogénérateurs Whisper100 et Whisper200 à une hauteur de 29.4 m obtenus par les deux logiciels HOMER et MATLAB.

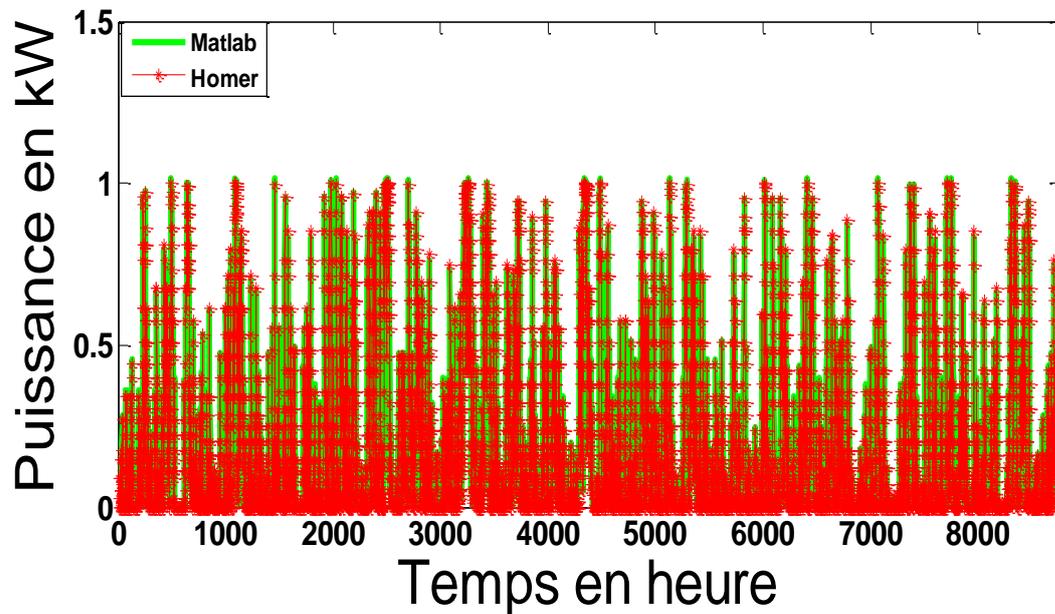


Figure IV.10 : l'évolution annuelle de puissance de l'aérogénérateur Whisper200.

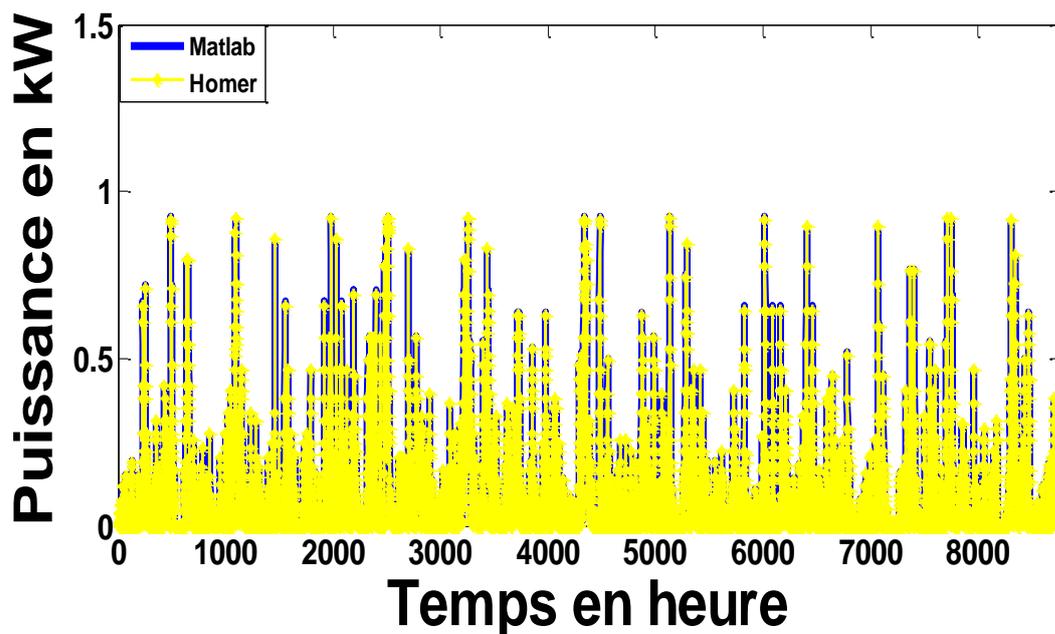


Figure IV.11 : l'évolution annuelle de puissance de l'aérogénérateur Whisper100.

Pour mieux interpréter les résultats obtenus précédemment, nous avons pris une portion de chaque figure IV.10 et IV.11 d'une fourchette de 50 à 100 heures.

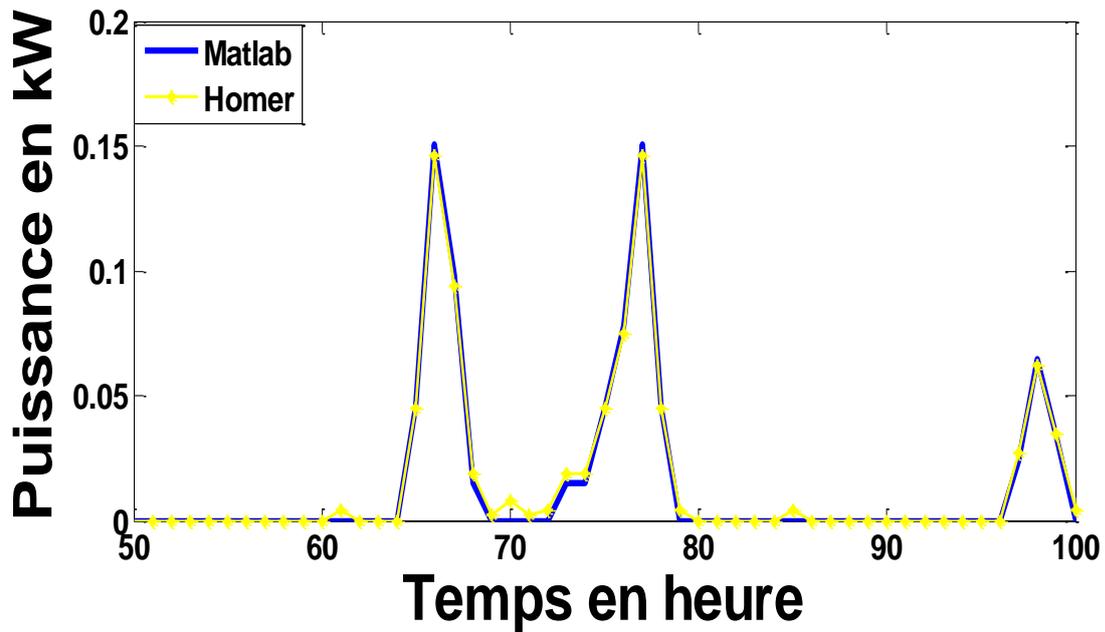


Figure IV.12: l'évolution annuelle de puissance de l'aérogénérateur Whisper100.

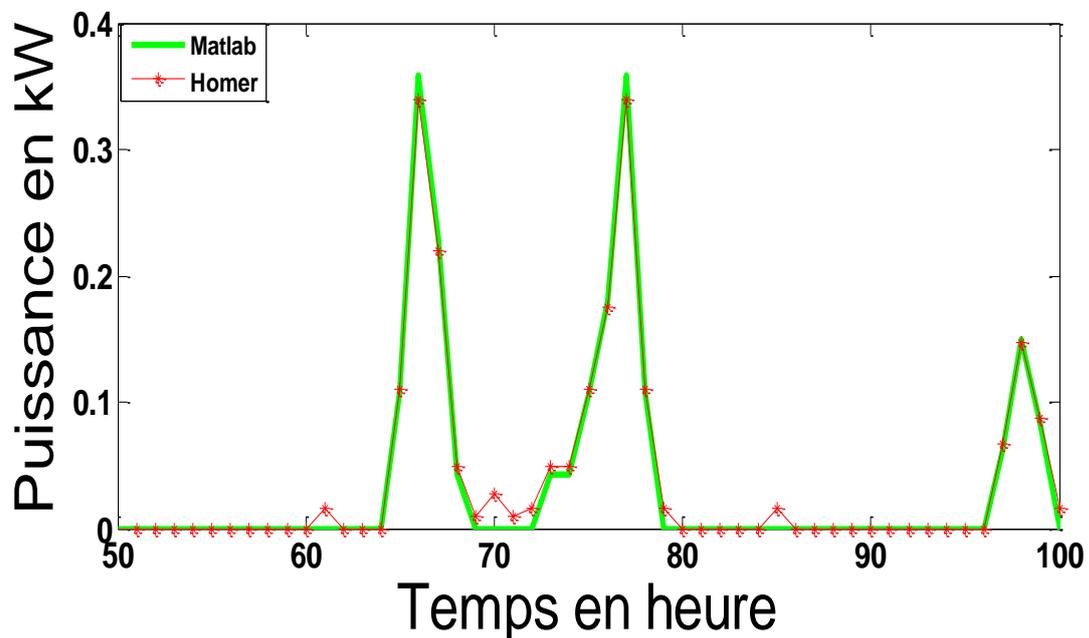


Figure IV.13 : l'évolution annuelle de puissance de l'aérogénérateur Whisper200.

Ainsi, suivant les figures IV.12 et IV.13, nous constatons que les valeurs de puissance obtenus par le logiciel Homer ainsi que celles obtenus par MATLAB sont superposées avec une précision de 98% et 99 %, respectivement pour les deux aérogénérateurs Whisper100 et Whisper200.

IV.7.4 CONFIGURATION DU SYSTEME HYBRIDE EN FONCTION DU COUT NET ACTUEL

A partir de la simulation, HOMER permet de visualiser le comportement heure par heure de chaque équipement de l'installation pour toutes les configurations simulées. De ces résultats, HOMER présente une analyse financière sur la durée du projet (techniquement et économiquement) et classe les différentes configurations par ordre croissant du coût net actuel (NPC).

Pour chacune de ses solutions possibles, HOMER fournit tous les paramètres de fonctionnement des composants de l'installation (les émissions de gaz, la fraction de l'énergie éolienne, l'énergie totale produite etc.) et propose plusieurs configurations classées de la plus performante à la moins performante, par exemple dans notre cas il a considéré les solutions suivantes :

	W200	W100	Label (kW)	6FM200D	Conv. (kW)	Initial Capital	Operating Cost (\$/yr)	Total NPC	COE (\$/kWh)	Ren. Frac.	Capacity Shortage	Diesel (L)	Label (hrs)
	1		1.0	30	0.7	\$ 6,649	811	\$ 17,013	1.033	0.90	0.00	57	182
		1	1.0		0.7	\$ 6,286	2,100	\$ 33,130	2.011	0.22	0.00	1,388	8,760

Figure IV.14: Configurations proposé par le logiciel HOMER.

La figure ci-dessus permet de visualiser la liste des configurations les plus faisables pour ce système. Elles sont classées (de haut en bas) de la plus rentable à la moins rentable. Le rapport coût-efficacité d'une configuration d'un système est basé sur le coût net actuel (NPC). Cependant, la configuration composée de l'éolien/Diesel/batteries/convertisseur est la conception la plus optimale et la plus rentable.

Pour notre étude nous avons choisi une charge constituée d'une maison, l'énergie journalière de cette charge est de 3.5 kWh par jour dont le pic est de l'ordre de 0.522 kW.

D'après les résultats présentés sur la figure IV.14 la configuration la plus optimale permettant de couvrir la charge est comme suit :

Eolienne	1 SW Whisper200
Générateur diesel	1 kW
Batteries	30 unités de 12 v
Convertisseur	0.7 kW

Nous présentons ci-dessous les différents détails techniques et environnementaux de la configuration optimale donnés par le logiciel HOMER.

IV.7.5 PRODUCTION ET CONSOMMATION D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

La production et la consommation d'énergie sur une année de la configuration précédente sont détaillées sur les tableaux IV.1 et IV.2.

Tableau IV.1: Énergie annuelle produite.

Composant	Production (kWh/an)	Fraction
éolienne (Whisper200)	1575	90 %
Générateur diesel	169	10 %
Total	1744	100 %

Les systèmes de production participent suivant les fractions décrites sur le tableau IV.1.

Tableau IV.2 : Énergie annuelle consommée.

Charge	Consommation (kWh/an)	Fraction
Charge CA	1289	100 %
Total	1289	100 %

Tableau IV.3 : caractéristique du système hybride.

Variable	Valeur
Excès d'énergie	118 kWh/an
Charge non satisfaite	0.000000149 kWh/an
Fraction renouvelable	90 %

Sur le tableau IV.1 sont présentées les quantités d'énergie électrique produite par le système hybride sur le site de Djelfa.

Ainsi, pour une charge spécifique de 3.52 kWh/Jour. Nous remarquons que 90% des besoins énergétique du site sont fournis par l'aérogénérateur et le reste est assuré par la source

d'énergie conventionnelle (générateur diesel).la fraction de 90% est logique, vue le potentiel éolien relatif au site de Djelfa.

Notons que 15% de la production de l'électricité est excédentaire, en d'autre terme un surplus d'énergie qui ne sera pas utilisé par le système. Nous augmenterons le nombre de batteries pour y'remédier à cela. Aussi la fraction de (90%) est une moyenne annuelle qui n'est pas constante sur toute l'année elle est liée principalement à la variabilité des ressources en énergie éolienne.

Nous donnons sur la figure IV.15 la puissance moyenne mensuelle produite par chaque source :

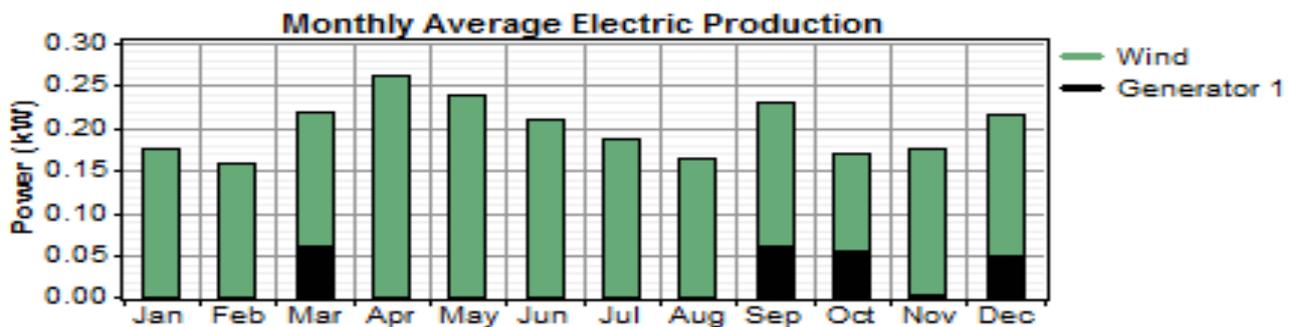


Figure IV.15 : Puissance moyenne mensuelle produite par chaque source.

IV.7.6 LE GENERATEUR EOLIEN WHISPER200

Le tableau ci-dessous résume tous les paramètres de fonctionnement du générateur éolien étudié.

Tableau IV.4: Paramètres de fonctionnement de l'aérogénérateur.

Variable	Valeur
Capacité totale	1 kW
Puissance moyenne	0.180 kW
Facteur de capacité	18 %
Puissance minimale	0.00 kW
Puissance maximale	1.00 kW
Heures de fonctionnement	5820 h/an
Pénétration éolienne	90 %

D'après les résultats, nous constatons que la Whisper200 fonctionne pratiquement pendant 74% de la totalité du nombre d'heures annuelle (8760h/an), elle est à l'arrêt pendant 120 jours

dans l'année (2940h/an), avec un facteur de capacité de 18%. Les périodes d'arrêt correspondent à de faibles vitesses du vent (inférieure à 3.6 m/s).

IV.7.7 GENERATEUR DIESEL

Dans le cas où le vent n'est pas assez fort pour entraîner l'éolienne c'est le groupe électrogène qui assure la production de puissance. Ainsi, il est appelé à fonctionner à n'importe quel moment de la journée d'une manière optimisée selon les besoins du site. Sa mise en marche est en fonction de la demande, la production du générateur et l'état de charge des batteries.

Les paramètres de fonctionnement sont donnés sur le tableau ci-dessous :

Tableau IV.5: Paramètres de fonctionnement du générateur diesel.

Quantité	Valeur
Heures de fonctionnement	182 h/an
Nombres de démarrage	4 débuts/an
Durée de vie	82.4 an
Facteur de capacité	1.92%
Puissance moyenne délivrée	0.926 kW
Puissance minimale délivrée	0.457 kW
Puissance maximale délivrée	1.00 kW
Consommation annuelle du carburant	56.7 l/an
Consommation spécifique du carburant	0.336 l/kWh
Efficacité électrique moyenne	30.2%

La figure ci-dessous illustre la production journalière du générateur durant toute l'année. La couleur noire représente les périodes à très faible production. La couleur rouge représente les pics. La production moyenne selon l'échelle est représentée par la couleur verte.

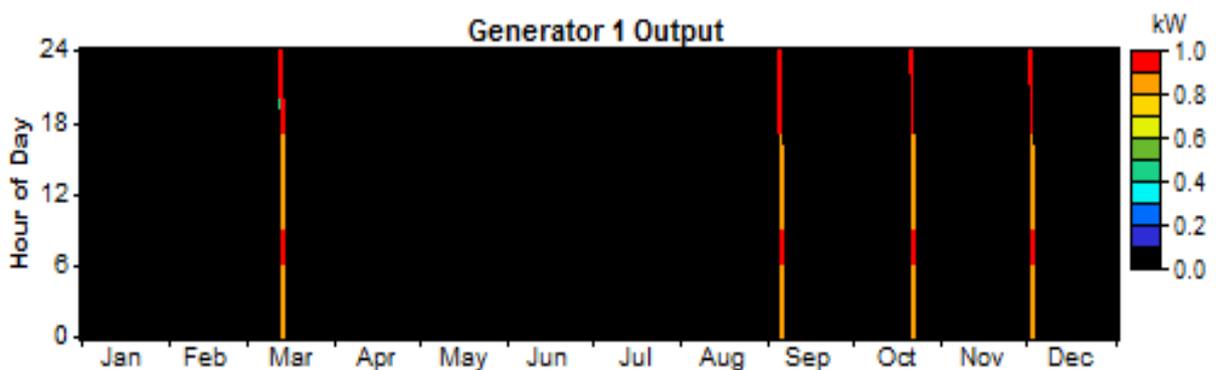


Figure IV.16 : Production journalière moyenne du groupe durant une année.

IV.7.8 CONVERTISSEUR

Le convertisseur choisi pour notre système comporte deux parties :

- Partie redresseur (entrée CA et sortie CC).
- Partie onduleur (entrée CC et sortie CA).

Le fonctionnement de l'onduleur se fait selon la demande de l'énergie stockée, l'étude de fonctionnement de ce dernier nous permet de prévoir les périodes de décharge des batteries. Le fonctionnement du redresseur est lié à l'état de charge des batteries, il est important d'analyser le fonctionnement du redresseur, car il nous permet de savoir les périodes de décharge. Nous présentons sur le tableau IV.6 l'analyse de chaque partie :

Tableau IV.6 : Paramètres de fonctionnement du convertisseur.

Quantité	Convertisseur	Redresseur
Capacité	0.70 kW	0.70 kW
Puissance moyenne fournie	0.14 kW	0.01 kW
Puissance minimale fournie	0.00 kW	0.00 kW
Puissance maximale fournie	0.52 kW	0.70 kW
Facteur de capacité	20.6%	2.0%
Heures de fonctionnement	8,579 h/an	181 h/an
énergie d'entrée	1,403 kWh/an	143 kWh/an
énergie de sortie	1,263 kWh/an	122 kWh/an
Pertes d'énergie	140 kWh/an	21 kWh/an

Nous constatons d'après les résultats du tableau IV.6 que tous les paramètres de fonctionnement de l'onduleur sont légèrement supérieurs par rapport au redresseur sauf l'énergie de sortie, car le redresseur fournit l'énergie nécessaire pour la recharge des batteries, par contre les pertes sont beaucoup plus importantes au niveau de l'onduleur.

IV.7.9 LES BATTERIES

Le décalage entre la demande et l'apport énergétique exige un stockage d'énergie, cependant le rôle des batteries est essentiellement pour mieux optimiser les paramètres de fonctionnement. L'excès de production par l'aérogénérateur est donc stocké dans les batteries, d'autre part on peut minimiser la consommation du combustible et les émissions des gaz à effets de serres.

Le tableau IV.7 présente les paramètres de fonctionnement des batteries.

Tableau IV.7 : paramètres de fonctionnement des batteries.

Quantité	Valeur
Energie d'entrée	1,003 kWh/an
énergie délivrée	827 kWh/an
Pertes d'énergie	149 kWh/an
Autonomie des batteries	294 h
Durée de vie	10.0 an
Capacité nominale	72 kWh

IV.7.10 LES EMISSIONS DES GAZ

Les émissions des gaz polluants proviennent des sources conventionnelles (générateur diesel) dans notre cas. Cependant parmi les objectifs de cette étude c'est de réduire ces émissions pour y remédier aux problèmes liés à la pollution atmosphérique. Nous présentons sur ce tableau les émissions annuelles des gaz de 4 configurations différentes proposé par le logiciel HOMER :

Tableau IV.8 : émissions des gaz de 4 configurations proposé par le logiciel HOMER.

Polluant	Emissions (kg/an)			
	Système 100% énergie Renouvelable (Whisper100)	Système 100% source conventionnelle (diesel).	Système hybride 90% énergie renouvelable (éolien Whisper200 – diesel –batteries)	Système hybride 22% énergie renouvelable (éolien Whisper100 – diesel – batteries)
Dioxyde de carbone	0	3,683	1,49	3,654
Monoxyde de carbone	0	9,09	0,369	9,02
Hydrocarbure non brûlé	0	1,01	0,0408	0,999
Particule	0	0,685	0,0278	0,68
Dioxyde de soufre	0	7,4	0,3	7,34
Oxydes de Nitrogène	0	81,1	3,29	80,5

Les résultats relatifs à l'effet de chacune des configurations sur l'environnement obtenus relatifs au site de Djelfa sont présentés sur les tableaux IV.8. Nous présentons sur ce dernier les principaux gaz nocifs pour l'environnement dont le CO_2 et le SO_2 . D'après les résultats, nous constatons que le système conventionnel est le plus défavorable pour l'environnement. En comparant et en analysant les 4 configurations, nous remarquons que le système 100% énergie renouvelable reste la solution la plus écologique pour l'environnement avec un taux de 0 % d'émissions de gaz polluants. Nous constatons aussi que les deux systèmes hybrides présentent un taux de réduction des gaz nocifs par rapport aux quantités produites par le système conventionnel.

IV.8 GESTION DU SYSTEME HYBRIDE

La stratégie de gestion d'énergie doit permettre au système autonome hybride de s'adapter aux variations météorologiques. Elle doit garantir la stabilité du système en tout temps.

IV.8.1 STRATEGIE DE GESTION

Au cours de son utilisation, le système de stockage (batteries) installé dans un réseau hybride autonome peut subir :

- Les surcharges dans le cas où le SOC est supérieur à 80%,
- Les décharges profondes pour une décroissance dans le cas où le SOC est au-dessous de 30%.
- De plus, l'alimentation de l'installation peut être interrompue en cas d'absence de l'énergie éolienne ou de décharge de la batterie.

En prenant en considération ces remarques, nous proposons un algorithme de gestion d'un réseau hybride autonome. Cet outil de gestion doit :

- Empêcher les décharges profondes et les surcharges de la batterie.
- Assurer l'alimentation continue de l'installation en sollicitant le groupe diesel.
- Solliciter le maximum possible la source éolienne.

IV.8.2 SCHEMA SYNOPTIQUE DU MODELE FLOU

En général, tout système physique modélisable (linéaire ou non linéaire) peut se décomposer en trois éléments inter-liés :

- INPUT (variable d'entrée).

- MODELE (formulation mathématique).
- OUTPUT (variable de sortie).

En cas d'une non linéarité ou en l'absence d'un modèle mathématique décrivant un système physique, la logique floue peut être une alternative d'un tel système, sous conditions de disposition d'informations de base du système concerné (par exemple : données expérimentales).

Ainsi, dans cette partie, nous proposons une gestion du système hybride autonome étudié moyennant la logique floue dans l'environnement du logiciel MATLAB. À cet effet, nous avons considérés les éléments suivants :

- Les variables d'entrées : le SOC, la charge et la puissance produite par l'éolienne.
- Le modèle correspondant à l'algorithme de gestion.
- Les variables de sortie : le générateur diesel, les batteries et l'aérogénérateur.

La figure IV.17 présente l'architecture adoptée par le système hybride autonome sujet de notre étude.

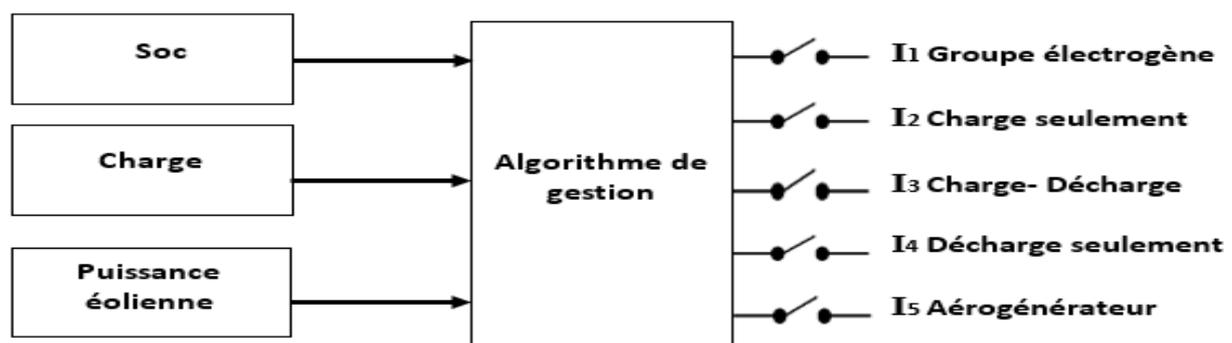


Figure IV.17: schéma synoptique du modèle flou.

La source renouvelable et le groupe diesel sont complémentaires permettant une alimentation sans interruption à la charge alternative. Afin d'assurer cette complémentarité, un système de commutation à base de logique floue s'impose. Ce système est formé par cinq commutateurs (I1, I2, I3, I4 et I5) dont le rôle de chacun est respectivement : relie le groupe diesel à la charge, déconnecte les batteries de la charge, relie les batteries à la charge et déconnecte l'aérogénérateur des batteries.

IV.8.3 ALGORITHME DE GESTION

En prenant en considération les contraintes citées précédemment, nous proposons un algorithme de gestion convenable afin d'assurer un bon fonctionnement du système hybride autonome

L'algorithme de la figure IV.18 décrit les étapes d'enclenchement du groupe diesel. Ce dernier dépend de la valeur initiale de l'état de charge des batteries (SOC) estimées à partir de la lecture de la tension au bornes des batteries et des puissances de l'éolienne estimées à partir de la lecture des données climatiques du site, Ces SOC et ces puissances sont donc considérées comme des mesures.

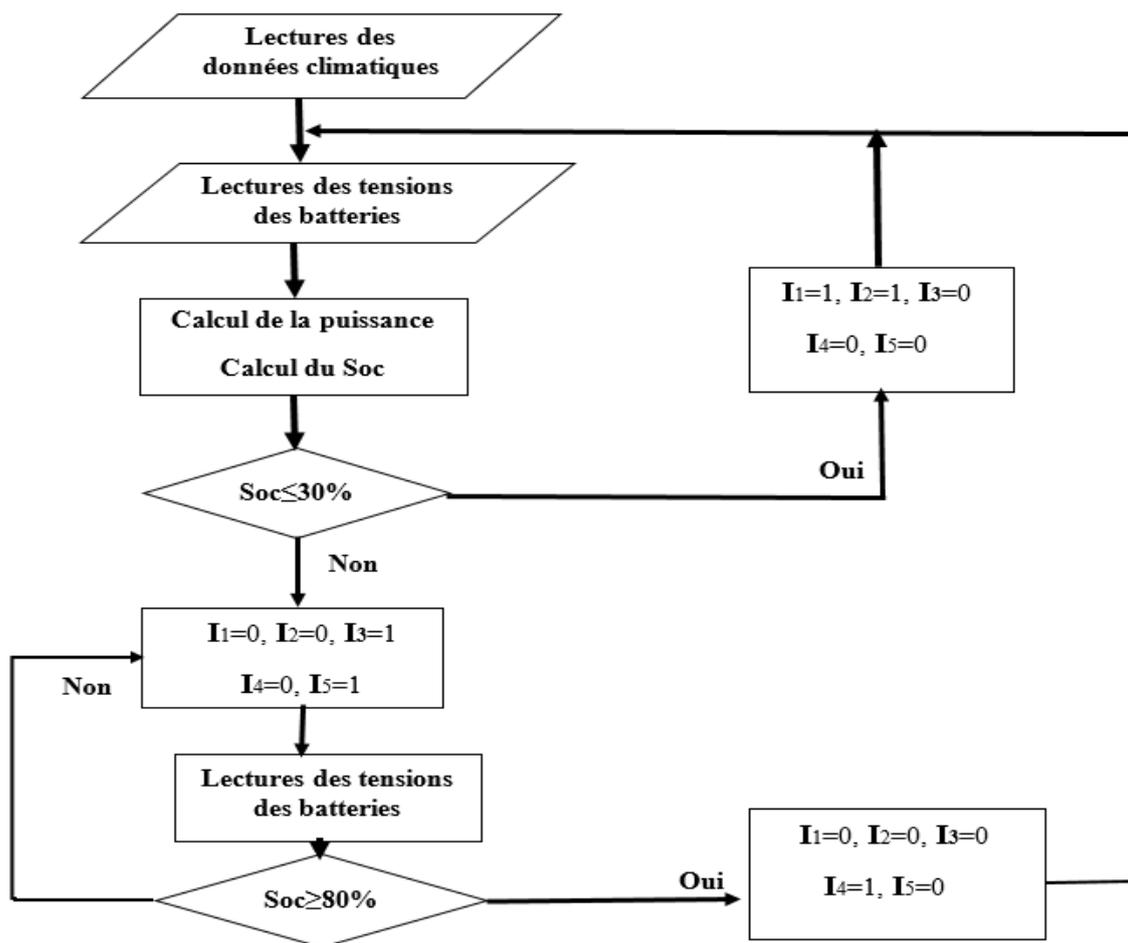


Figure IV.18: Organigramme de gestion du système.

IV.8.4 MODES DE FONCTIONNEMENT DU SYSTEME HYBRIDE

Nous avons développé une stratégie de gestion de l'énergie d'un système autonome hybride diesel-éolien-batteries moyennant la logique floue.

L'objectif principal de cette stratégie est de réaliser une gestion efficace dans des conditions météorologiques variables qui permettraient d'assurer la satisfaction des besoins en énergie de notre charge dont la consommation journalière est de 3.52 kWh/jour et d'un pic de 0.525 kW. L'indicateur clé qui régit le fonctionnement de la stratégie de gestion est l'état de charge (SOC : State Of Charge) des batteries. Compte tenu de l'importance de ces dernières dans le bon fonctionnement de l'ensemble du système, il est essentiel de maintenir le SOC de l'accumulateur entre un niveau maximum admissible SOC_{max} et un niveau minimum SOC_{min} qu'il ne faut pas dépasser comme cité précédemment.

Ainsi, en tenant compte de tous les scénarios possibles de fonctionnement de l'ensemble du système autonome hybride diesel-éolien-batteries, nous avons conçu une stratégie de gestion pour notre étude dont les modes de fonctionnement sont présentés sur le tableau IV.9 :

Tableau IV.9 : Base de règles du gestionnaire flou.

<i>Mode</i>	<i>si SOC</i>	<i>Et si charge</i>	<i>Et si Peolienne</i>	<i>Alors</i>	
1/2/3	Faible	Faible/moyenne/élevée	Faible	I₁₌₁	I₂₌₁
4/5/6	Faible	Faible/moyenne/élevée	Moyenne	I₁₌₁	I₂₌₁
7/8/9	Faible	Faible/moyenne/élevée	Elevée	I₁₌₁	I₂₌₁
10/11/12	Moyen	Faible/moyenne/élevée	Faible	I₃₌₁	I₅₌₁
13/14/15	Moyen	Faible/moyenne/élevée	Moyenne	I₃₌₁	I₅₌₁
16/17/18	Moyen	Faible/moyenne/élevée	Elevée	I₃₌₁	I₅₌₁
19/20/21	Elevé	Faible/moyenne/élevée	Faible	I₄₌₁	
22/23/24	Elevé	Faible/moyenne/élevée	Moyenne	I₄₌₁	
25/26/27	Elevé	Faible/moyenne/élevée	Elevée	I₄₌₁	

Ou **I₁**: commande du Groupe électrogène.

I2 : commande de la Charge seulement.

I3 : commande de la Charge-décharge.

I4 : commande de la Décharge seulement.

I5 : commande de l'aérogénérateur.

IV.8.5 SIMULATION

Nous donnons sur la figure IV.19 le schéma synoptique du modèle flou développé sous Matlab/Simulink.

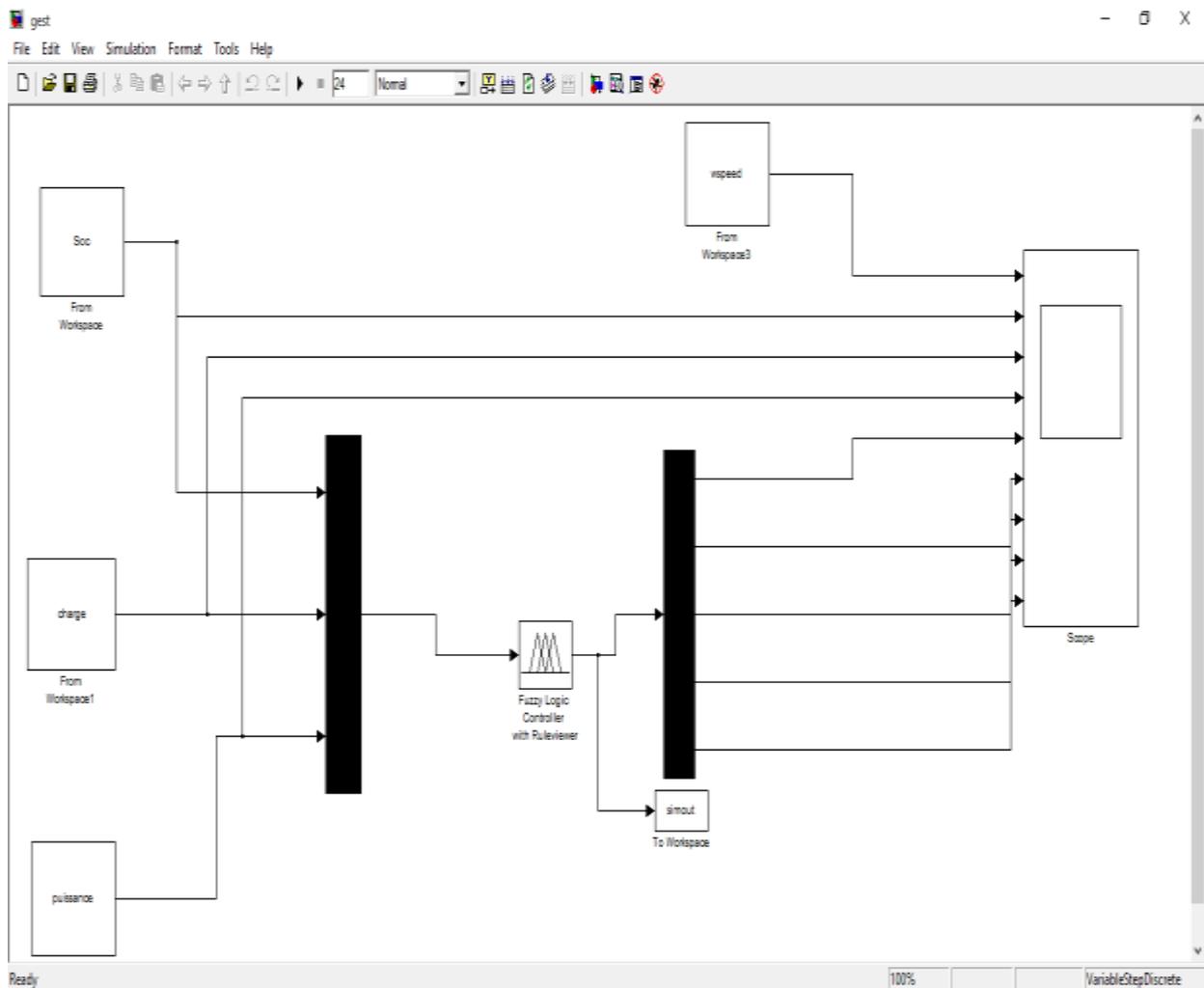


Figure IV.19 : Système hybride implanté dans l'environnement MATLAB/Simulink.

Comme application de la commande à base de la logique floue présentée ci-dessus, nous avons choisi trois scénarios à savoir :

- Une moyenne journalière de la vitesse du vent élevée et état de charge élevé.
- Une moyenne journalière de la vitesse du vent moyenne et état de charge moyen.
- Une moyenne journalière de la vitesse du vent élevée et état de charge faible.

Les résultats obtenus après simulation selon les trois scénarios cités ci-dessus sont illustrés sur les figures IV.20, IV.21 et IV.22.

IV.8.6 DISCUSSION DES RESULTATS

Les figures (IV.20), (IV.21) et (IV.22) représentent respectivement les résultats de la simulation de la stratégie de gestion du réseau hybride autonome correspondant à trois scénarios donnés et relatifs aux journées 21 Mars, 21 Juin et 21 Septembre.

Dans ce qui suit nous présentons les remarques relatives à chacun des résultats auxquels nous avons aboutis.

Scénario 1 : $V_{moyenne}=7.79$ m/s et $SOC_{moyen}= 89.12$ %

Selon, La figure (IV.20) relative à la journée du 21 Mars : nous remarquons qu'au début de la journée ($t=0$) : la puissance produite par le générateur éolien est presque nulle (graphe b), nous remarquons aussi que de $t=0$ jusqu'à $t=20h$ l'état de charge des batteries dépasse les 80% et atteint 100% (graphe c). Sur cet intervalle de temps l'alimentation de la charge est assurée par les batteries et **I4** se ferme pour que les batteries se déchargent seulement. Nous constatons que sur l'intervalle de $t=20h$ jusqu'à $t=22h$ l'état de charge des batteries est compris entre 30% et 80% (graphe c), **I5** se ferme pour démarrer le générateur éolien alors que **I3** se ferme pour que les batteries se chargent et se déchargent. Dès que l'état de charge des batteries atteint 30% (de $t=22h$ jusqu'à $t=24h$), **I1** se ferme pour démarrer le groupe diesel alors que **I2** se ferme pour que les batteries se chargent seulement.

Scénario 2 : $V_{moyenne}= 3.81$ m/s et $SOC_{moyen} =51.74$ %

La figure (IV.21) : représente les résultats de la simulation du réseau hybride autonome correspondant à la journée 21 Juin. De $t=0$ jusqu'à $t=3h$ nous remarquons que la puissance produite par le générateur éolien est nulle (graphe c), nous remarquons aussi que l'état de charge des batteries est compris entre 30 et 80% (graphe d). Sur cet intervalle nous constatons

que **I5** se ferme pour démarrer le générateur éolien, **I3** est à l'état fermé ce qui correspond à la possibilité de charge et de décharge des batteries. Dès que l'état de charge des batteries atteint 30% (de $t=3h$ jusqu'à $t=7h$), **I1** se ferme pour démarrer le groupe diesel alors que **I2** se ferme pour que les batteries se chargent seulement. De $t=7h$ à $t=24h$ nous remarquons que l'état de charge des batteries est compris entre 30 et 80%. Sur cet intervalle nous constatons que **I5** se ferme pour démarrer le générateur éolien, **I3** se ferme pour que les batteries puissent se chargées et se déchargées.

Scénario 3 : $V_{moyenne} = 6.02$ m/s et $SOC_{moyen} = 24.99\%$

La figure (IV.22) : relative à la journée du 21 Septembre présente le comportement du réseau hybride autonome. D'après cette dernière nous remarquons que de $t=0$ jusqu'à $t=9h$, le générateur éolien produit une moyenne puissance (graphe c), l'état de charge des batteries est inférieur à 30% (graphe d). Sur cet intervalle nous constatons que **I1** se ferme pour démarrer le groupe diesel alors que **I2** se ferme pour que les batteries se chargent seulement. Dès que l'état de charge des batteries dépasse les 30% (tel qu'il est compris entre 30% et 80% sur l'intervalle de $t=9h$ jusqu'à $t=16h$), **I5** se ferme pour démarrer le générateur éolien alors que **I3** se ferme pour que les batteries se chargent et se déchargent. Suivant le (graphe d) nous constatons que sur l'intervalle de $t=16h$ jusqu'à $t=17h30min$ environ l'état de charge des batteries atteint 30%, **I1** se ferme une deuxième fois pour démarrer le groupe diesel alors que **I2** se ferme pour que les batteries se chargent seulement. Dès que l'état de charge des batteries dépasse les 30% (graphe d) de $t=17h30min$ jusqu'à $t=24h$, **I5** se ferme une seconde fois pour démarrer le générateur éolien alors que **I3** se ferme pour que les batteries se chargent et se déchargent.

Scénario 1 : $V_{moyenne}=7.79$ m/s et $SOC_{moyen}= 89.12\%$

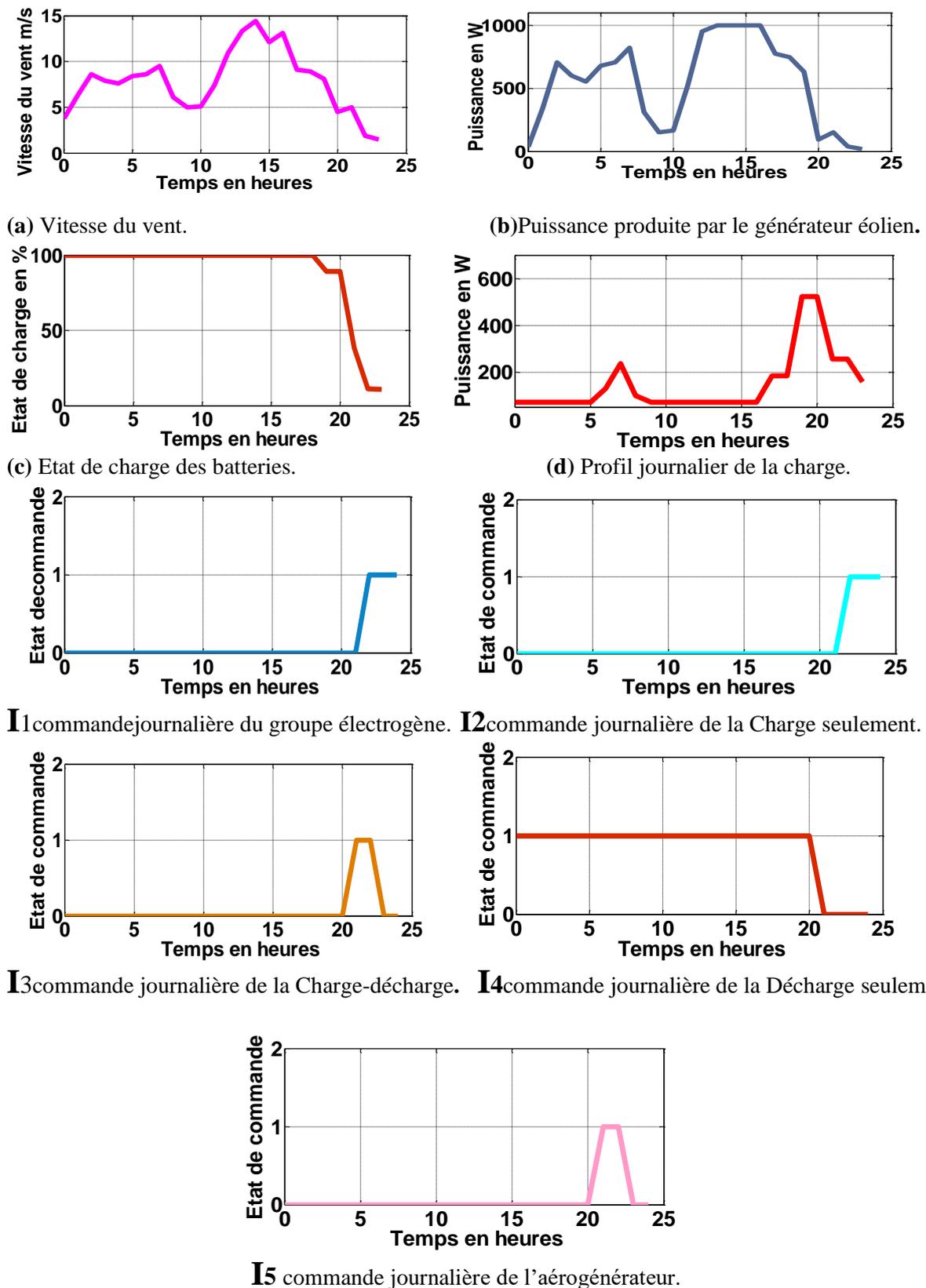
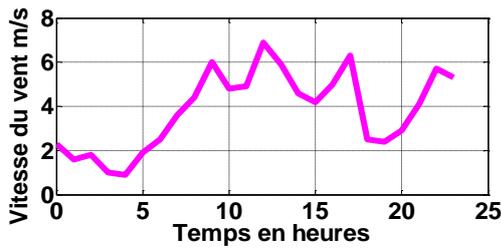
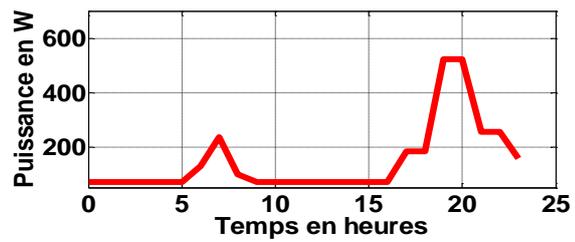


Figure IV.20 : les résultats de la simulation de la stratégie de gestion du réseau hybride autonome correspondant à la journée 21 Mars.

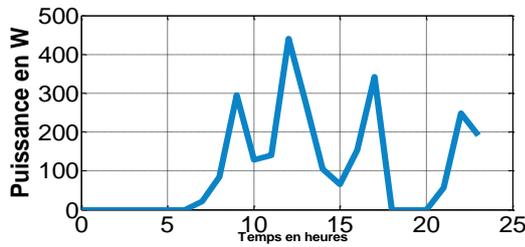
Scénario 2 : $V_{moyenne} = 3.81 \text{ m/s}$ et $SOC_{moyen} = 51.74\%$



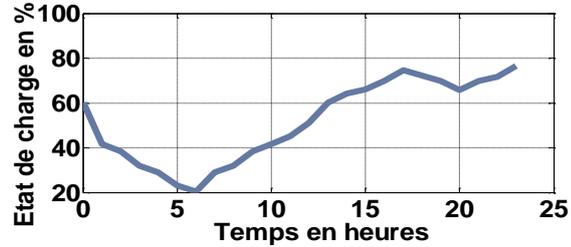
(a) Vitesse du vent .



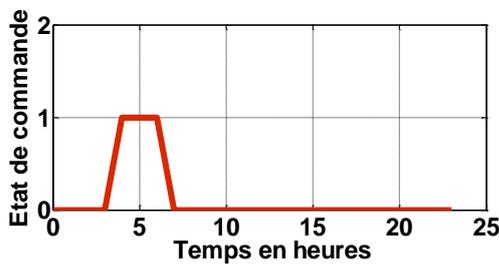
(b) Profil journalier de la charge.



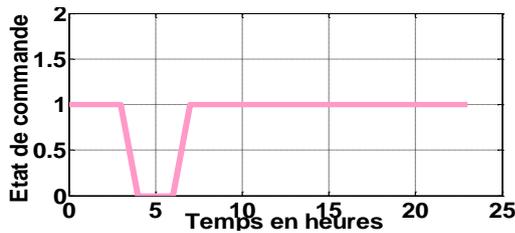
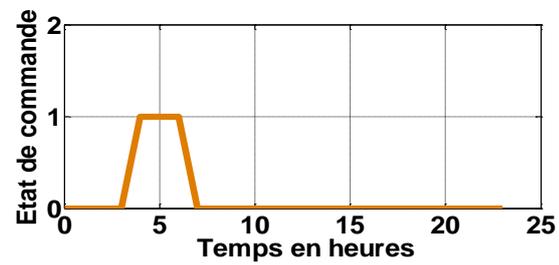
(c)Puisance produite par le générateur éolien.



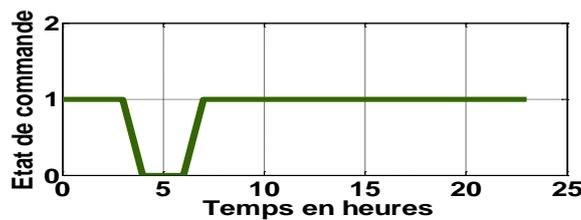
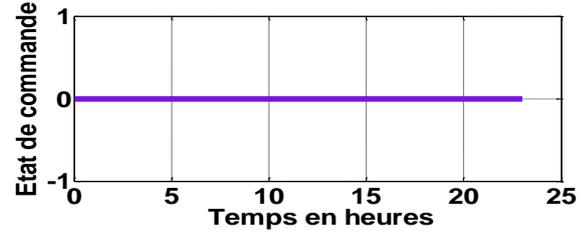
d) Etat de charge des batteries.



I1 commande journalière du groupe électrogène. **I2** commande journalière de la Charge seulement.



I3 commande journalière de la Charge-décharge. **I4** commande journalière de la Décharge seulement



I5 commande journalière de l'aérogénérateur.

Figure IV.21 : les résultats de la simulation de la stratégie de gestion du réseau hybride autonome correspondant à la journée 21 Juin.

Scénario 3 : $V_{moyenne} = 6.02$ m/s et $SOC_{moyen} = 24.99\%$

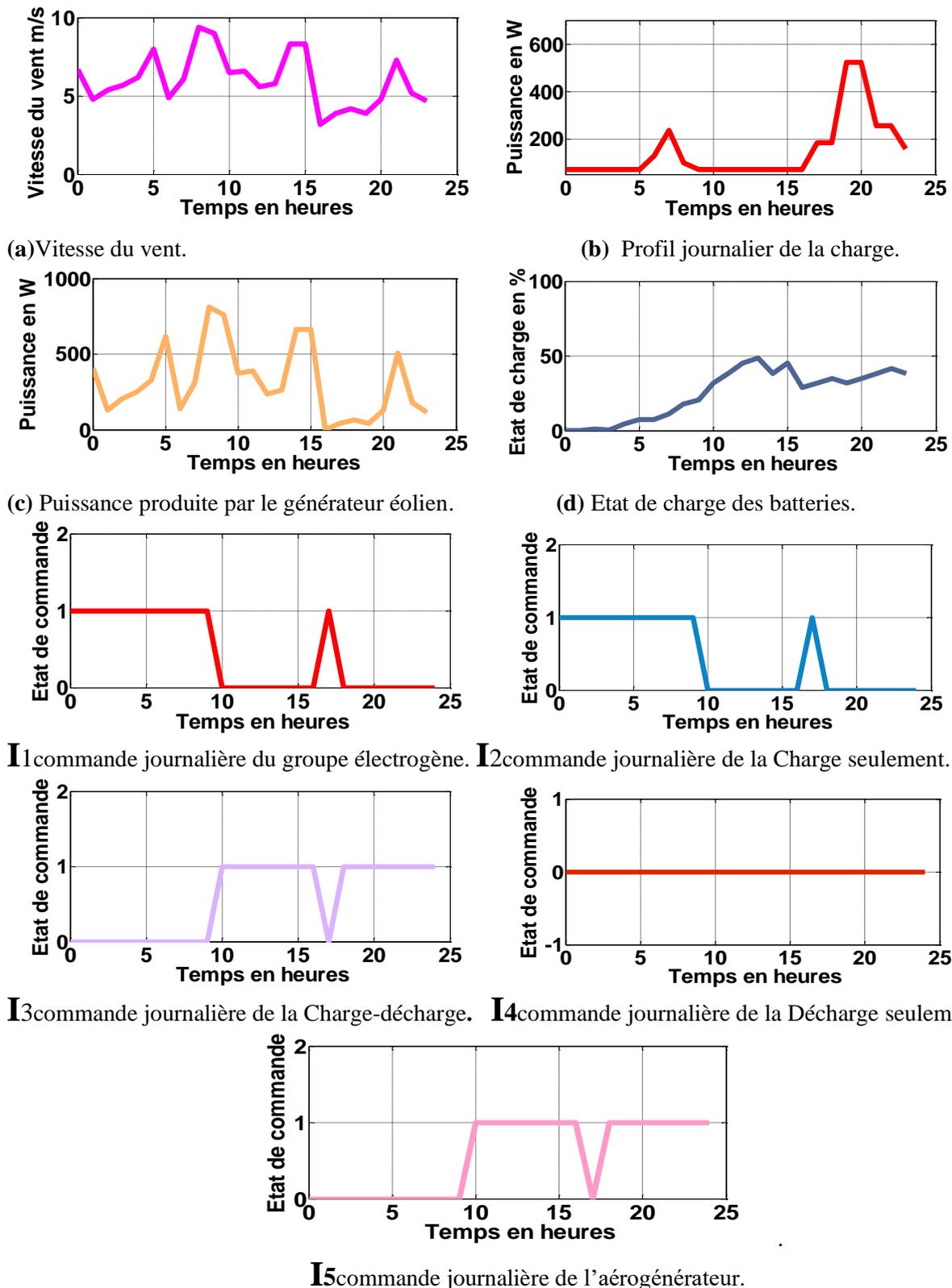


Figure IV.22 : les résultats de la simulation de la stratégie de gestion du réseau hybride autonome correspondant à la journée 21 Septembre.

CONCLUSION

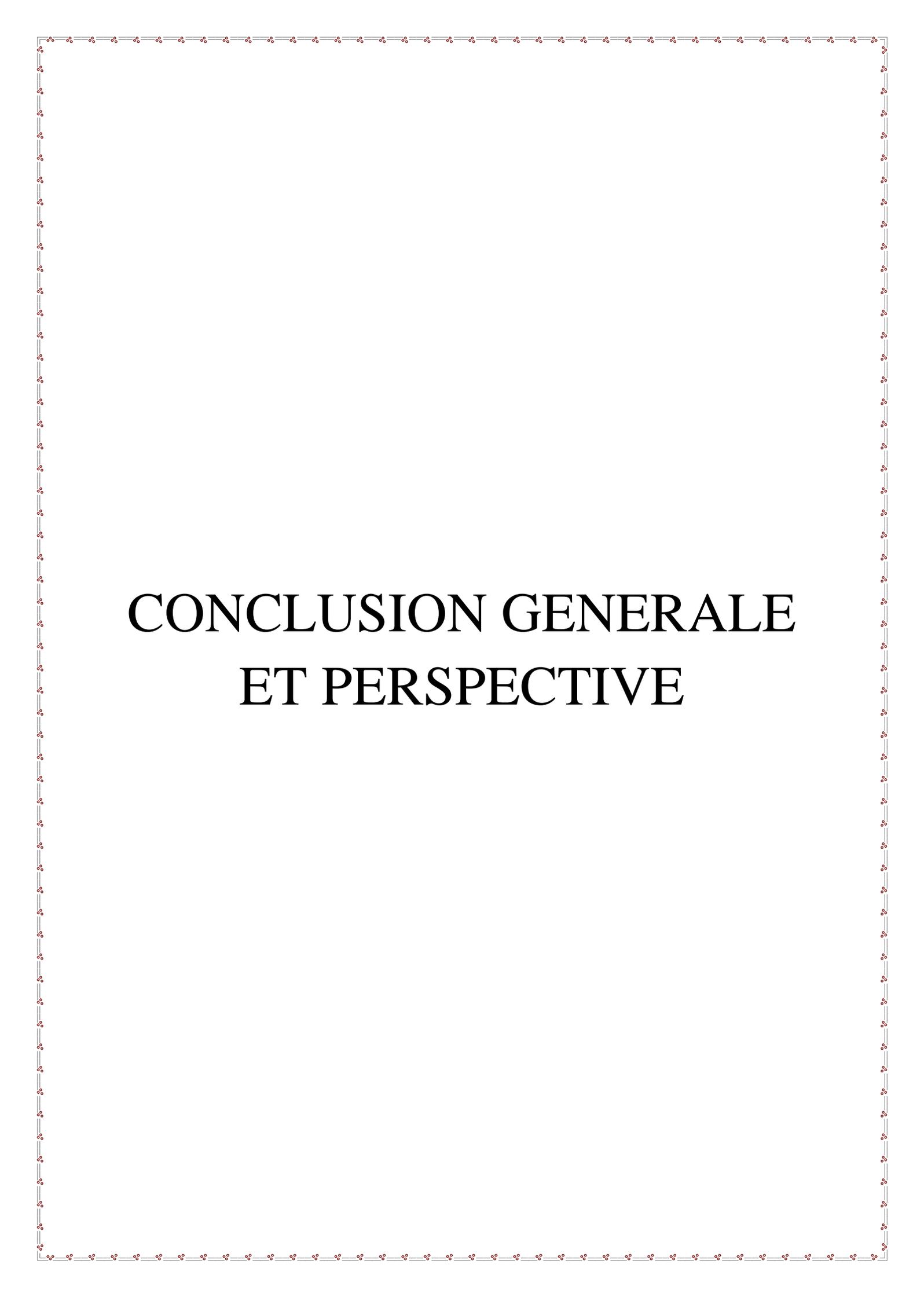
Dans ce chapitre moyennant deux logiciels de simulation Matlab /Simulink et HOMER nous avons pu déterminer les performances de notre système, et d'après les résultats obtenus.

Premièrement pour le logiciel Matlab/ Simulink nous avons :

- Validé les modèles développés dans le chapitre 3 et leur application sur le site de Djelfa s'est révélé performante dans les résultats qu'elles ont fournis vu qu'elles correspondent à notre attente.
- Développé un algorithme de gestion à base de logique floue appliqué pour trois scénarios qui garantit l'exploitation optimale de l'énergie issue de la source éolienne et assure la sécurité de la batterie contre les surcharges et les décharges profondes.
- Les courbes de simulation confirment l'efficacité attendue de l'algorithme : la sécurité de la batterie, l'alimentation sans interruption de la charge et l'exploitation optimale de la source éolienne.

Deuxièmement, en ce qui concerne la faisabilité de notre système moyennant le logiciel HOMER, nous concluons que :

- La configuration du système hybride dépend évidemment du site considéré, des ressources énergétiques disponibles ainsi que des contraintes d'utilisations.
- L'utilisation de l'énergie éolienne joue un rôle important dans la protection de l'environnement.



CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVE

Conclusion générale et perspectives

Des améliorations dans la conception, le fonctionnement et la gestion des SEH sont toujours nécessaires pour rendre plus compétitive l'intégration des sources d'énergies alternatives dans le bilan des systèmes globaux de production d'énergie. Dans ce contexte, le travail présenté dans ce mémoire est une contribution à l'analyse du comportement à la gestion optimale d'un SEH constitué d'une éolienne, un groupe électrogène et des batteries de stockage.

Après avoir présenté des généralités sur les énergies renouvelables et une description générale des systèmes autonomes et système hybrides, ainsi que leur composants et leurs architectures, nous nous sommes intéressés au SEH de type éolien/diesel/batteries.

Dans ce contexte, notre objectif était de trouver un système hybride optimal. A cet effet, nous avons donc traité les points suivants à savoir :

Modélisation des sous-systèmes constituant notre système hybride dans le but de créer un lien entre les phénomènes physiques et le comportement réel de ces derniers.

Traitement de base de données relative aux vitesses du vent d'une région isolée, une méthodologie d'analyse basée sur la prise en compte des perturbations saisonnières a été entreprise concernant la source d'énergie éolienne. Ainsi, nos travaux ont donc porté sur l'établissement des modèles énergétiques de type « entrée-sortie » des deux types d'aérogénérateurs Whisper200 et Whisper100 moyennant le logiciel MATLAB. L'exemple de simulation a été appliqué au site de Djelfa où les données météorologiques sont disponibles (vitesses du vent). Ce qui nous a permis de déterminer et d'estimer le potentiel énergétique primaire éolien du site afin d'assurer la couverture de la charge choisie.

Dimensionnement optimal du système hybride étudié, pour ce fait nous avons utilisé le logiciel HOMER. Après avoir introduit chaque ressource énergétique ainsi que le coût de chacun de ces composants, ce logiciel nous a permis de mettre en évidence le système le plus optimum. Du point de vue environnemental, ce dernier nous a permis aussi de faire apparaître le rôle de l'utilisation du potentiel énergétique éolien dans la réduction des gaz à effet de serre. Comme application nous avons choisi le site Algérien cité précédemment dont les conditions météorologiques sont supposées connues.

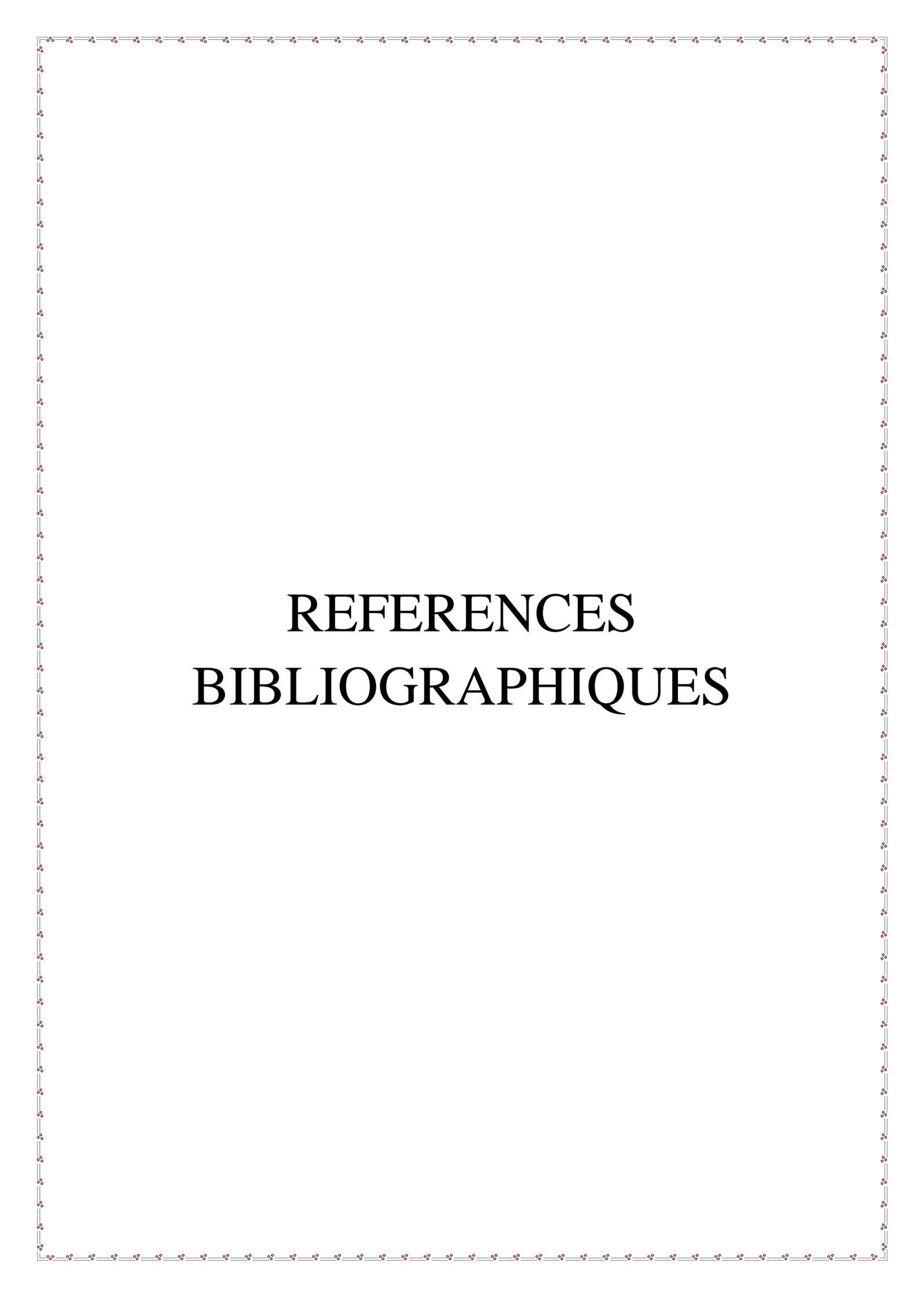
En dernier lieu, nous avons développé un algorithme de gestion à base de logique floue qui garantit l'exploitation optimale de l'énergie issue de la source éolienne et assure la sécurité de la batterie contre les surcharges et les décharges profondes ce qui conduira à assurer une

Conclusion générale et perspectives

alimentation stable et sans interruption au niveau de la charge vis-à-vis de la variation de la puissance fournie par l'aérogénérateur.

En perspective, nous dirons que de nombreux travaux demeurent nécessaires au-delà de ce mémoire. Citons par exemple :

- L'application sur un autre type d'aérogénérateurs capables de produire de l'électricité avec des vents faibles afin de pouvoir améliorer le rendement énergétique et de générer une puissance de meilleure qualité.
- Utilisation d'une base de données mesurée sur plusieurs années et avec un pas de temps plus fin
- La validation de ces résultats par une confrontation expérimentale des estimations aux mesures ce qui permettra de préciser les conditions de leurs applications et de déceler les éventuels inconvénients.



REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références Bibliographiques

- [1] : Revu. Energie. Ren.: ICPWE (2003)147-152 147 Evolution Mensuelle de la Ressource Eolienne à travers l'Algérie
- [2] : <https://www.edf.fr>
- [3] : J.christian Lhomme « Les énergies renouvelables » Edition systèmes solaires
- [4] : M.Pluviose « conversion d'énergie par turbomachines » Techniques de l'ingénieur Génie mécanique BM4280 (2002): BM4280-1.
- [5] : <http://www.explorateurs-energie.com/>
- [6] : - www.energies-renouvelables.org
- [7] : Amardjia-Adnani hania « Algérie énergie solaire et hydrogène » Edition OPU 2007
- [8] : Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance ' thèse de doctorat de L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE
- [9] : www.cder.dz -Bulletin des Energies Renouvelables - N° 21 201
- [10] : M. Rapin, J.Noel “ Energie EOLIENNE. Énergie éolienne-2e éd.: Du petit éolien à l'éolien off shore. Dunod, 2014.
- [11] : « Comparaison entre les techniques de commande de la puissance de vent dans une éolienne à vitesse variable » thèse de Master UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA
- [12] : GUY Cuntly éolienne et aérogénérateurs: guide de l'énergie éolienne. Edisud, 2001.
- [13] : LAROUI Rachid « Modélisation et simulation d'un système multi-sources Photovoltaïque-éolien-diesel dans la région d'Adrar » thèse magister Université Ahmed Draya Adrar
- [14] : H.samira « étude et commande d'une éolienne à base d'une machine asynchrone à aimant permanents » thèse magister université mouloud mammeri de tizi -ouzou2011
- [15] : H.abdelhakim « Comparaison entre les techniques de commande de la puissance de vent dans une éolienne à vitesse variable » thèse de master académique université kasdi merbah ouragla
- [16] : www.les-energies-renouvelables.eu
- [17] : M. Elhassan, M. Fauzi, K. Sopian and A. A. Abass, “Design and Performance of Photovoltaic power System as a Renewable Energy Source for Residential in Khartoum”, International Journal of the Physical Sciences Vol. 7(25), pp. 4036-4042, June 2012

[18]: A. Das and V. Balakrishnan, “Optimized Hybrid Renewable Energy System of Isolated Islands in Smart-Grid scenario-A Case Study in Indian Context ”, World Academy of Science, Engineering and Technology 67, 2012.

[19]: E. A. Al-Ammar, N. H. Malik and M. Usman, “Application of Using Hybrid Renewable Energy in Saudi Arabia ”, ETASR - Engineering, Technology & Applied Science Research, Vol. 1, pp. 84-89, 2011.

[20] : D. Rekioua, Z. Roumila and T. Rekioua, “ Etude d’une centrale Hybride Photovoltaïque - Eolien – Diesel ” Revue des Energies Renouvelables, Vol. 11, N°4, pp. 623-633, 2008.

[21]: H. Yang, W. Zhou, L. Lu and Z. Fang, “Optimal Sizing Method for Stand Alone Hybrid Solar–Wind System with LPSP technology by using Genetic Algorithm ”, Solar Energy 82, pp. 354-367, 2008.

[22]: R. Chedid and S. Rahman, “Unit Sizing and Control of Hybrid Wind-Solar Power Systems”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 12, No. 1, March 1997.

[23]: W. D. Kellogg, M. H. Nehrir, G. Venkataramanan and V. Gerez, “Generation Unit Sizing and Cost Analysis for Stand-Alone Wind, Photovoltaic, and Hybrid Wind PV Systems”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 13, No. 1, March 1998.

[24]: F. Baghdadi, “ Modélisation et Simulation des Performances d’une Installation Hybride de conversion d’Energies Renouvelables ”, Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2011.

[25] : Dr. Saheb–Koussa et Dr. Belhamel, << Production d’électricité sans interruption moyennant un système hybride (éolien – photovoltaïque – diesel) >>, Revue des Énergies Renouvelables ICRESO 07, Tlemcen 2007.

SIMULATION D’UN AEROGENERATEUR COUPLE A UN GENERATEUR DIESEL

[26] S. Diaf, Dr. Belhamel, M. Haddadi, A. Louche, << Technical and economic assessment of hybrid photovoltaic/wind system with battery storage in Corsica island >> N°36 743–754, publié par Elsevier, 11 Decembre 2007.

[27] : Dr. Saheb–Koussa et Dr. Belhamel, << Contribution à l’étude théorique du comportement d’un système hybride (éolien – photovoltaïque - diesel) de production d’électricité sans interruption >> Revue des Énergies Renouvelables Vol. 11 N°1, 2008.

[28]: Dr. Saheb-Koussa, M. Haddadi b, Dr. Belhamel, << Economic and technical study of a hybrid system (wind–photovoltaic–diesel) for rural electrification in Algeria >> N° 86 1024–1030, publié par Elsevier, 19 December 2008.

[29]: S. Diaf, G. Notton, Dr. Belhamel, M. Haddadi, A. Louche, << Design and techno-economical optimization for hybrid/wind system under various meteorological conditions >> N° 85 968–987, publié par Elsevier, 2 Avril 2008.

[30]: Dr. Saheb-Koussa, M. Haddadi and M. Belhamel, << Étude de faisabilité et optimisation d'un système hybride (éolien – photovoltaïque – diesel) a fourniture d'énergie électrique totalement autonome >> Vol. 2 N°. 1 84-95, publié par Elsevier, 30 juin 2010.

[31] : Djohra SahebKoussa, Mustapha Koussa, SeddikHadji
“A Technical, Economic and Environmental Assessment of Decentralized Systems Connected to the Algerian Grid. Case Study: Adrar Site” Energy and Power 2012, 2(4): 55-60 DOI: 10.5923/j.ep.20120204.03.

[32] : Abdel Hamid Kaabeche, Maïouf Belhamel, Rachid Ibtouen, << Techno-economic valuation and optimization of integrated photovoltaic/Wind energy conversion system >> N° 85 2407–2420, publié par Elsevier, 2011. .

[33]: SAHEB KOUSSA, Djohra et KOUSSA, Mustapha. GHGs (greenhouse gases) emission and economic analysis of a GCRES (grid-connected renewable energy system) in the arid region, Algeria. Energy, 2016, vol. 102, p. 216-230.

[34] : Dekkiche, Mohamed, et al. "Sizing and optimisation of a stand alone hybride sytsem for électrification of a remote site at Ouled Fares, Algeria." Advances in Materials and Processing Technologies 3.1 (2017): 125-134.

[35] : L.Stoyanov « Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables » thèse doctorat l'université technique de Sofia

[36] : K.Riad « intégration d'une éolienne sur un réseau électrique isolé » thèse master académique université Kasdi Merbah Ouargla

[37] : I.vechiu « modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome » thèse doctorat université du harve

[38] : B.Fazia « modélisation et simulation des performances d'une installation hybride de conversion d'énergie renouvelable » thèse de magister université de mouloud Mamerie tizi-ouzou

[39] : L.Rachid « Modélisation et simulation d'un système multi-sources photovoltaïque-éolien – diesel dans la région d'Adrar »Mémoire magister université Ahmed Draya Adrar

[40] : H.Samira « étude et commande d'une éolienne à base d'une machine synchrone à aimants permanente »

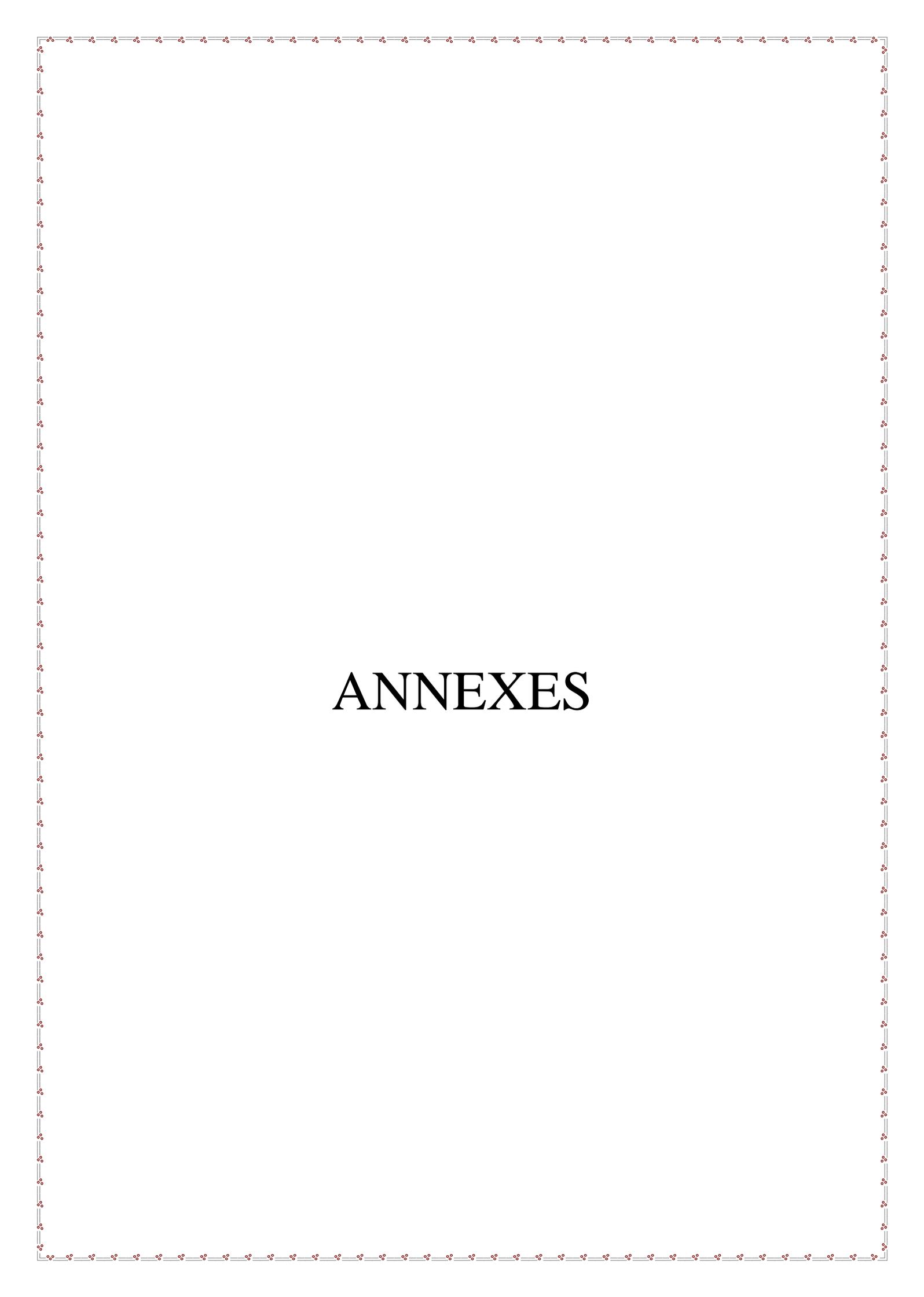
[41] : GUY Cuntly « éolienne et aérogénérateurs »

[42] : M.abdelatif « étude et optimisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque » thèse
magister Ferhat –Abbas Sétif

[43] : <http://www.energiesdouce.com/>

[44] : https://fr.wikipedia.org/wiki/Wilaya_de_Djelfa

[45] : <http://www.carte-algerie.com/plan-25870-wilaya-de-djelfa.html>



ANNEXES

Annexe1 : Aérogénérateur whisper 100



Les caractéristiques techniques de l'éolienne :

type	Whisper 100
Puissance crête	900 watts à 12.5 m/s
Vitesse du vent nominal	12.5 m/s
Vitesse du vent de démarrage	3.4 m/s
Vitesse du vent maximal	55 m/s
Energie mensuel	100 KWh/mois à 5.4 m/s
Nombre des pales	3
Matériau des pales	Carbone renforcée fibre de verre
Diamètre de rotor	2.1 m
Voltage	12, 24, 36 ,48 VDC
Type de contrôle	Whisper 100 contrôleur
Poids	21 Kg

Annexe2 : Aérogénérateur whisper 200



Les caractéristiques techniques de l'éolienne :

type	Whisper 200
Puissance crête	1000 watts à 11.6 m/s
Vitesse du vent nominal	11.6 m/s
Vitesse du vent de démarrage	3.1 m/s
Vitesse du vent maximal	55 m/s
Energie mensuel	200 KWh/mois à 5.4 m/s
Nombre des pales	3
Matériau des pales	Carbone renforcée fibre de verre
Diamètre de rotor	2.7 m
Voltage	12, 24,36 ,48 VDC
Type de contrôle	Whisper contrôleur
Poids	30 Kg boîte : 39.46 Kg

Annexe3 : batterie Energy banner bull



Caractéristiques technique de la batterie de plomb :

Caractéristiques	Valeurs
Tension nominal	12 v
Capacité de la batterie	110 Ah
Nombre de cycle	3 à 5 ans à 50 % de décharge
Autodécharge	Environ 9% par mois
Tension de décharge	22.2 v
Tension de fin de charge	27.4 v
Température maximal	+ 50 °C
Température minimal	-10 °C
Température conseillée	+ 20 °C

Annexe4 : onduleur AJ sine wave



Données technique de l'onduleur AJ sine wave :

Paramètre	valeurs
Tension de batterie	24 V
Puissance continue	1300 W
Rendement maximal	94 %
Tension de sortie	230 V \pm 5%
Fréquence	50 Hz \pm 0.05 %
Cos Φ	0.1 - 1