

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
CENTRE UNIVERSITAIRE SALHI AHMED– NAAMA



INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
DÉPARTEMENT DE TECHNOLOGIE

MÉMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :
Énergies Renouvelables
Option : Énergies Renouvelables en Électrotechnique

Intitulé :

ÉTUDE D'UN PARC ÉOLIEN

Présenté par :

- Limam abderrahmane khamis
- Naceur aymen

Soutenu le : 22/06/2023 devant le Jury :

<i>M. Amara Zineb</i>	<i>MCB</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Président</i>
<i>M. Khassam Medjdoub</i>	<i>MCA</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Encadreur</i>
<i>M. Benouaz Idriss Yassine</i>	<i>DOCTEUR</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Co-Encadreur</i>
<i>M. Benotmane Noreddine</i>	<i>MCB</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Examineur</i>

الله أكبر

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIÈRES	i
RESUMÉ & ABSTRACT	iv
DÉDICACES	vii
REMERCIEMENTS	ix
LISTE DES FIGURES	x
LISTE DES TABLEAUX	xii
LISTE DES ABREVIATIONS	xiii
INTRODUCTION GÉNÉRALE	03

CHAPITRE 01 : ETAT DE L'ART SUR LES SYSTEMES EOLIEN

1.1.INTRODUCTION	05
1.2.Historique et croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne	05
1.3.Définition de l'énergie éolienne	06
1.4.Les composants et le fonctionnement d'une éolienne	07
1.5.Zones de fonctionnement de l'éolienne	08
1.5.1.Systèmes utilisant la machine asynchrone	10
1.5.2.Machine asynchrone à cage d'écureuil	10
1.5.3.Machine Asynchrone à Double Stator	12
1.5.4. Machine Asynchrone à Double Alimentation type "rotor bobiné"	13
1.6.Le résumé des points forts de la MADA sont	14
(a) MADA-structure de Kramer	14
(b) MADA à énergie rotorique dissipé	15
(c) MADA – structure de (scherbius) avec cycloconvertisseur	16
1.7.Les différents types de turbines éoliennes	16
1.7.1.L'éolienne a axe verticale	16
1.7.2.L'éolienne a axe horizontal	17
1.8.Production mondiale d'électricité éolienne	18
1.9.Futurs challenges et perspectives mondiales	19
1.10.Energie éolienne en Algérie	19
1.10.1.Gisement éolien en Algérie	19
1.10.2.Carte des vents en Algérie	20
1.10.3.Capacité de production de l'énergie éolienne installée en Algérie	21
1.11.Les avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	22
1.11.1. Les avantages	22
1.11.2. Les inconvénients	22
1.12.Application de l'énergie éolienne	22
1.13.Les avantages et inconvénients des axes	23
1.13.1. Les avantages de l'éolienne à axe horizontal	23
1.13.2. Les inconvénients de l'éolienne à axe horizontal	23
1.13.3. Les avantages de l'éolienne à axe vertical	23
1.13.4. Les inconvénients de l'éolienne à axe vertical	23
1.14.Conclusion	24

CHAPITRE 02 : MODELISATION DE SYSTEME D'ENERGIE RENOUVELABLE ETUDIE

2.1.Introduction	26
2.2.Modélisation des composants du système éolien	26
2.3.Modélisation du système éolien	27
2.3.1.Conversion aérodynamique	27

Table des matières

2.3.2.Transmission.....	29
2.3.3.Modèle de la machine synchrone à aimants permanents.....	30
2.4.Modélisation du système de stockage.....	32
2.5.Modélisation du bus continu.....	35
2.6 .modélisation de conversion statiques	36
2.6.1. Modélisation du convertisseur continu/continu	36
2.6.1.1. Modélisation du hacheur survolteur.....	37
2.6.2. Modélisation de l'onduleur triphasé	39
2.7.Constante voltage MPPT.....	40
2.8.Qu'est-ce qu'un filtre LC.....	41
2.9.Conclusion.....	41

CHAPITRE 3 :SIMULATION ET DESCUSSION DES RESULTATS .

3.1.Introduction.....	43
3.2.Le système renouvelable étudiée.....	43
3.2.1.Les conditions de notre étude.....	43
3.2.2.Parc éolien étudié.....	43
3.3.La tension dans le bus continue.....	45
3.4.La charge.....	45
3.5.Discussion et comparaison des résultats.....	48
3.6.Conclusion.....	49
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	51
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	53

لمواجهة تحديات تغير المناخ ، وزيادة الطلب على الطاقة ، وندرة الطاقات الغير متجددة وتقلب أسعارها ، وآثارها الضارة على البيئة ، قامت العديد من البلدان في جميع أنحاء العالم بتغيير سياسات الطاقة الخاصة بها. الاستراتيجية الأولى هي توفير الطاقة. على سبيل المثال ، يهدف الاتحاد الأوروبي إلى تقليل استهلاك الطاقة بنسبة 20٪ من خلال تطبيق برامج تهدف إلى تقليل استهلاك الطاقة وتفضيل كفاءات الطاقة في القطاع الصناعي . الاستراتيجية الثانية هي استخدام مصادر الطاقة المتجددة ، ليس فقط لتوليد الطاقة على نطاق واسع ، ولكن أيضًا للأنظمة المستقلة. من المعروف أن هذه الموارد أقل قدرة على المنافسة من أنظمة الإنتاج التقليدية ، ويرجع ذلك أساسًا إلى تكاليفها المرتفعة نسبيًا. بالإضافة إلى ذلك ، فإن الطبيعة العشوائية لهذه الطاقات تجعل من الصعب السيطرة عليها ومن الضروري وصف الاختلافات في هذه الموارد بأكبر قدر ممكن من الدقة. ومع ذلك ، فإن لها مزايا عديدة ، مثل تقليل الاعتماد على الطاقات الغير متجددة وتقليل انبعاثات الغازات السامة في الغلاف الجوي. هذه الدراسة لغرض إنتاج الكهرباء من مصادر الرياح فقط ، وبالنسبة لوظائف الشبكات الكهربائية فإن هذه الدراسة يمكن أن تشكل إضافة مثيرة للاهتمام.

الكلمات المفتاحية : الطاقات المتجددة ، طاقة الرياح ، تخزين الطاقة.

Résumé:

Pour faire face aux enjeux du changement climatique, à l'augmentation de la demande énergétique, à la raréfaction des combustibles fossiles ainsi qu'à leurs cours fluctuants, et à leurs effets néfastes sur l'environnement, de nombreux pays à travers le monde ont changé leurs politiques énergétiques. La première stratégie est de faire des économies d'énergie. A titre d'exemple, l'union européenne vise à diminuer de 20 % la consommation d'énergie en appliquant des programmes axés sur la réduction de la consommation et en privilégiant l'efficacité énergétique dans le secteur industriel et tertiaire. La seconde stratégie consiste à utiliser des sources d'énergies renouvelables, non seulement pour la production d'énergie à grande échelle, mais aussi pour les systèmes autonomes. Ces ressources sont connues pour être moins compétitives que les systèmes de production traditionnels, principalement en raison de leurs coûts relativement élevés. En outre, le caractère aléatoire et discontinu de ces énergies les rend difficiles à maîtriser et il est nécessaire de caractériser le plus précisément possible les variations de ces ressources. Toutefois, elles présentent plusieurs avantages, tels que la réduction de la dépendance aux énergies fossiles et la réduction des émissions à effet de serre dans l'atmosphère. Cette étude est illustrée pour objectif de produire de l'électricité à partir de sources uniquement éolienne, et pour que les fonctionnalités des réseaux électriques pourraient constituer un levier intéressant.

Mots-clés : Energies renouvelables, Eolienne , stockage d'énergie.

Abstract:

To face the challenges of climate change, the increase in energy demand, the scarcity of fossil fuels as well as their fluctuating prices, and their harmful effects on the environment, many countries throughout the world have changed their energy policies. The first strategy is to save energy. For example, the European Union aims to reduce energy consumption by 20% by applying programs aimed at reducing consumption and favoring energy efficiency in the industrial and tertiary sector. The second strategy is to use renewable energy sources, not only for large-scale power generation, but also for stand-alone systems. These resources are known to be less competitive than traditional production systems, mainly due to their relatively high costs. In addition, the random and discontinuous nature of these energies makes them difficult to control and it is necessary to characterize the variations of these resources as precisely as possible. However, they have several advantages, such as reducing dependence on fossil fuels and reducing greenhouse emissions into the atmosphere. This study is illustrated for the purpose of producing electricity from only wind sources, and for the functionalities of the electrical networks could constitute an interesting lever.

Keywords: Renewable energies, Wind turbine, energy storage.

DEDICACES

Au personne les plus cher de ma vie, ma mère et mon père
pour, leur dévouement et tout ou long de mes études,
sachant que je ne les remercierais jamais assez.

A MES SŒURS pour leur présence à mes cotés .

Pour mon co-encadreur BENOUAZ IDRIS YACINE pour le
temps qu'il ma consacré .

A tous mes professeurs

A tous mes amis.

DEDICACES

Dédicace A toutes les personnes qui nous ont encouragé de près
ou de loin pour achever cette mémoire.

A nos chers parents, nos remerciements et nos reconnaissances
envers les sacrifices et le soutien moral qu'ils ont fourni pendant
toute la durée de mes études.

A nos frères et à toutes mes familles.

A notre encadreur, nos enseignants qui nous ont soutenu tout le
long de mes études.

Et enfin à tous nos amis sans exception surtout à tous nos
collègues d' études.

Aymen

REMERCIEMENT

Au débute Mes remerciements à Allah pour la santé et la patience et la volonté qu'il m'a données durant toutes ces longues années.

Ma mère, ma mère, ma mère et mon cher père que je ne remercierai jamais assez

d'avoir été toujours présents de près ou de loin, leur amour, leur soutien, leur

patience, leurs conseils et enfin leur bénédictions, ô ! combien précieuses et qui

ont toujours guidé mon chemin.

Je remercie également Mr BENOUAZ IDRIS YACINE d'avoir accepté de m'encadrer et de m'aider durant l'élaboration de mon modeste projet.

Je veux exprimer aussi mes remerciements et ma gratitude à mes sœurs, mes collègues, mes enseignants , ainsi qu'à toutes les personnes qui m'ont apporté l'aide et l'assistance nécessaires de ce travail.

mes remerciements s'adressent aussi aux membres du Jury qui ont bien voulu accepter de valoriser ce travail.

abdou

liste des figures

1.1.conversion de l'énergie cinétique du vent	06
1.2.principaux organes du système de conversion éolien.....	07
1.3.composition d'une éolienne.....	08
1.4.courbe de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent.....	09
1.5.caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à paires de poles.....	11
1.6.connection directe d'une machines asynchrone sur le réseau.....	11
1.7.eolienne connectée au réseau par l'intermédiaire de deux convertisseurs de puissance	11
1.8.shéma de la connection au réseau de l'éolienne avec la MAS à double stator.....	13
1.9.shéma de principe d'une machine asynchrone pilotée par le rotor	14
1.10.MADA- structure Kramer	15
1.11.MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée.....	15
1.12.éolienne a axe verticale	17
1.13.éolienne horizontale.....	17
1.14.l'énergie éolienne mondiale (MW).....	19
1.15.carte annuelle des vents à 10 m du sol pour les 87 points de mesure (m/s).....	20
1.16.la première éolienne installée en Algérie.....	21
1.17.la ferme éolienne de Adrar	22
2.1.shéma de principe de système éolien.....	27
2.2.shéma de la turbine éolienne.....	28
2.3.veine fluide traversant le rotor éolien.....	29
2.4.modélisation du couple éolien.....	30
2.5.shéma équivalent du GSAP et le diagramme vectoriel associé.....	31
2.6.cellule électrochimique de base.....	33
2.7.evolution de la tension avec le temps , durant la charge et la décharge.....	34
2.8.modèle électrique simplifié.....	35
2.9.modèle de bus continu.....	36
2.10. montre la tension de l'interrupteur K (transistor).....	37
2.11.Modèle d'un hacheur survolteur.....	38
2.12 : Schéma structurel d'un onduleur triphasé à deux niveaux.....	39
3.1 . schéma de système renouvelable étudié.....	43
3.2. Résultats du parc éolien.....	44
(A) tension produite.....	44
(B) courant produit.....	44
(C) puissance produite.....	44
3.3. Résultats de la demande de la charge.....	46
(A) tension de charge.....	46
(B) Zoom de la tension de la charge.....	46
(C) courant de la charge.....	46
(D) Zoom de courant de la charge.....	47
(E) puissance de la charge.....	47
3.4. les résultats des puissance du SER étudié.....	48

Liste des tableau

Liste des tableau

- 1.1.** les catégories des éoliennes selon leur puissance18
- 1.2.** Puissance éolienne installée dans le monde de 2001 à la fin de 2013 (en MW).....18

**LISTE DES
ABREVIATIONS**

ER : énergies renouvelables

MSAP: la machine synchrone à aimants permanents

GSAP : le générateur synchrone à aimants permanents

MPPT : Maximum Power Point Tracking

SER : système énergie renouvelable

SCE : Système de Conversion Eolien

VAWT: Vertical Axis Wind Turbine

HAWT: Horizontal Axis Wind Turbine

PMSG : synchrones à aimants permanents

Introduction générale

Introduction générale :

L'énergie éolienne est une source d'énergie utilisée depuis des siècles. Dans un premier temps, cette énergie n'a été exploitée que dans les domaines mécaniques. L'exemple le plus connu est le moulin à vent utilisé par le meunier pour la transformation du blé en farine. On peut citer les nombreux moulins à vent servant à l'assèchement des polders en Hollande [1]. Par la suite, ce type d'énergie a servi à produire l'électricité. Au 16ème siècle, elle a été utilisée pour pomper de l'eau et couper le bois [2].

C'est en 1891 que le danois Paul La Cour construisit pour la première fois une turbine à vent générant de l'électricité [3]. A la suite de la fabrication du premier aérogénérateur, les ingénieurs danois améliorèrent cette technologie durant les 1ère et 2ème guerres mondiales pour faire face à la pénurie d'énergie électrique. Malgré certains succès technologiques obtenus à cette époque, l'intérêt pour l'exploitation de l'énergie éolienne à grande échelle déclina à la fin de la 2ème guerre mondiale.

C'est principalement la crise pétrolière de 1974 qui a relancé les études et les expériences sur les éoliennes. Depuis les années 1990, l'amélioration de la technologie des éoliennes a permis de construire des aérogénérateurs de plus de 5 MW et le développement d'éoliennes de 10 MW est en cours. Actuellement les aérogénérateurs produisent une faible quantité d'électricité mondiale selon les sites, mais le taux de croissance est élevé et 10 % de l'énergie électrique pourraient être d'origine éolienne vers 2020 L'épuisement et la flambé des prix des énergies conventionnelles et leurs impact nocif sur l'environnement a conduit les chercheurs à s'orienter vers une nouvelle source d'énergie moins polluante et inépuisable notamment les énergies renouvelables et en particulier les éoliennes. Dans notre pays, les énergies renouvelables à leur tête l'énergie éolienne accusent un retard considérable par rapport aux autres nations voisines. Les études qui se font dans le domaine de l'éolien se comptent sur les bouts des doigts. Le but de ce travail est d'apporter une contribution à l'étude de systèmes de commande d'une éolienne relié au réseau ; pour ce faire notre choix s'est porté sur une éolienne à vitesse variable basée sur une génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP).

Ce choix est justifié par l'intérêt que la recherche consacre à ce type de structures vu qu'elles sont décrites comme étant les éoliennes de l'avenir. En effet le développement actuel dans le domaine des matériaux magnétiques a fait que l'inconvénient majeur de ces structures à savoir le prix des aimants permanents ne soit plus un obstacle pour construire des éoliennes gigantesques à base de génératrice synchrone à aimants permanents(GSAP), un objectif qui, des années avant, était impossible vu l'énorme prix des aimants permanents. Grâce au développement très rapide de l'électronique de puissance, offrant à la fois, une grande capacité, et une bonne qualité de puissance, avec le moindre coût; le domaine de l'énergie éolienne a connu une large utilisation des convertisseurs de puissance.

L'utilisation des convertisseurs de puissance dans le système de conversion d'énergie éolienne permet, non seulement, d'obtenir la forme souhaitée de l'énergie électrique, mais aussi d'optimiser la puissance prélevée [4]. Plusieurs Introduction générale 2 structures de conversion de l'énergie électrique fournie par la génératrice éolienne à vitesses variables peuvent être utilisées dans le but d'avoir une tension de fréquence et amplitude constants du coté réseau. Pour cela notre mémoire est partagé comme suit :

Dans le chapitre 1, on présentera brièvement l'état de croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne, dans le monde et surtout en Algérie. Puis les différents types des éoliennes et des

génératrices utilisées leur constitution, et les éléments principaux dans la chaîne de conversion électromécanique qui vont être modélisés pour donner au mieux représentation permettant la simulation du système. Nous dresserons une étude de l'état de l'art de la MSAP à travers une présentation de la topologie, un bilan de ces avantages et inconvénients. Ensuite le choix basé sur la GSAP est justifié et enfin une conclusion englobant l'état de l'art des éoliennes.

Dans le chapitre 2, on proposera une chaîne de conversion éolienne très récente, elle est jugée efficace point de vue extraction de l'énergie électrique et son acheminement vers le convertisseur côté réseau, une malléabilité de contrôle car elle est riche en électronique de puissance avec des multiples convertisseurs qui servent à contrôler le courant venant du générateur jusqu'à son arrivée au réseau de distribution; puis une modélisation de chaque élément de cette chaîne va être donnée afin de permettre d'aboutir à une commande convenable pour la GSAP.

Pour fonctionner, cette conversion a besoin des algorithmes de commande permettant au système d'avoir une bonne gestion. Il faut donc mettre des lois de commande pour piloter l'énergie entre les différents éléments de ce système.

Chapitre 1 :

Etat de l'art
sur le système
éolien

1.1.Introduction

Face à la flambée des prix du pétrole et l'épuisement, à plus ou moins long terme, des sources d'énergies fossiles, différentes solutions de substitution ont été envisagées. Le début du 21ème siècle a été marqué par une ruée spectaculaire vers les énergies renouvelables. L'ultime objectif est de s'affranchir de la dépendance vis-à-vis des sources conventionnelles d'énergies. Récemment, cette tendance a été accrue, d'autant plus, par des considérations d'ordre écologique. En effet, la consommation élevée des sources énergétiques fossiles traditionnelles cause de sérieux dommages environnementaux. Aussi, tous les pays sont appelés aujourd'hui à contribuer à l'effort international de lutte contre les changements climatiques.

L'énergie éolienne est connue et exploitée depuis longtemps. Elle fut l'une des premières sources exploitées par l'homme après l'énergie du bois. Sur le fleuve du Nil, cette énergie a été utilisée pour faire avancer les bateaux à voile, en Chine comme au Moyen-Orient pour le pompage d'eau et l'irrigation, en Iran et en Afghanistan dans le broyage des céréales [5]. Pendant plusieurs décennies, l'énergie éolienne a servi à produire de l'énergie électrique. Selon l'Observatoire des Energies Renouvelables, l'éolien est actuellement la filière énergétique des plus dynamiques dans le monde. Suite à la crise pétrolière mondiale des années 70, le développement et la commercialisation des turbines éoliennes ont été fortement encouragés. Depuis lors, l'exploitation des ressources éoliennes est de plus en plus performante et l'industrie éolienne a connu un essor considérable lors de la dernière décennie.

Les turbines éoliennes sont de plus en plus puissantes. Le rendement et la disponibilité augmentent et les parcs éoliens sont de plus en plus grands [6]. Pour utiliser le vent comme source d'énergie, il faut connaître le potentiel éolien d'une région. Mais, pour déterminer ce potentiel il faut passer par le traitement statistique des mesures de la vitesse du vent. Toutefois, une bonne connaissance des caractéristiques du vent en tout site est importante pour une exploitation adéquate des ressources éoliennes. En ce qui concerne l'Algérie, la ressource éolienne varie beaucoup d'un endroit à un autre, ceci est dû à une topographie et un climat très diversifiés. Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement aux éoliennes à vitesse variable et à axe horizontal avec leurs constitutions et leurs principes de fonctionnement, ainsi qu'aux différents types de générateurs utilisés dans cette chaîne de conversion.

1.2. Historique et croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne

Le vent, comme étant une source d'énergie traditionnelle non polluante, a été exploité depuis plusieurs siècles pour la propulsion des navires (avant 3000 ans environ), l'entraînement des moulins (environ 200000 moulins à vent en Europe vers le milieu du 19ème siècle), le pompage d'eau et le forgeage des métaux dans l'industrie. Ces dernières utilisations sont toutes basées sur la conversion de l'énergie du vent captée par des hélices en énergie mécanique exploitable, [08]. Ce n'est qu'après l'évolution de l'électricité comme forme moderne de l'énergie et les recherches successives sur les génératrices électriques, que le danois Poul La Cour a construit pour la première fois en 1891 une turbine à vent générant de l'électricité [09]. Après la fabrication du premier aérogénérateur, les ingénieurs danois ont amélioré cette technologie durant la 1ère et la 2ème guerre mondiale avec une grande échelle [08]. C'est principalement la crise pétrolière de 1974 qui relança les études et les expériences avec une échelle plus élevée, ce qui oblige plusieurs pays de commencer l'investissement pour améliorer et moderniser la technologie des aérogénérateurs. Parmi ces investissements.

Après ces années, le marché européen a réellement décollé, ce qui permet un développement important de cette industrie de l'éolienne et surtout dans des pays comme l'Allemagne, l'Espagne et le Danemark. Ces pays ont une contribution importante au marché mondial qui atteint 10000 MW en 1998 et environ 47000 MW en 2004 avec une croissance moyenne annuelle de 7500 MW [08]. Le coût global de l'énergie nécessaire à la production d'électricité à partir du vent est maintenant concurrentiel avec les sources d'énergie traditionnelles comme les combustibles fossiles. Cette réduction du coût de l'électricité est le résultat de progrès importants de la technologie utilisée par cette industrie (amélioration des conceptions aérodynamiques, amélioration des matériaux utilisés) [07]. Actuellement, l'énergie éolienne est bien implantée parmi les autres sources d'énergie avec une croissance très forte [07].

1.3. Définition de l'énergie éolienne :

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (Fig. 1.1) [10].



Fig 1.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent [10].

Le SCE (Système de Conversion Eolien) est constitué d'un générateur électrique, entraîné par une turbine éolienne à travers le multiplicateur, d'un système de commande, d'un convertisseur statique, d'un transformateur et enfin d'un réseau électrique. Selon la Fig. 1.2 [11].

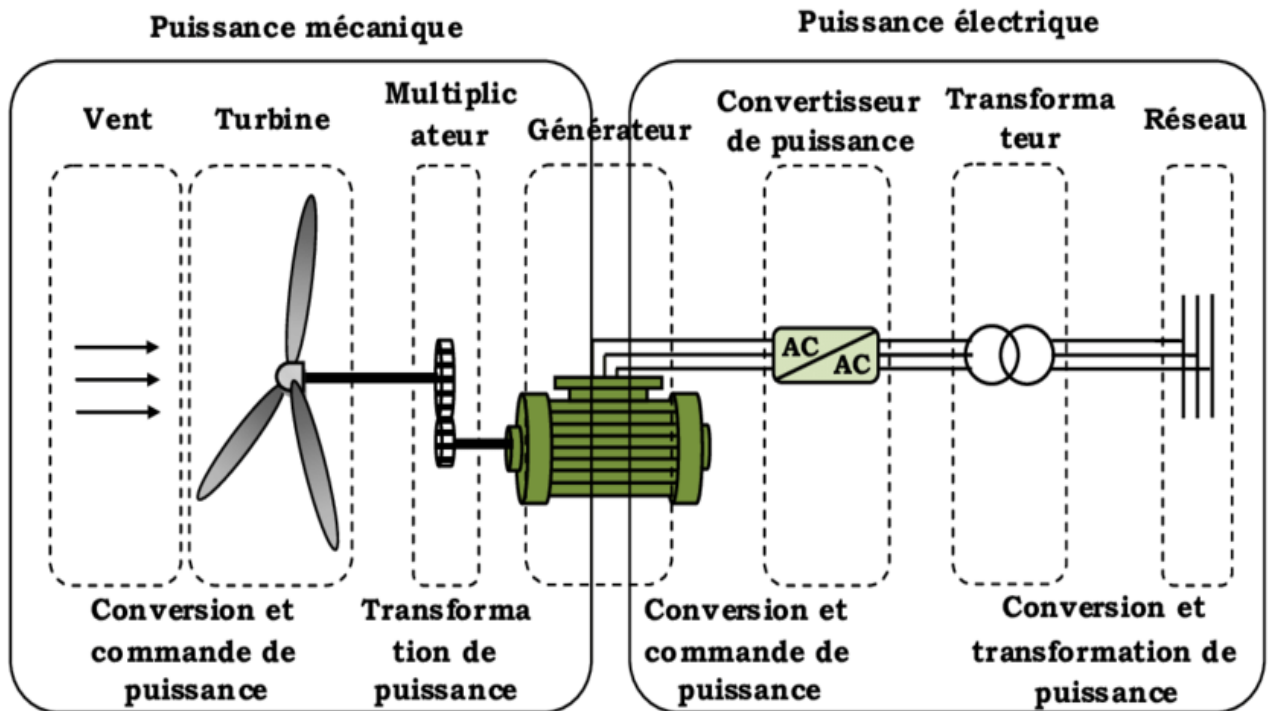


Fig. 1.2 : Principaux organes du système de conversion éolien [11].

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [10].

1.4. Les composants et le fonctionnement d'une éolienne :

La machine se compose de trois pales (en général) portées par un **moyeu constituant le rotor** et installées au sommet d'un **mât vertical**. Cet ensemble est fixé par une nacelle qui abrite un **générateur**. Un moteur électrique permet d'orienter le rotor afin qu'il soit toujours face au vent.

Les pales permettent de **transformer l'énergie cinétique du vent** (énergie que possède un corps du fait de son mouvement) en **énergie mécanique** (mouvement mécanique des pales). Le vent fait tourner les pales entre 10 et 25 tours par minute. La vitesse de rotation des pales dépend de leur taille : plus elles sont grandes, moins elles tournent rapidement.

Le générateur transforme l'énergie mécanique en énergie électrique. La plupart des générateurs ont besoin de tourner à grande vitesse (de 1 000 à 2 000 tours par minute) pour produire de l'électricité. Il faut donc d'abord que l'énergie mécanique des pales passe par un **multiplicateur** qui a pour rôle d'accélérer le mouvement de l'arbre lent de transmission, couplé aux pales, à l'arbre rapide couplé à la génératrice.

L'électricité produite par le générateur a une tension d'environ 690 volts. Ne pouvant pas être utilisée directement, elle est traitée grâce à un convertisseur, et sa tension est augmentée à 20 000

volts. Elle est alors injectée dans le réseau électrique et peut être distribuée aux consommateurs. [18]

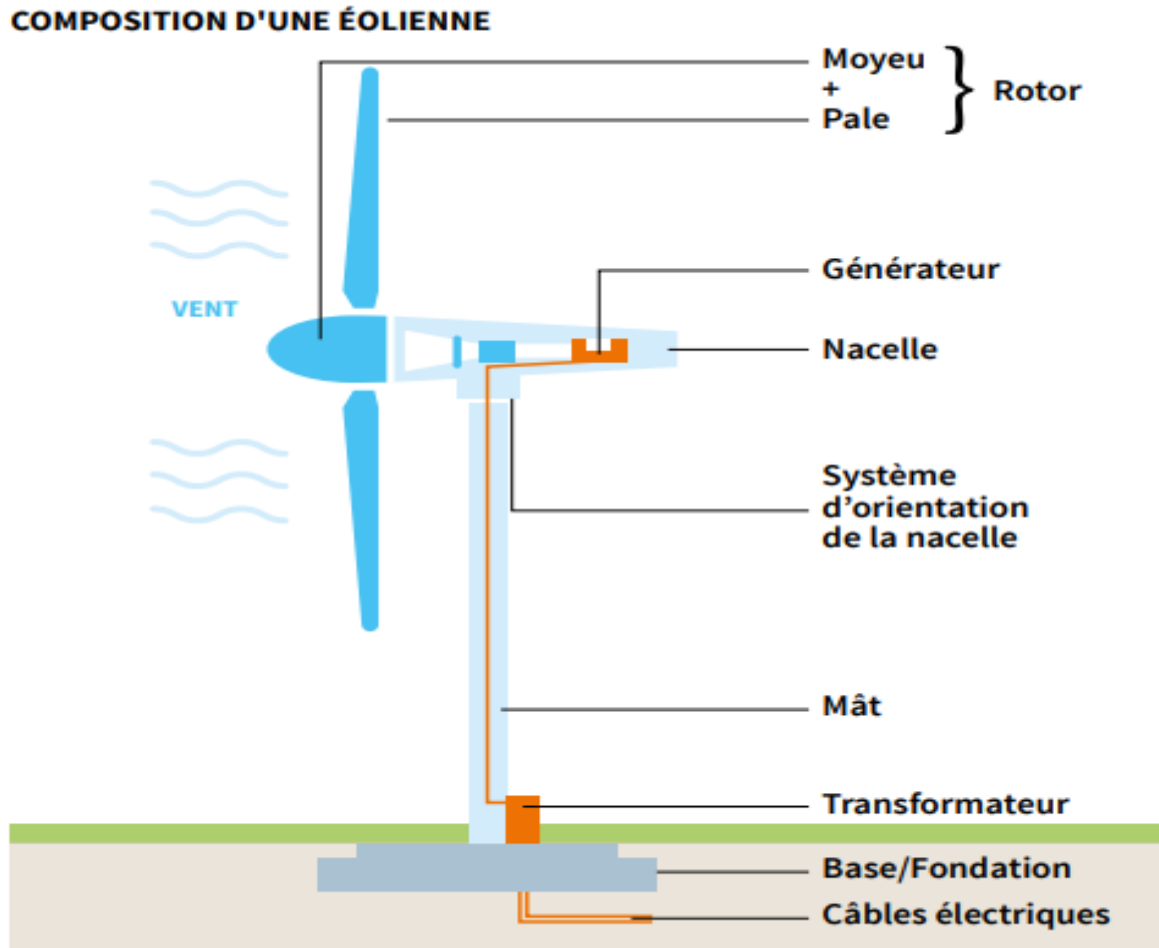


Fig 1.3 : composition d'une éolienne [18]

1.5.Zones de fonctionnement de l'éolienne :

Compte tenu des informations précédentes, la courbe de puissance convertie d'une turbine, généralement fournie par les constructeurs, qui permet de définir quatre zones de fonctionnement pour l'éolienne suivant la vitesse du vent :

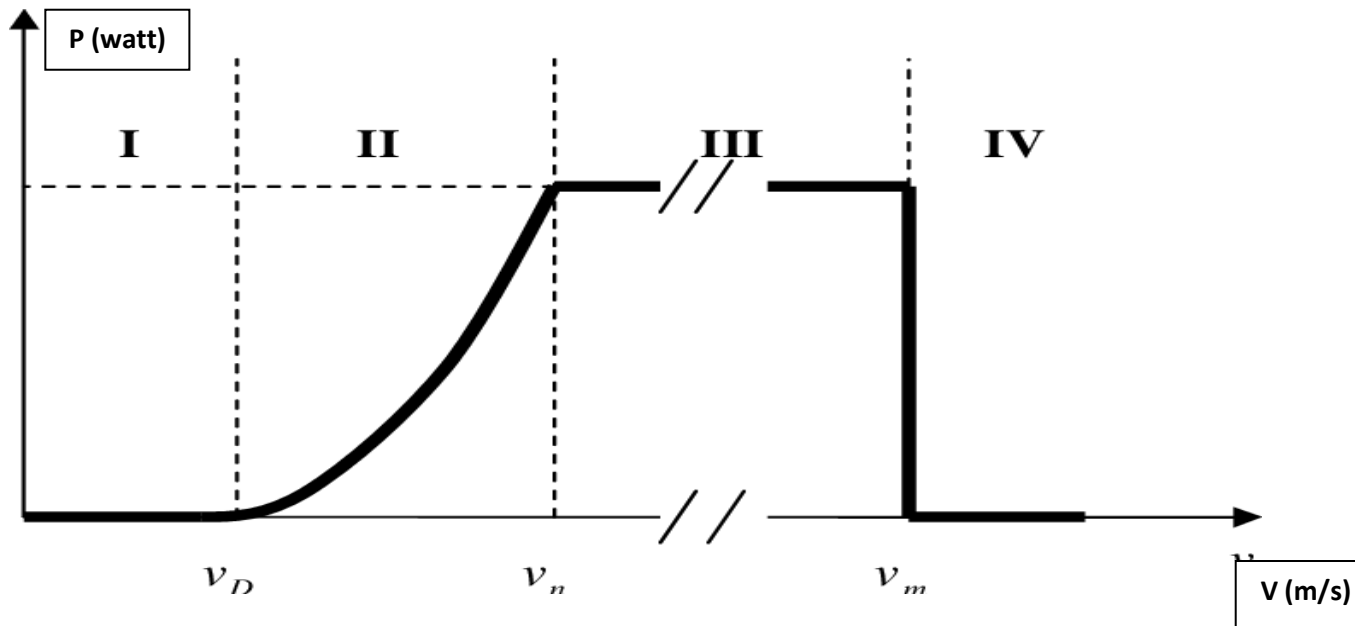


Fig. 1.4 : Courbe de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent.

[19]

v_D : La vitesse du vent correspondant au démarrage de la turbine. Suivant les constructeurs, v_D varie entre 2.5m/s et 4m/s pour les éoliennes de forte puissance ; **v_n :** La vitesse du vent pour laquelle la puissance extraite correspond à la puissance nominale de la génératrice. Suivant les constructeurs.

v_n : varie entre 11.5m/s et 15m/s en fonction des technologies ;

v_m : vitesse du vent au-delà de laquelle il convient de déconnecter l'éolienne pour des raisons de tenue mécanique en bout de pales. Pour la grande majorité des éoliennes, v_m vaut 25m/s.

Zone I : $v < v_D$: La vitesse du vent est trop faible. La turbine peut tourner mais l'énergie à capter est trop faible.

Zone II : $v_D < v < v_n$: Le maximum de puissance est capté dans cette zone pour chaque vitesse de vent. Différentes méthodes existent pour optimiser l'énergie extraite. Cette zone correspond au fonctionnement à charge partielle.

Zone III : $v_n < v < v_m$: La puissance disponible devient trop importante. La puissance extraite est donc limitée, tout en restant le plus proche possible de la puissance nominale de la turbine (P_n). Cette zone correspond au fonctionnement à pleine charge. Il existe quatre voies principales pour limiter la puissance éolienne dans le cas de fortes valeurs du vent. La première est une technique active assez coûteuse et complexe appelée système à pas variable « pitch » : elle est donc plutôt utilisée sur les systèmes à vitesse variable de moyenne à fortes puissances (quelques centaines de kW). Elle consiste à régler mécaniquement la position angulaire des pales sur leur axe ce qui permet de décaler dynamiquement la courbe du coefficient de puissance de la voilure. La seconde technique est passive « stall ». Elle consiste à concevoir la forme des pales pour obtenir un

décrochage dynamique du flux d'air des pales à fort régime de vent. Il existe aussi des combinaisons des deux technologies précédemment citées. La troisième façon de limiter la puissance est la déviation de l'axe du rotor dans le plan vertical (un basculement de la nacelle) ou une déviation dans le plan horizontal (rotation autour de l'axe du mat). Ainsi, la turbine n'est plus face au vent et la surface active de l'éolienne diminue [19].

Etat de l'art sur les générateurs utilisés dans le SCE La technologie des aérogénérateurs a énormément évoluée ces 20 dernières années entraînant une spécialisation des différents types d'éolienne [03]. Différents types de machines électriques peuvent être utilisés pour la génération de puissance éolienne. Des facteurs techniques et économiques fixent le type de machine pour chaque application. Pour les petites puissances (< 20 kW), la simplicité et le coût réduit des générateurs synchrones à aimants permanents (PMSG) expliquent leur prédominance. Dans les applications de plus forte puissance, jusqu'à 2 MW environ [20] le générateur asynchrone est plus courant et économique [20] [10]. Les générateurs habituellement rencontrés dans les éoliennes sont présentés dans les paragraphes suivants :

1.5.1. Systèmes utilisant la machine asynchrone :

Le générateur à induction est largement utilisé dans les turbines éoliennes de moyenne et grande puissance en raison de sa robustesse, sa simplicité mécanique et son coût réduit. Son inconvénient majeur est la consommation d'un courant réactif de magnétisation au stator [20].

1.5.2. Machine asynchrone à cage d'écureuil :

La génératrice asynchrone à cage d'écureuil qui équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde [01] [21]. La plupart des applications utilisant la machine asynchrone sont destinées à un fonctionnement en moteur (cela représente d'ailleurs un tiers de la consommation mondiale d'électricité), mais cette machine est tout à fait réversible et ses qualités de robustesse et de faible coût ainsi que l'absence de balais-collecteurs ou de contacts glissants sur des bagues la rendent tout à fait appropriée pour l'utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne [10] [21]. La caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à deux paires de pôles est donnée sur la Fig. 1.5 [10].

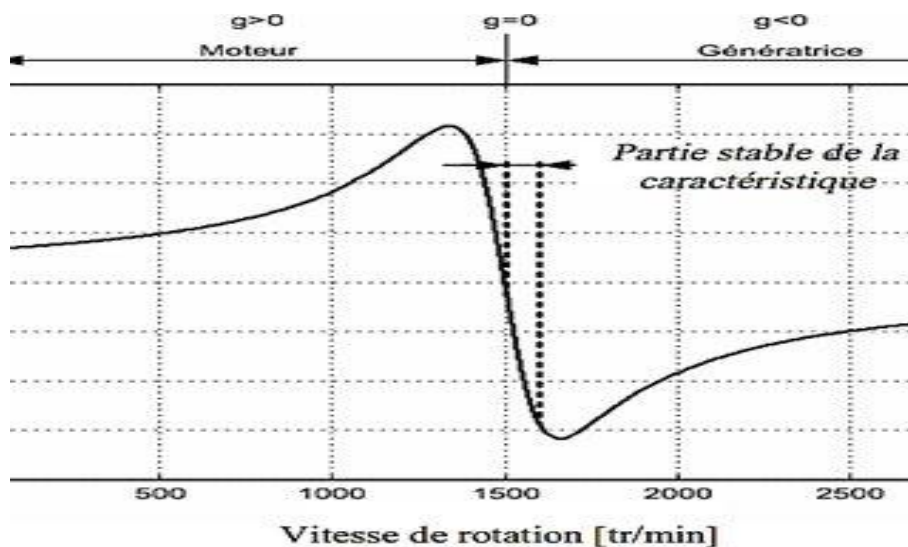


Fig 1.5 :Caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à 2 paires de pôles [10]

Pour assurer un fonctionnement stable du dispositif, la génératrice doit conserver une vitesse de rotation proche du synchronisme (point $g=0$), dans le cas de la caractéristique ci-dessus génératrice devra garder une vitesse comprise entre 1500 et 1600 tr/min [10] [21].

Le dispositif le plus simple et le plus couramment utilisé consiste à coupler mécaniquement le rotor de la machine asynchrone à l'arbre de transmission de l'aérogénérateur par l'intermédiaire du multiplicateur de vitesse et à connecter directement le stator de la machine au réseau (fig. 1.6) [21].

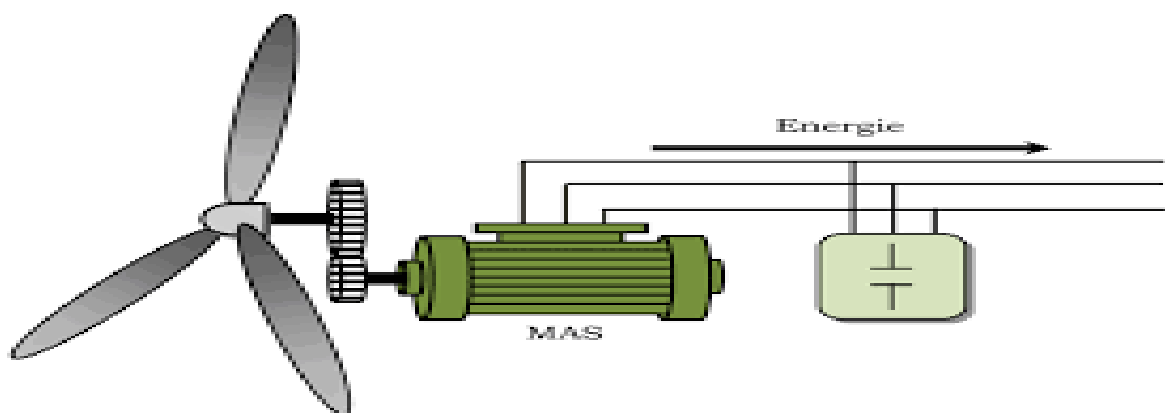


Fig 1.6 : Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau. [21]

La machine à un nombre de pair de pôles fixe et doit donc fonctionner sur une plage de vitesse très limitée (glissement inférieur à 2%). La fréquence étant imposée par le réseau, si le glissement devient trop important, les courants statoriques de la machine augmentent et peuvent devenir destructeurs [12].

La simplicité de la configuration de ce système (aucune interface entre le stator et le réseau et pas de contacts glissants) permet de limiter la maintenance sur la machine.

Ce type de convertisseur électromécanique est toutefois consommateur d'énergie réactive nécessaire à la magnétisation du rotor de la machine, ce qui détériore le facteur de puissance global du réseau, celui-ci peut être toutefois amélioré par l'adjonction de capacités représentées sur la Fig.1.19, qui deviennent la seule source de puissance réactive dans le cas d'un fonctionnement autonome de l'éolienne [12].

Par contre, cette configuration représente quelques inconvénients [04]:

- Il n'y a pas d'accès pour récupérer l'énergie induit dans le rotor ;
- Elle ne permet pas une vitesse variable ;
- Le courant débité au réseau est perturbé à cause la variation brusque du couple;

- Elle ne fonctionne en régime autonome qu'en présence des condensateurs ;

Une autre solution consiste à utiliser la génératrice asynchrone triphasée car la connexion de l'éolienne au réseau se fait par l'intermédiaire d'un dispositif électronique de puissance (Fig. 1.7) [12].

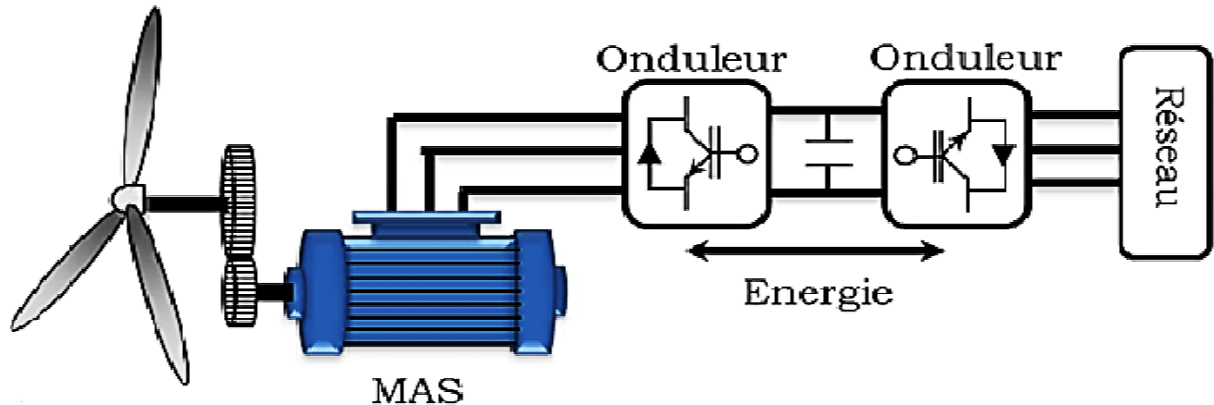


Fig. 1.7 : Eolienne connectée au réseau par l'intermédiaire de deux convertisseurs de puissance [22]

1.5.3. Machine Asynchrone à Double Stator [23]

Cette configuration d'éolienne, permet un point de fonctionnement à deux vitesses. On réalise un double bobinage au stator (Fig. 1.8) qui induit un nombre de paires de pôles variable et donc des plages de vitesses différentes. On peut imposer 2 vitesses de synchronisme par changement du nombre de pôles. D'une part, on a un stator de faible puissance à grand nombre de paires de pôles pour les petites vitesses de vent. En effet, la puissance est donnée par :

$$P_{mg} = C_{em} \cdot \Omega_s \quad (1.1)$$

P_{mg} : La puissance transmise par la génératrice, C_{em} Le couple électromagnétique, Ω_s : La vitesse de synchronisme, C : La pulsation du réseau et P : le nombre de paires de pôles. A : une faible puissance correspond une faible vitesse, la vitesse étant liée au nombre de paires de pôles par :

$$\Omega_s = \frac{\omega}{P} \quad (1.2)$$

A une faible vitesse correspond un nombre de paires de pôles élevé. D'autre part, on a un stator de forte puissance correspondant à une vitesse élevée et donc à faible nombre de paires de pôles pour les vitesses de vent élevées pour la connexion au réseau ont utilisé des commutateurs.

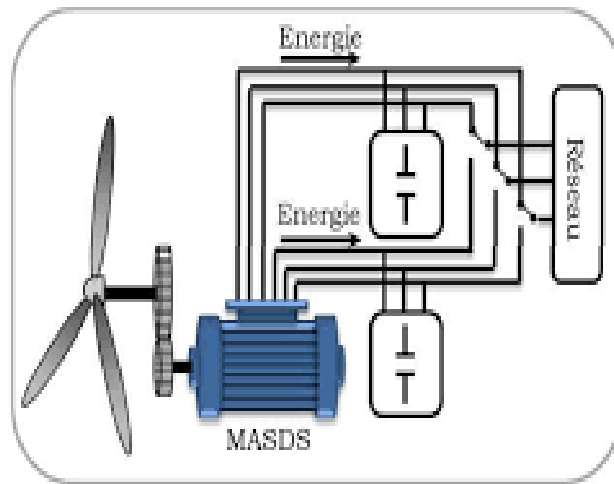


Fig 1.8 : Schéma de la connexion au réseau de l'éolienne avec la MAS à double stator [22]

Malgré sa simplicité et ses qualités de robustesse et son coût, la machine asynchrone à cage reste uniquement pour l'utilisation dans un système éolien, lorsqu'elle est directement connectée au réseau, la vitesse de rotation doit rester pratiquement constante de façon à ce que la machine reste proche de la vitesse de synchronisme. Cette restriction entraîne une efficacité réduite de l'éolienne aux vitesses de vent élevées.

Partant de ce constat, nous pouvons utiliser la machine asynchrone à double alimentation (MADA) comme alternative à la machine à cage.

1.5.4. Machine Asynchrone à Double Alimentation type "rotor bobiné" :

Ce type d'aérogénérateur s'est développé récemment car la double alimentation de machine asynchrone permet une meilleure exploitation du potentiel de l'éolienne [13]. Le stator est directement relié au réseau tandis que les grandeurs rotoriques sont commandées par un convertisseur statique (Fig. 1.9). La maîtrise de l'état électromagnétique de la machine par le rotor permet de fonctionner à la fréquence et l'amplitude nominales du réseau même si le rotor s'éloigne de la vitesse de synchronisme [04]. Le dimensionnement du convertisseur est proportionnel au glissement maximal du rotor, autrement dit, il dépend de l'écart maximal entre la vitesse de synchronisme et la vitesse réelle du rotor [01] [09]. La diminution de puissance du convertisseur statique permet la minimisation des composants de filtrage et de conversion, l'accroissement de la fiabilité de l'électronique, la diminution du coût de l'ensemble et l'amélioration de la qualité d'onde générée (grâce à la diminution de l'amplitude des courants commutés par le convertisseur et l'augmentation de la fréquence de hachage) [04]. Ces machines sont un peu plus complexes que des machines asynchrones à cage avec lesquelles elles ont en commun de nécessiter un multiplicateur de vitesse [10].

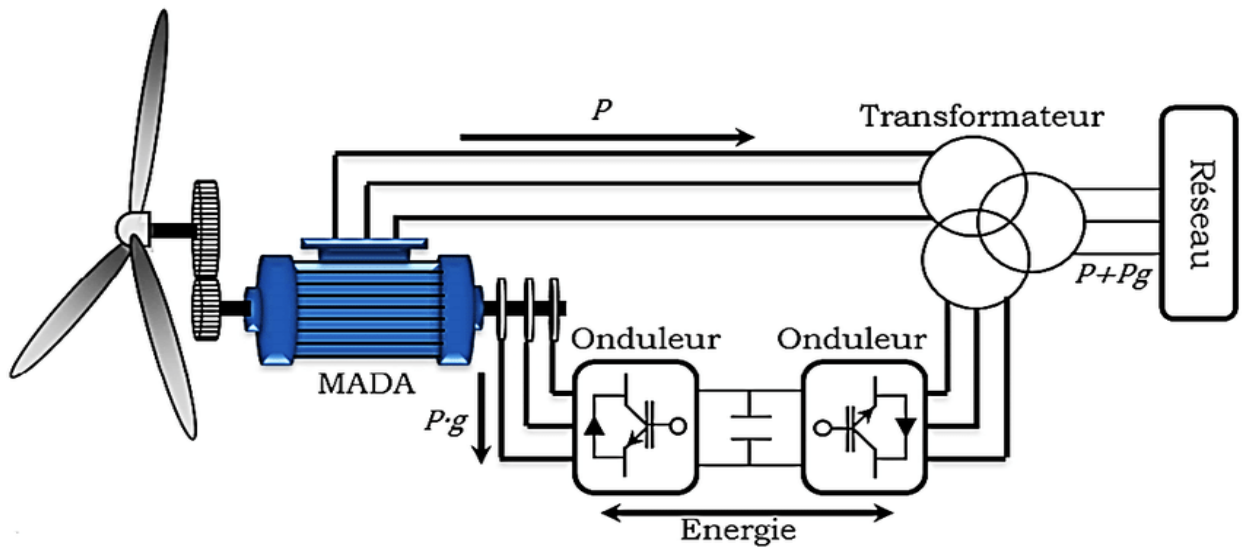


Fig. 1.9: schéma de principe d'une machine asynchrone pilotée par le rotor.

[22]

1.7. Le résumé des points forts de la MADA sont [09] :

- Sa capacité de commander la puissance réactive et, de cette façon, de découpler la commande des puissances active et réactive.
- Il peut se magnétiser à partir du rotor sans prélever au réseau la puissance réactive nécessaire.
- Il est capable d'échanger de la puissance réactive avec le réseau pour faire la commande de tension.
- La taille du convertisseur n'est pas simplement en rapport avec la puissance totale du générateur, mais aussi avec la gamme de vitesse choisie. En fait, le coût du convertisseur augmente avec la gamme de vitesse autour de la vitesse de synchronisme. Son inconvénient réside dans la présence obligatoire de bagues et balais.

Il existe plusieurs technologies de la machine asynchrone à double alimentation et plusieurs dispositifs d'alimentation sont envisageables. Chaque structure a ses inconvénients et ses avantages [12].

(a) MADA – structure de Kramer

Cette configuration à vitesse variable est représentée sur la Fig. 1.10, le stator est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un redresseur et un onduleur est placé en sortie du redresseur. L'ensemble redresseur-onduleur est alors dimensionné pour une fraction de la puissance nominale de la machine [16].

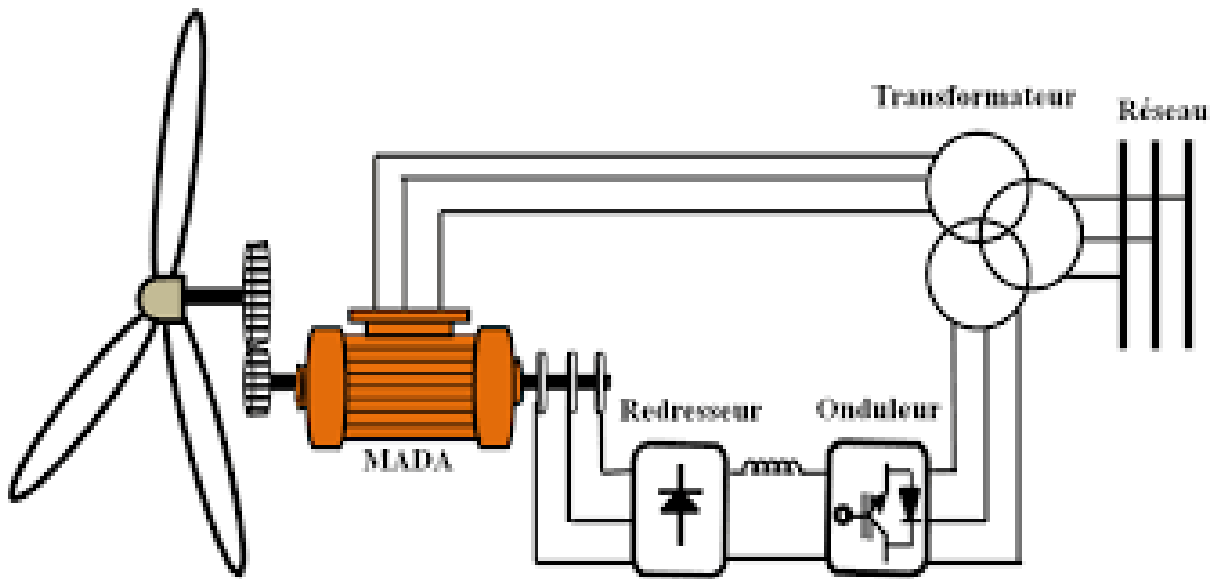


Fig. 1.10: MADA - structure Kramer [01].

(b) MADA à énergie rotorique dissipée :

La Fig. 1.11 représente cette configuration avec le stator connecté directement au réseau et le rotor connecté à un redresseur. Une charge résistive est alors placée en sortie du redresseur par l'intermédiaire d'un hacheur à IGBT ou GTO. Le contrôle de l'IGBT permet de faire varier l'énergie dissipée par le bobinage torique et de fonctionner à vitesse variable en restant dans la partie stable de la caractéristique couple/vitesse de la machine asynchrone [16].

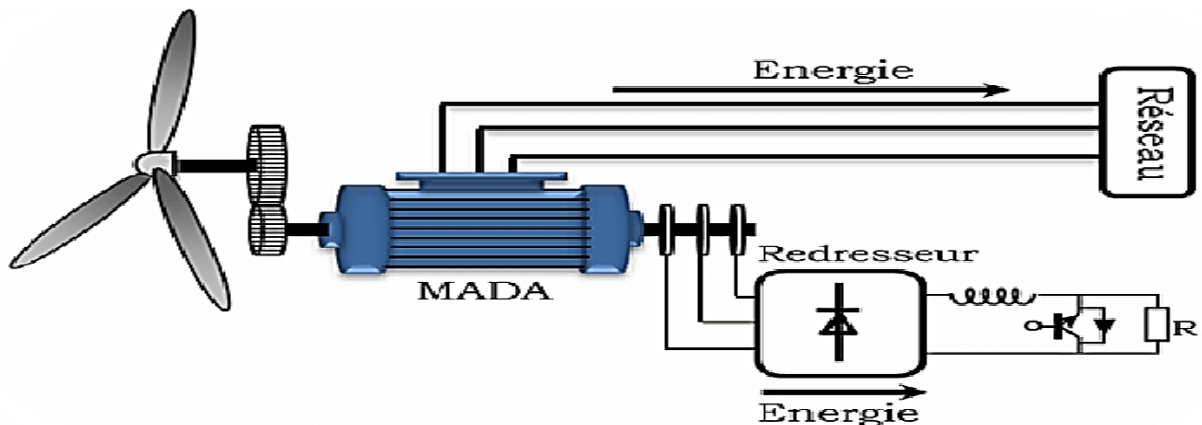


Fig 1.11: MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée [16]

Si le glissement devient important, la puissance extraite du rotor est élevée et elle est entièrement dissipée dans la résistance R, ce qui nuit au rendement du système. De plus cela augmente la puissance transitant dans le convertisseur ainsi que la taille de la résistance.

Le fabricant "VESTAS" dans son dispositif "OPTI-SLIP" a mis en œuvre ce système en utilisant des composants qui tournent avec le rotor et une transmission optique des signaux de commande. Les contacts glissants sont ainsi évités. La variation maximale du glissement obtenue dans ce procédé est de 10% [01].

(c) MADA – structure de « Scherbius» avec cycloconvertisseur :

Quand on remplace l'association redresseur - onduleur par un cycloconvertisseur (Fig. I.26) pour autoriser un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, l'ensemble est alors appelé « structure de Scherbius ». La plage de variation de vitesse est doublée par rapport à la structure de la Fig. I.24 [16].

1.8. Les différents types des turbines éoliennes :

On peut partager les éoliennes en deux grandes familles selon la disposition géométrique de l'arbre : celles à axe vertical (VAWT: Vertical Axis Wind Turbine) et celles à axe horizontal (HAWT: Horizontal Axis Wind Turbine) :

1.8.1. L'éolienne à axe verticale : Ce type de machines est les premières à être utilisées pour capter l'énergie éolienne, car elles sont d'une conception beaucoup plus simple que celle à axe horizontale[14], Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles[15] , Elle ne nécessite pas de système d'orientation des pales par rapport à la direction du vent[14], De nos jours, ce type d'éoliennes est plutôt marginal et son utilisation est beaucoup moins répandue[16] , Des problèmes d'aéroélasticité et la grande occupation du sol ont été les raisons de cet abandon au profit des éoliennes à axe horizontale[17]



fig 1.12 Eolienne a axe verticale[17]

1.8.2.L'éolienne a axe horizontal : Les éoliennes à axe horizontal sont les plus employées car leur rendement aérodynamique est supérieur à celui des éoliennes à axe verticale, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et ont un cout moins important[16] , elle fonctionne selon le principe des moulins à vent , Elles comportent généralement des hélices à trois pales[17] , les tripales constituent un bon compromis entre le coefficient de puissance, le cout et la vitesse de rotation du capteur éolien ainsi que l'aspect esthétique par rapport aux bipales [16].



fig 1.13 : éolienne horizontale[16]

Les éoliennes peuvent être classées aussi en trois catégories selon leur puissance nominale comme il est indiqué sur le tableau suivant:

Tableau : les catégories des éoliennes selon leur puissance

Echelle	Diamètre des pales	Valeurs de puissance
Petite puissance	<12m	<40KW
moyenne puissance	12 à 45m	40KW à 1 MW
grande puissance	>45m	>1MW

1.9. Production mondiale d'électricité éolienne :

En cinq ans, la puissance éolienne installée a été multipliée par trois dans le monde, passant de 121 GW à 319 GW. La capacité éolienne a augmenté de 197 GW de 2008 à 2013 alors que la capacité nucléaire n'a pas augmenté (371,5 GW fin 2008 et 371,7 GW fin 2013). Les pays précurseurs dans le monde ont été le Danemark, l'Allemagne et l'Espagne. Récemment, la Chine et les États-Unis sont devenus les pays possédant la plus grande capacité éolienne installée, précédant l'Allemagne et l'Espagne qui restent cependant les pays disposant de la plus grande puissance éolienne par habitant avec le Danemark.

Tableau 1.1 : Puissance éolienne installée dans le monde de 2001 à la fin de 2013 (en MW)

	EU 27	Etats-Unis	Canada	Chine	Inde	Japon	Monde
2000	12 950	2 500	150	340	1 200	150	17 700
2003	28 700	6 400	320	640	2 100	570	39 400
2008	65 170	25 240	2 360	12 100	9 600	1 880	121 000
2009	75 100	35 100	3 300	25 800	10 900	2 100	158 900
2010	84 950	40 290	4 000	44 500	13 060	2 330	197 700
2011	94 040	46 920	5 260	62 360	16 080	2 540	237 800
2012	106 800	60 010	6 200	75 300	18 400	2 610	283 400
2013	117 700	61 100	7 800	91 400	20 150	2 660	318 600

1.10. Futurs challenges et perspectives mondiales :

Sur la base de l'expérience et des taux de croissance des années passées [12] prévoit que l'énergie éolienne continuera son développement dynamique dans les années à venir. Malgré les impacts à court terme de la crise financière actuelle qui rendent difficile les prévisions à court terme, on peut attendre, qu'à moyen terme, l'énergie éolienne attirera les investisseurs grâce à son faible risque et au besoin d'énergie propre et fiable. De plus en plus de gouvernements comprennent les bénéfices multiples de l'énergie éolienne et mettent en place des politiques favorables, incluant la promotion des investissements décentralisés par des producteurs indépendants, petits, moyens ou basés sur des communautés, tous ouvrant la voie vers un système de production d'énergies davantage renouvelables pour le futur [11]. En calculant rigoureusement et en prenant en compte des facteurs d'insécurité, on estime que l'énergie éolienne sera capable de contribuer en 2020 à au moins 12% de la consommation électrique mondiale [11]. En 2015, une capacité totale de 600 000 MW est possible. Fin 2020, au moins 1 500 000 MW peuvent être attendus [13].

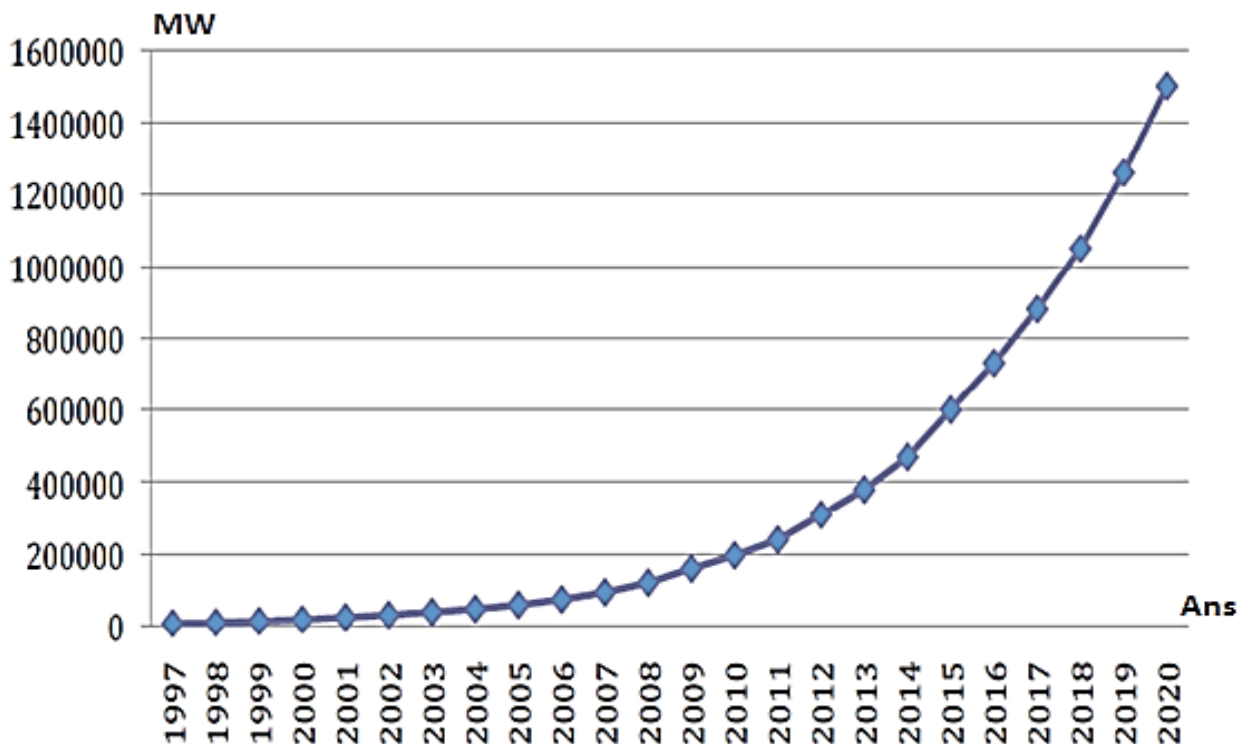


Fig 1.14: L'énergie éolienne mondiale (MW) [13].

1.11. Énergie éolienne en Algérie

1.11.1. Gisement éolien en Algérie

Selon quelques évaluations, plus de cinq millions d'algériens ne sont pas raccordés au réseau d'électricité, alors que beaucoup de communautés rurales ont besoin d'eau potable et d'eau pour irrigation. Ces besoins ruraux représentent un marché potentiel pour des technologies d'énergie renouvelable. L'Algérie s'engage avec détermination sur la voie des énergies renouvelables afin d'apporter des solutions globales et durables aux défis environnementaux et aux problématiques de préservation des ressources énergétiques d'origine fossile. Ce choix stratégique est motivé par l'immense potentiel en énergie solaire. Cette énergie constitue l'axe majeur du programme qui

consacre au solaire thermique et au solaire photovoltaïque une part essentielle. Le solaire devrait atteindre d'ici 2030 plus de 37 % de la production nationale d'électricité. Malgré un potentiel assez faible, le programme n'exclut pas l'éolien qui constitue le second axe de développement et dont la part devrait avoisiner les 3 % de la production d'électricité en 2030. Actuellement, l'intérêt sur l'énergie éolienne en Algérie a connu une certaine croissance et de nombreuses études ont été réalisées sur le potentiel éolien depuis 1984 avec les travaux de Saïd et al. Suivis par les travaux de Bensaâd, 1985, Hammouche, 1990, Kasbadji Merzouk, 2000 et 2006, Youcef Ettoumi, 2002, et Chellali, 2011.

I.3.2 Carte des vents en Algérie L'estimation de l'énergie éolienne disponible dans une région donnée reste l'une des étapes les plus importantes avant une éventuelle implantation d'un parc éolien. Pour cela, il faut d'abord quantifier le gisement énergétique disponible par l'établissement de l'atlas éolien de la région. On peut citer quelques travaux effectués pour tracer l'Atlas du vent en Algérie. En 2000, la carte des vents a été tracée par Kasbadji-Marzouk en utilisant les données répertoriées en 1990 par Hammouch . En 2011, Chellali et al. ont contribué à l'actualisation de la carte des vents en utilisant 37 points de mesure à travers le pays [02]

1.11.2. Carte des vents en Algérie

L'estimation de l'énergie éolienne disponible dans une région donnée reste l'une des étapes les plus importantes avant une éventuelle implantation d'un parc éolien. Pour cela, il faut d'abord quantifier le gisement énergétique disponible par l'établissement de l'atlas éolien de la région. On peut citer quelques travaux effectués pour tracer l'Atlas du vent en Algérie. En 2000, la carte des vents a été tracée par Kasbadji-Marzouk en utilisant les données répertoriées en 1990 par Hammouch . En 2011, Chellali et al. ont contribué à l'actualisation de la carte des vents en utilisant 37 points de mesure à travers le pays [02].

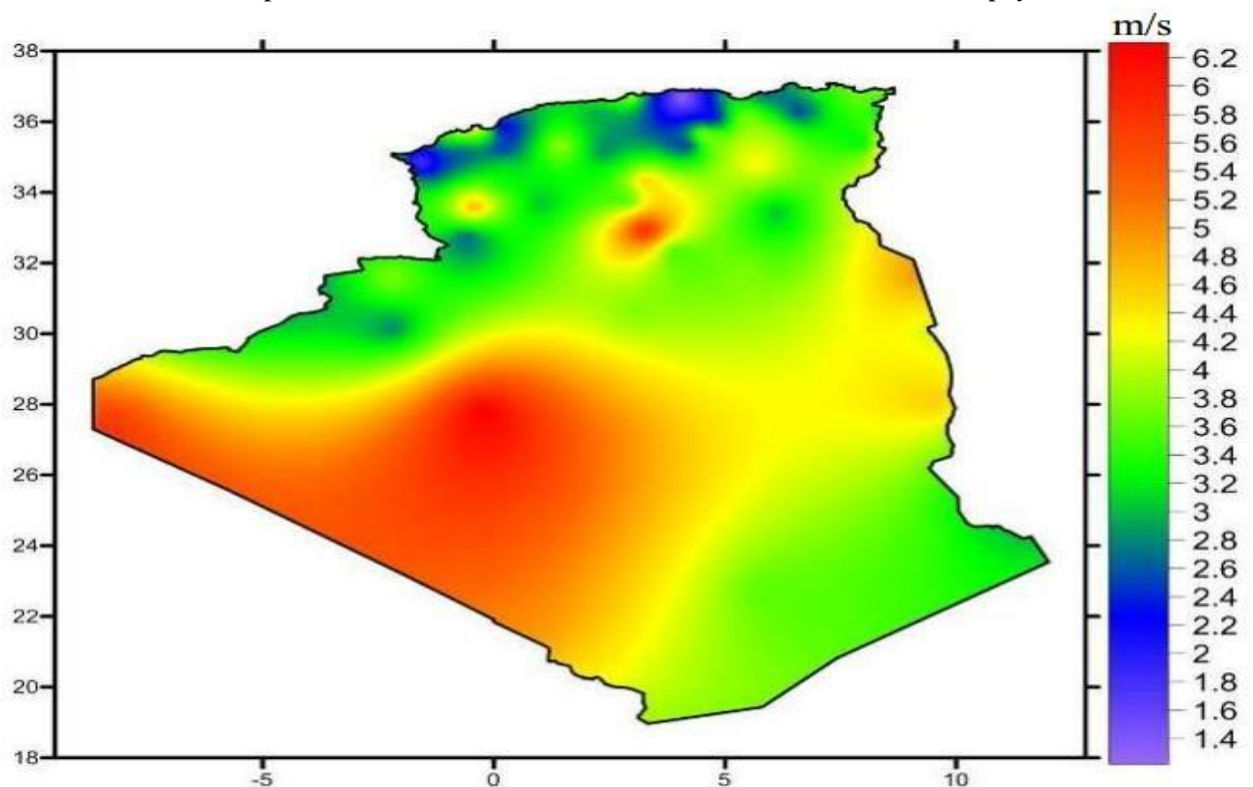


Fig1.15 : Carte annuelle des vents à 10 m du sol pour les 87 points de mesure (m/s) [02]

Selon la cartographie représentée à la figure 1.15., le gisement éolien en Algérie est très diversifié. Il varie d'une zone à une autre, mais on peut dire que le meilleur potentiel d'énergie éolienne est dans le sud du pays et particulièrement dans la région du sud-ouest où la vitesse du vent est plus grande que 6 m/s.

1.11.3.Capacité de production de l'énergie éolienne installée en Algérie

La première éolienne qui a été installée en Algérie revient à la période de la colonisation française, en 1953 par «le Service de la Colonisation et de l'Hydraulique» relevant des militaires, qui contrôlaient les territoires du sud algérien. Actuellement, elle existe à l'intérieur de la station de l'Institut National de Recherche Agronomique (INRA) d'Adrar. Constitué d'un mat de 24 m surmonté d'une hélice à trois pales d'un diamètre de 15 m.



Fig 1.16 : la première éolienne installée en Algérie

Jusqu'à maintenant, la puissance extraite à partir des énergies renouvelables installée en Algérie est insignifiante, au moins par rapport à ses voisins (le Maroc et la Tunisie). L'énergie constitue l'axe majeur du programme qui consacre au solaire thermique et au solaire photovoltaïque une part essentielle. Le programme est lancé à la fin de l'année 2011 et supposé générer 22 GW en 2030. Malgré un potentiel assez faible, le programme n'exclut pas l'éolien qui constitue le second axe de développement et dont la part devrait avoisiner les 3% (1,7 GW) de la production d'électricité en 2030. Il est clair donc que l'énergie éolienne constitue un second axe de développement des énergies renouvelables en Algérie, (après le solaire). Dans ce cadre, la wilaya d'Adrar a bénéficié, à la faveur d'un partenariat algéro-français, d'un projet de ferme de 12 éoliennes de 850 kW chacune, localisée dans la zone de Kabertene (80 km au nord d'Adrar). Les éoliennes fournies par l'Espagnol Gamesa délivrent leurs 10 MW de puissance à la vitesse de 8 m/s du vent. Ces éoliennes sont connectées au réseau de transport. Par ailleurs, des études seront menées pour identifier les emplacements favorables afin de réaliser d'autres projets sur la période 2016-2020. À cet effet, ce programme consiste en l'acquisition de 10 stations de mesure météorologique.

Globalement, l'objectif de la première phase de programme est de parvenir à un taux d'intégration de 50%. Ce taux devrait être supérieur à 80% sur la période 2021-2030, grâce à l'extension des capacités de fabrication des mâts et des rotors d'éoliennes et le développement d'un réseau de soustraction nationale pour la fabrication des équipements de la nacelle .



Fig 1.17: la ferme éolienne de Adrar

1.12. Les avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :

1.12.1. Les avantages :

Il est considéré comme une énergie renouvelable

- plus bas coût par rapport au nucléaire
- Une source d'énergie qui ne provoque pas de pollution
- C'est une solution efficace pour alimenter les zones reculées avec l'énergie
- la facilite de monter et démonter Les parcs éoliens

1.12.2. Inconvénients :

- le Mouvement du vent aléatoire les aérogénérateurs produits une qualité de puissance n'est pas toujours très bonne.
- Le bruit et impact visuel produit par les aérogénérateurs peut être dérangeant
- Les parcs éoliens besoin des grandes surfaces
- intervention électromagnétiques

1.13. Applications de l'énergie éolienne :

- Production de l'énergie électrique
- Utilisé pour déplacer des navires et des voiliers
- Utilisé pour moudre la farine
- Faire des activités sportives

- Le pompage de l'eau

1.14.Les avantages et inconvénients des axes :

1.14.1.Les avantages de l'éolienne à axe horizontal :

- Choix plus large
- Installateurs compétents
- Technologie éprouvée
- Le prix
- Un bon rendement

1.14.2.Les inconvénients de l'éolienne à axe horizontal :

- Nuisances sonores éventuelles
- Emprise au sol du mat si haubanage
- Mauvais rendement avec des vents turbulents
- Doit être orienté selon les vents
- Fonctionnement par intermittence

1.14.3.Les avantages de l'éolienne à axe vertical :

- Faible encombrement (selon les modèles)
- Peut être intégrée aux bâtiments
- Démarre avec des vents faibles .
- Ne nécessite pas de système d'orientation.
- Bon comportement aux vents turbulent.

1.14.4.Les inconvénients de l'éolienne à axe vertical :

- Le prix
- Poids peut être important
- Faible

1.15. Conclusion :

Ce chapitre nous a permis de dresser un panel de solutions électrotechniques possibles pour la production d'énergie électrique grâce à des turbines éoliennes. Après un rappel de notions nécessaires à la compréhension du système de conversion de l'énergie éolienne, différents types d'éoliennes et leur mode de fonctionnement ont été décrits. Et par la suite des machines électriques et leurs convertisseurs associés, adaptables à un système éolien ont été présentés. Deux grandes familles de machines sont présentées : machines asynchrones, machines synchrones. Pour le fonctionnement connecté sur un réseau, nous avons vu qu'il était important que la génératrice puisse fonctionner à vitesse variable et que la présence de convertisseurs entre la génératrice et le réseau nuisait au rendement global de l'installation.

CHAPITRE 2 :

**Modélisation de
système d'énergie
renouvelable étudié**

2.1.Introduction :

Dans le deuxième chapitre, nous avons proposé le concept de chaîne éolienne complète. La modélisation de l'éolienne exige la modélisation du vent, du comportement aérodynamique des pales, du générateur électrique, du convertisseur de puissance lie du système de commande [37]. Ce chapitre est composé de:

- * Une première partie est consacrée à la modélisation de la partie mécanique de l'éolienne, et où le modèle du vent et son évolution seront étudiés de façon détaillées, [39] [38].
- * La deuxième partie est consacrée à la modélisation de la machine synchrone à aimant permanent, et on terminera cette partie par une simulation de ces configurations (MSAP et turbine) en fonctionnement générateur [21] [40] [41] [42].

2.2.MODELISATION DES COMPOSANTS DU SYSTEME EOLIEN :

L'architecture complète du système étudié dans le cadre de ce travail est illustrée dans la Figure 2.1. Tous ses composants seront modélisés par la suite.

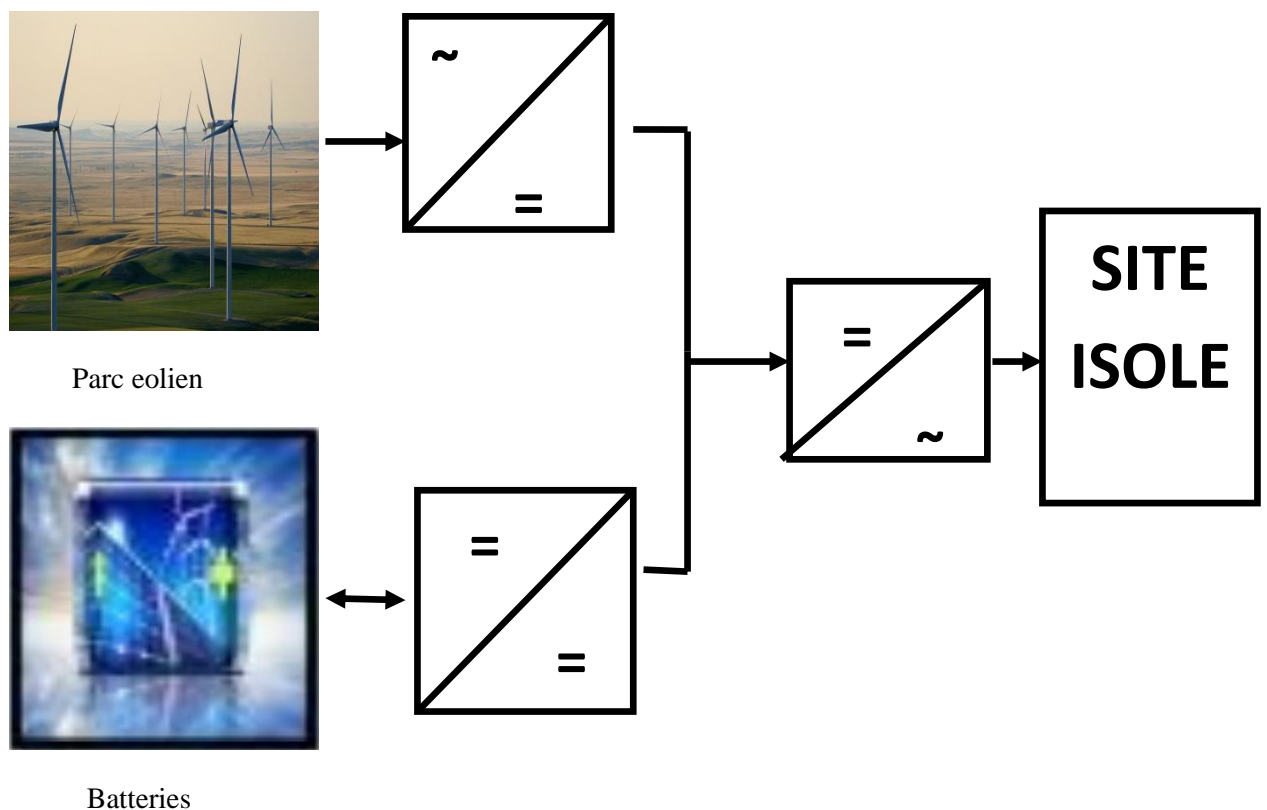


Schéma 2.1 : Schéma de principe de système éolien

2.3. Modélisation du système éolien :

Les éoliennes convertissent l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, puis en électricité. Les pales du rotor éolien captent une partie de l'énergie contenue dans le vent et

la transfèrent au moyeu qui est fixé sur l'arbre de l'éolienne. Celui-ci transmet ensuite l'énergie mécanique au générateur électrique. En général, la transmission de puissance entre le moyeu et le générateur électrique est réalisée à travers un multiplicateur de vitesse de rotation.

2.3.1. Conversion aérodynamique :

Supposons que la turbine éolienne comprend trois pâles de longueur R , fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse Ω_t qui entraîne un générateur électrique, comme le montre la figure 2.2.

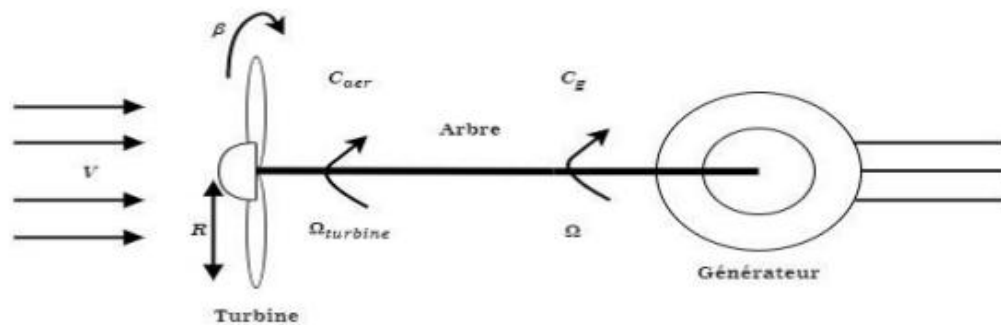


Fig 2.2: Schéma de la turbine éolienne. [24]

Le rotor éolien est un système de conversion d'énergie qui transforme l'énergie cinétique des masses d'air en mouvement en énergie mécanique disponible sur l'arbre. Cette énergie cinétique est proportionnelle à la masse d'air qui se déplace à une vitesse donnée.

L'extraction de l'énergie se fait donc par un ralentissement de l'air qui traverse le rotor et par un mécanisme de transformation des forces agissant sur les pales. Schématiquement, il en résulte que, selon les principes de la mécanique des fluides, la veine fluide traverse le moteur éolien en s'élargissant [24] (Figure 2.3).

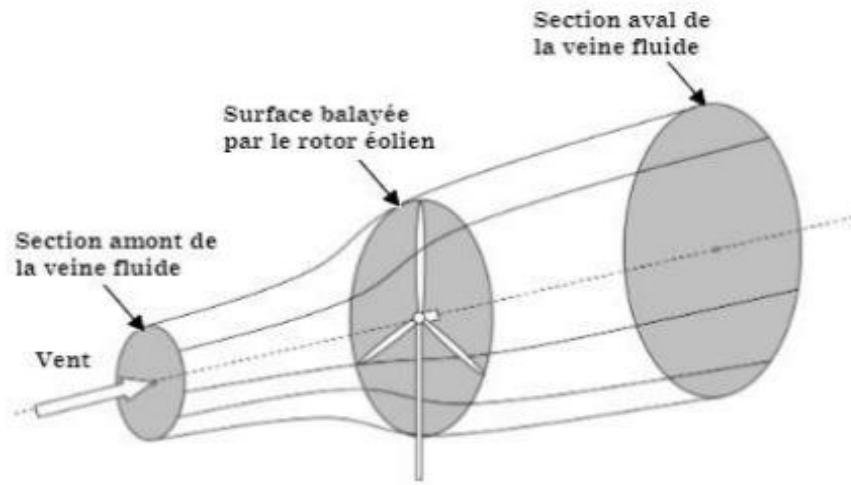


Fig 2.3: Veine fluide traversant le rotor éolien. [25]

Le comportement aérodynamique du rotor éolien peut être décrit par la théorie du disque actuateur [25] [26], en considérant que l'air est incompressible, que le fluide s'écoule de manière continue et que les grandeurs étudiées ont la même valeur sur une section donnée du tube de courant d'air [27].

En fonction de la vitesse du vent, de la densité de l'air et de la section de la surface active S de la voilure, la puissance de la masse d'air est exprimée par [28] :

$$P_r = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V^3 \quad (2.1)$$

La puissance du vent n'est pas totalement captée par les pâles, ce qui implique que la puissance aérodynamique est inférieure à celle du vent. Les deux puissances sont liées par l'expression suivante :

$$P_{ecr} = P_r \cdot C_p = \left(\frac{1}{2} \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V^3 \right) \cdot C_p \quad (2.2)$$

C_p (le coefficient de la puissance) dépend de l'angle d'inclinaison des pâles β et du rapport de vitesse spécifique λ . Ce coefficient présente un maximum de 0,59 (16/27) appelé limite de Betz. Il est donné par la relation :

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left(C_2 \frac{1}{\lambda_i} - C_3 \beta - C_4 \right) \exp\left(\frac{-C_5}{\lambda_i}\right) + \lambda C_6 \quad (2.4)$$

$$C_1 = 0.5176, C_2 = 0.116, C_3 = 0.4, C_4 = 0.5, C_5 = 0.21, C_6 = 0.0068$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{1 + \beta^3} \quad (2.5)$$

$$\lambda = \frac{\Omega_J R}{V} \quad (2.6)$$

Le couple éolien est donné par l'expression suivante :

$$C_{ecr} = \frac{P_{ecr}}{\Omega_J} = \left(\frac{1}{2} \rho \cdot \pi \cdot R^2 V^3 C_p \right) \frac{1}{\Omega_J} \quad (2.7)$$

Les détails du bloc modélisant le couple développé par la turbine éolienne sont présentés dans

la Figure 2.4.

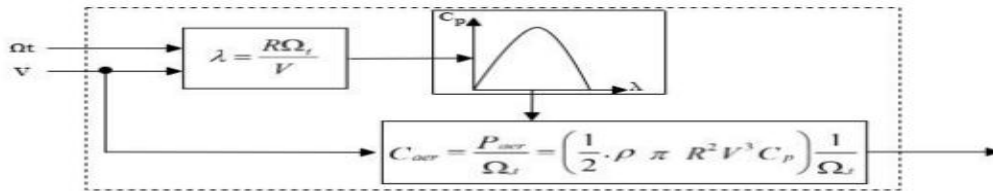


Fig 2.4 : Modélisation du couple éolien

2.3.2. Transmission :

Tous les éléments de la transmission, c'est-à-dire l'arbre lent côté rotor éolien, le multiplicateur et l'arbre rapide côté générateur, sont inclus dans le bloc (Transmission)

L'équation fondamentale de la dynamique qui caractérise le comportement mécanique de l'ensemble turbine et génératrice est donnée par l'équation suivante :

$$J \frac{d\Omega_{méc}}{dt} = C_{méc} \quad (2.8)$$

J est l'inertie totale ramenée sur l'arbre du générateur. Elle est donnée par :

$$J = \frac{J_t}{G^2} + J_g = J_t + J_g \quad (2.9)$$

J_t est l'inertie de la turbine,

G est le gain du multiplicateur égal à 1,

J_g est l'inertie de la génératrice.

A noter que le moment d'inertie de la génératrice peut être négligé devant l'inertie de la turbine.

Le couple mécanique $C_{méc}$ prend en compte le couple issu du multiplicateur C_G , le couple électromagnétique C_{em} produit par la génératrice et le couple des frottements visqueux C_r :

$$C_{méc} = C_G - C_{em} - C_r \tag{2.10}$$

Le couple de frottement est donnée par :

$$C_r = f \Omega_{méc} \tag{2.11}$$

2.3.3. Modèle de la machine synchrone à aimants permanents :

Grâce aux nombreux avantages de la machine synchrone à aimants permanents (MSAP), nous nous sommes intéressés à son utilisation dans notre système. Généralement, le générateur synchrone à aimants permanents (GSAP) est modélisé par une source de tension avec une impédance en série. Le circuit équivalent et le diagramme vectoriel sont exposés dans la figure 2.5 [29] [30].

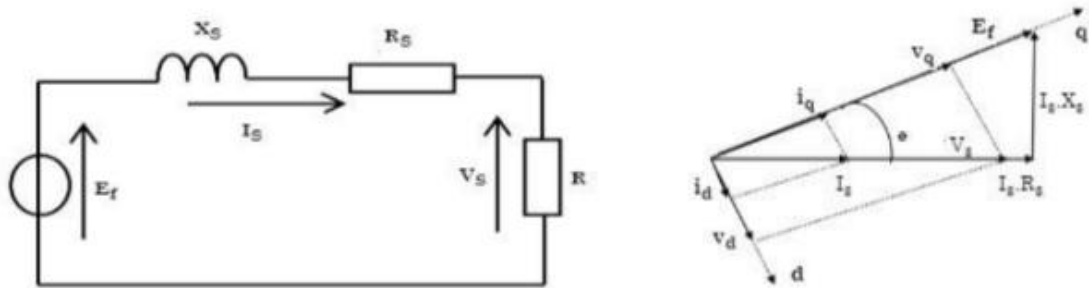


Fig 2.5 : Schéma équivalent du GSAP et le diagramme vectoriel associé.

Le modèle dynamique de la GSAP décrite dans le repère d'axe d-q est le suivant [29]:

$$\begin{cases} v_q = -R_s i_q - L_q s i_q - \omega_c L_q i_d + \omega_c \phi_c \\ v_d = -R_s i_d - L_d s i_d - \omega_c L_d i_q \\ T_c = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\phi_c i_q + (L_d - L_q) i_q i_d) \end{cases} \tag{2.12}$$

et :

L_q, L_d : sont les inductances du stator dans les axes d-q. s : est l'opérateur de Laplace.

En utilisant le diagramme vectoriel, l'équation (2.21) peut être exprimée en fonction de la tension du générateur v_s , comme suit :

$$\begin{cases} \frac{V_J i_q}{\sqrt{i_q^2 + i_d^2}} = -R_s i_q - L_q s i_q - \omega_c L_q i_d + \omega_c \phi_c \\ \frac{V_J i_d}{\sqrt{i_q^2 + i_d^2}} = -R_s i_d - L_d s i_d - \omega_c L_d i_q \end{cases} \quad (2.13)$$

D'autre part, nous avons $L_d = L_q = L_s$, donc l'équation du couple (T_e) est réduite à :

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\phi_c i_q) \quad (2.14)$$

La tension aux bornes de la MSAP peut être contrôlée en modifiant le rapport cyclique du boost.

Donc la tension V_s est donnée par l'expression suivante :

$$V_s = \frac{\pi V_{red}}{3\sqrt{3}} D_w \quad (2.15)$$

Par conséquent, les équations peuvent être réécrites sous la forme :

$$\begin{cases} \frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_s} \left(R_s i_q - \omega_e L_q i_d + \omega_e \phi_c - \frac{\pi V_{red} i_q}{3\sqrt{3} L_s \sqrt{i_q^2 + i_d^2}} D_w \right) \\ \frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_s} \left(R_s i_d + -\omega_e L_s i_q - \frac{\pi V_{red} i_d}{3\sqrt{3} L_s \sqrt{i_q^2 + i_d^2}} D_w \right) \\ \frac{d\omega_e}{dt} = \frac{P}{2J} \left(T_c - \frac{3P}{4} \phi_c i_q \right) \end{cases} \quad (2.16)$$

et:

i_d et i_q sont respectivement les courants statoriques direct et quadratique,

ω_e est la vitesse angulaire électrique,

R_s et L_s sont respectivement la résistance de la phase et de l'inductance du stator,

P est le nombre de pôles du générateur, J : est l'inertie du générateur,

Φ_e : est le flux de l'aimant permanent par pôle,

V_{red} est la tension redressée,

D_w est le rapport cyclique du convertisseur boost..

2.4. Modélisation du système de stockage :

L'énergie électrique est une énergie qui ne peut être stockée qu'en faibles quantités.

Dans les systèmes isolés, des batteries sont souvent utilisées pour garantir l'équilibre production/consommation et pour lisser les variations de puissance.

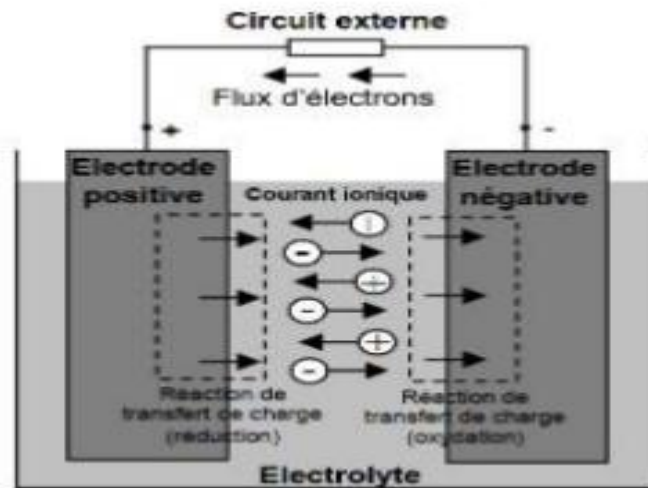


Fig 2.6 : Cellule électrochimique de base.

Il existe dans la littérature une large variété de modèles de batteries [31] [32] [33]. Le plus souvent, ces modèles représentent la batterie par un circuit électrique équivalent, composé de résistances, de capacités et d'autres éléments de valeur fixe ou variant avec des paramètres tels que l'état de charge ou la température. Ces modèles sont utilisés pour déterminer l'état de charge ou pour prédire la durée de vie des batteries. La plupart des modèles sont constitués de deux parties, l'une décrivant le modèle de capacité et l'autre, le modèle de tension de la batterie [34].

La capacité est une des caractéristiques les plus importantes d'une batterie. Celle-ci représente la quantité de courant qui peut être extraite d'une électrode via les "masses actives", c'est-à-dire l'électrolyte et les matériaux actifs des électrodes, sur une décharge. Cette capacité s'exprime en ampères-heures, Ah ($1 \text{ Ah} = 3600 \text{ coulombs}$). En pratique, elle dépend du courant ainsi que de la température [34] [31].

Le modèle de la tension fournit l'amplitude de la tension aux bornes de la batterie. Elle est influencée par la profondeur de la charge et de la décharge et ce modèle doit être capable de prévoir que la tension de la batterie baisse lentement linéairement pendant la

première partie de la décharge et rapidement à la fin, quand la batterie est presque vide (Figure 2.7). Dans le cas de la recharge, la tension augmente linéairement pendant la première partie et plus rapidement vers la fin de la charge.

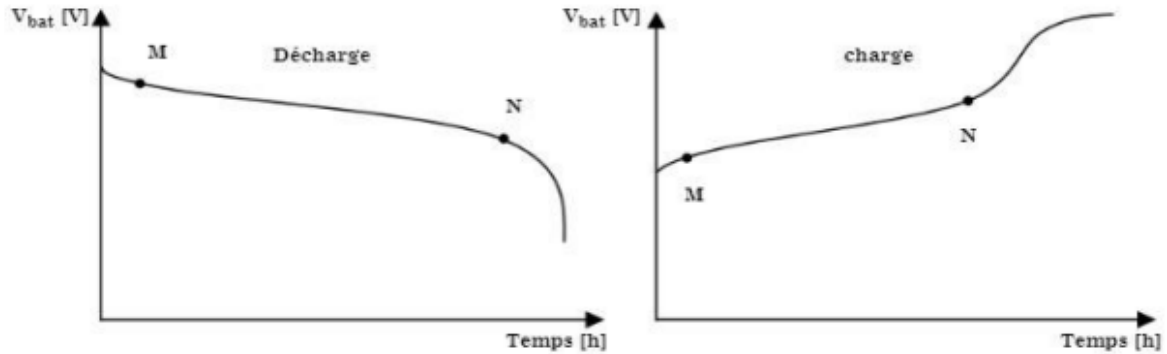


Fig 2.7 : Evolution de la tension avec le temps, durant la charge et la décharge.

Les modèles de tension sont généralement basés sur des équations qui relient la tension au courant et à l'état de charge [34] [31].

Les différents modèles existants dans la littérature pour les batteries sont d'une mise en œuvre difficile notamment à cause du nombre élevé de paramètres à déterminer. Ces paramètres sont nécessaires pour modéliser l'évolution dans le temps de la tension aux bornes de la batterie, sur toute la phase de charge et de décharge (Figure 2.7). Ces types de modèles sont adéquats pour des simulations à long terme. Il est plus approprié d'utiliser un modèle simplifié. Le schéma électrique d'un tel modèle est présenté dans la figure 2.8.

Il s'agit d'une source idéale de tension en série, avec une résistance et une capacité.

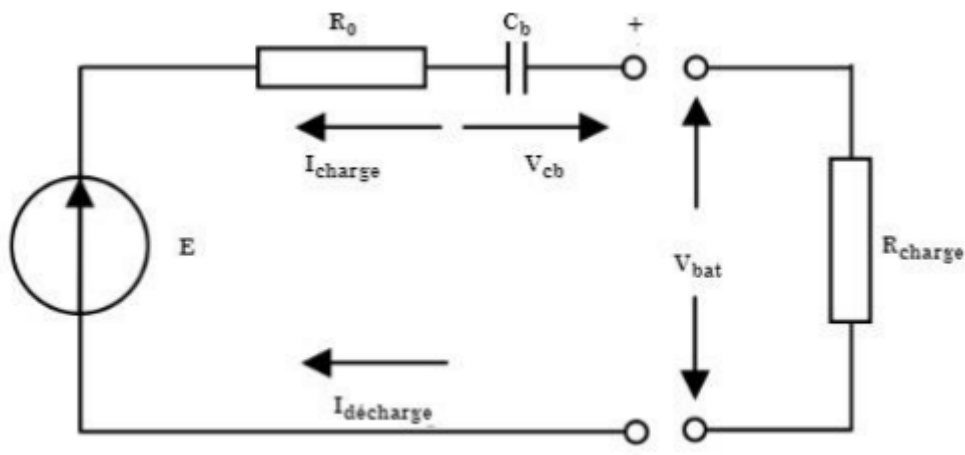


Fig 2.8 : Modèle électrique simplifié.

Par convention, la batterie est vue comme un générateur. Le courant de charge est négatif et celui de décharge est positif. Pour ce modèle, l'influence de la température est négligée, le modèle de la capacité est approché par le condensateur C_b et le modèle de tension est obtenu en appliquant la loi des mailles :

$$V_{bat} = E - R_0 I_{bat} + V_{Cb} \quad (2.17)$$

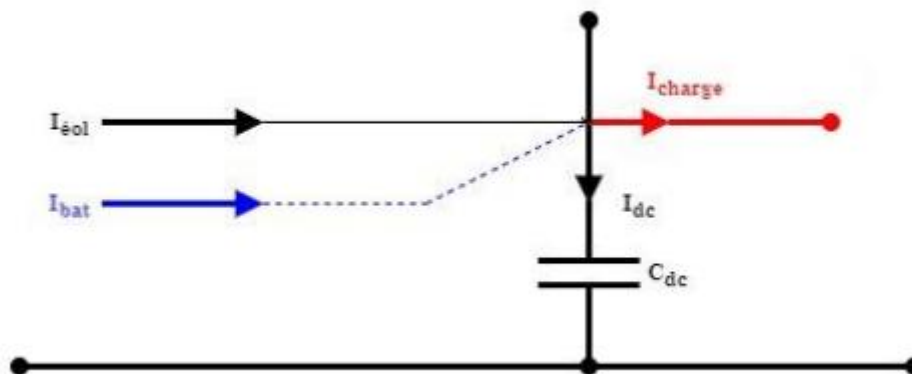
La résistance R_0 , supposée constante, modélise la résistance interne de la batterie, tandis que la source idéale de tension E en série avec la capacité C_b modélise la partie linéaire sur les courbes de charge et de décharge.

Les valeurs des éléments constituant le modèle sont alors déterminées par des essais de charge et de décharge dans le but d'approcher les courbes de fonctionnement de la batterie. Plusieurs batteries sont assemblées en série lorsqu'on désire disposer d'une tension plus grande que celle d'une seule batterie, et en parallèle, lorsque le courant requis dépasse la capacité d'une seule batterie.

2.5.MODELISATION DU BUS CONTINU :

Généralement dans la modélisation, le bus continu est considéré comme une capacité.

Une fois tous les modèles élémentaires décrits, nous avons effectué le couplage des sources selon la configuration à bus continu. La puissance fournie par chaque source est centralisée sur le bus à courant continu comme le montre la figure 2.9 :

**Fig 2.9 : Modèle de bus continu**

Le courant dans le bus continu est donné par :

$$I_{dc} = C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} \quad (2.18)$$

Et :

$$I_{dc} = I_{\acute{e}o} \pm I_{bat} - I_{charge} \quad (2.19)$$

$I_{\acute{e}o}$ est le courant du système éolien,

I_{bat} est le courant de charge/décharge de la batterie,

I_{charge} est le courant de la charge.

Il est important de fixer la tension du bus continu V_{dc} à une valeur de référence. Il faut que la tension du bus continu soit supérieure à la valeur maximale (valeur crête) de la tension composée du côté alternatif de l'onduleur.

Pour un coefficient de réglage maximal ($ma = 1$), l'expression de V_{dc-ref} s'écrit [Cha'10] :

$$V_{dc-ref} = 2\sqrt{2} V_s \quad (2.20)$$

et V_s : la valeur maximale de la tension de phase à la sortie de l'onduleur ($V_s = 230$ V).

2.6. MODELISATION DES CONVERTISSEURS STATIQUES :

2.6.1. Modélisation du convertisseur continu/continu :

Les hacheurs sont des convertisseurs constitués par des éléments réactifs : capacité, inductance et des interrupteurs à amorçage et à blocage commandés (transistor, nommé K) et d'autres à blocage et amorçage spontanés (diode, nommée D). On peut distinguer dans ce travail les types de hacheurs suivants :

*Hacheur survolteur ;

* Hacheur dévolteur/survolteur (mélange entre le hacheur dévolteur et le hacheur survolteur) ;

* Hacheur réversible en courant.

Pendant le fonctionnement du convertisseur DC/DC, l'interrupteur K sera commuté à une fréquence constante (f), avec un temps de fermeture égale à DT_s et un temps d'ouverture de $(1 - D) T_s$.

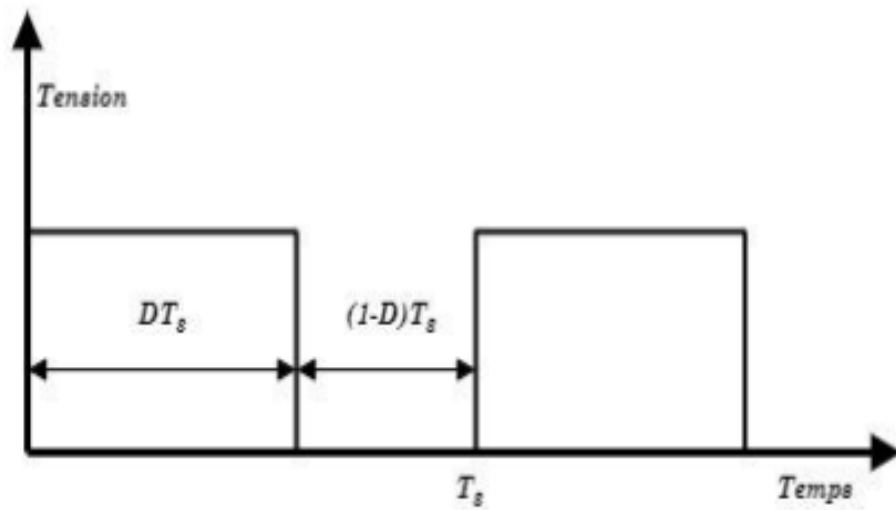


fig 2.10 : montre la tension de l'interrupteur K (transistor).

et :

T_s : la période de commutation ($T_s=1/f$),

D : le rapport cyclique du commutateur ($D \in [0,1]$).

2.6.1.1. Modélisation du hacheur survolteur

Le système éolien est connecté au bus DC grâce à un hacheur survolteur pour faire fonctionner le générateur éolien au point de puissance maximale.

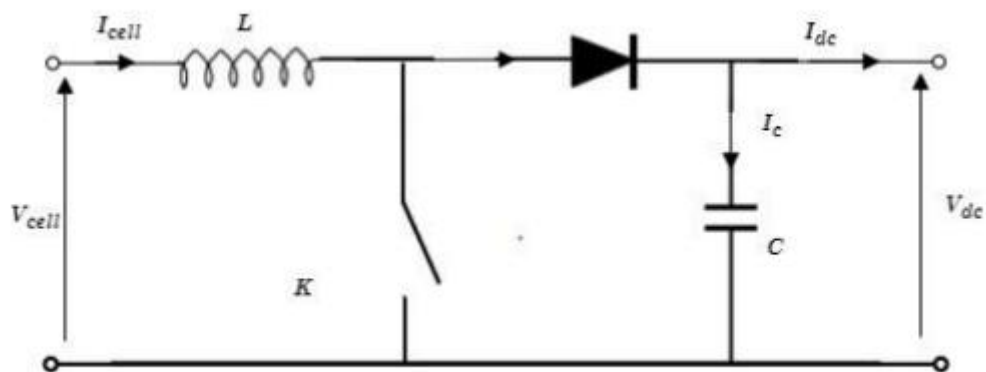


Fig 2.11 : Modèle d'un hacheur survolteur.

Le fonctionnement d'un convertisseur survolteur peut être divisé en deux phases de commutation selon l'état de l'interrupteur K (ouvert/fermé). Chaque état est représenté par une équation différentielle.

En ce qui concerne le premier état : K est fermé

$$\begin{cases} V_{\text{cell}} = L \frac{dI_{\text{cell}}}{dt} \\ 0 = C \frac{dV_{\text{dc}}}{dt} + I_{\text{dc}} \end{cases} \quad (2.21)$$

Pour le deuxième état : K est ouvert

$$\begin{cases} V_{\text{cell}} = L \frac{dI_{\text{cell}}}{dt} + V_{\text{dc}} \\ I_{\text{cell}} = C \frac{dV_{\text{dc}}}{dt} + I_{\text{dc}} \end{cases} \quad (2.22)$$

Si les interrupteurs sont parfaits, nous pouvons représenter le convertisseur par ce système d'équations :

$$\begin{cases} L \frac{dI_{\text{cell}}}{dt} = V_{\text{cell}} - (1 - u) V_{\text{dc}} \\ C \frac{dV_{\text{dc}}}{dt} = -I_{\text{dc}} + (1 - u) I_{\text{cell}} \end{cases} \quad (2.23)$$

et : u c'est l'état de l'interrupteur K. Il est donné par :

* u=1 lorsque l'interrupteur K est fermé

* u=0 lorsque l'interrupteur K ouvert.

Il peut être remplacé par sa valeur moyenne sur une période de découpage, c'est-à-dire le rapport cyclique D. Nous pouvons obtenir le modèle aux valeurs moyennes [43] [44]:

$$\begin{cases} \frac{dI_{\text{cell}}}{dt} = \frac{V_{\text{cell}}}{L} (1 - D) \frac{V_{\text{dc}}}{L} \\ \frac{dV_{\text{dc}}}{dt} = -\frac{V_{\text{dc}}}{RC} + (1 - D) \frac{I_{\text{cell}}}{C} \end{cases} \quad (2.24)$$

2.6.2. Modélisation de l'onduleur triphasé :

L'onduleur de tension est un convertisseur statique constitué de cellules de commutation généralement à transistors ou à thyristors à extinction par la gâchette (GTO). Le schéma structurel d'un onduleur triphasé à deux niveaux est illustré par la figure 2.19 [45].

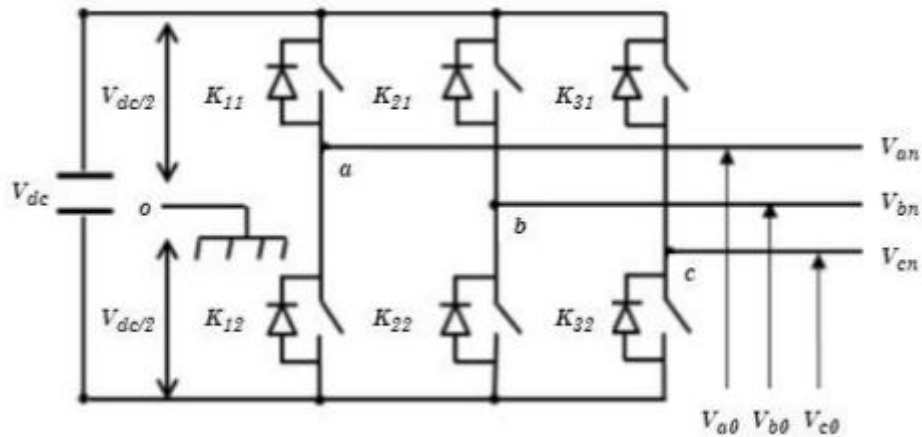


Fig 2.12 : Schéma structurel d'un onduleur triphasé à deux niveaux.

En tenant compte du point fictif « o ». Les trois tensions composées V_{ab}, V_{bc}, V_{ca} , sont définies par les relations suivantes [46] :

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bc} = V_{bo} - V_{co} \\ V_{ca} = V_{co} - V_{ao} \end{cases} \quad (w) \quad (2.25)$$

Soit « n » le point neutre du côté alternatif, si la charge est équilibrée ($V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0$), les tensions de phase de la charge (V_{an}, V_{bn}, V_{cn}) sont données par les équations ci-dessous :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3}(V_{ab} - V_{ca}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3}(V_{bc} - V_{ab}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3}(V_{ca} - V_{bc}) \end{cases} \quad (z) \quad (2.26)$$

En introduisant l'équation (w) dans (z) nous obtenons les équations suivantes :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3}(2V_{ao} - V_{bo} - V_{co}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3}(-V_{ao} + 2V_{bo} + V_{co}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3}(-V_{ao} - V_{bo} + 2V_{co}) \end{cases} \quad (2.27)$$

Soit Si l'état de l'interrupteur K_i , il est donné par ce qui suit :

- * Si= 1 lorsque l'interrupteur du haut est fermé et celui d'en bas ouvert,
- * Si= 0 lorsque l'interrupteur du haut est ouvert et celui d'en bas fermé.

Dans ces conditions, nous pouvons écrire les tensions V_{io} en fonction des signaux de commande S_i ($i = a, b, c$) et en tenant compte du point fictif "o" représenté sur la

figure.2.18 :

$$V_{io} = V_{dc} \left(S_i - \frac{1}{2} \right) \quad (Y) \quad (2.28)$$

L'utilisation de l'équation (Y) permet d'établir les équations instantanées des tensions simples en fonction des grandeurs de commande comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

2.7.Constante voltage MPPT :

L'énergie du vents est l'une des ressources d'énergie renouvelable qui nécessite un module éolien pour la convertir en énergie électrique. L'un des problèmes de la conversion de l'énergie éolienne est le processus de charge de la batterie. Pour améliorer l'efficacité de la conversion d'énergie, le système éolien a besoin d'une autre méthode de contrôle de la charge de la batterie appelée suivi du point de puissance maximale (MPPT). Cet article rapporte l'étude sur l'optimisation de la charge à l'aide de la méthode de tension constante . Cette méthode a pour fonction de déterminer la tension de sortie du système éolien dans des conditions maximales, de sorte que le système éolien produira toujours une énergie maximale. La simulation du système éolien a montré une énergie de résultat différente lorsque différents vitesse de vent été appliqués dans le modèle [35].

Le suivi du point de puissance maximale (MPPT) est nécessaire pour prendre en charge le système éolien afin que le système puisse produire le maximum puissance .

La méthode de tension constante (CV) a été appliquée sur l'algorithme MPPT pour produire la puissance maximale du système éolien .

La méthode de tension constante a été utilisée pour déterminer la tension de sortie du système éolien à la condition maximale.

2.8.Qu'est-ce qu'un filtre LC ?

Un filtre LC combine des inductances (L) et des condensateurs (C) pour former un filtrage passe-bas, passe-haut, multiplexeur, passe-bande ou coupe-bande en radiofréquence et de nombreuses autres applications. Les filtres LC électroniques passifs bloquent ou réduisent le bruit des circuits et des systèmes et séparent ou conditionnent les signaux souhaités.

Alors que les filtres idéaux passeraient les fréquences de signal souhaitées sans perte d'insertion ni distorsion, et bloqueraient complètement tous les signaux dans la bande d'arrêt, les vrais filtres ont des résistances CC et CA qui contribuent à la perte d'insertion, nécessitant une sélection minutieuse des composants. La sélection des valeurs exactes des pièces pour une application particulière nécessite des composants de haute qualité ainsi que des spécifications complètes et des modèles de

performance. Les plus simples à concevoir et à mettre en œuvre sont les types passe-bas et passe-haut.

Le filtre LC le plus simple se compose d'une inductance et d'un condensateur. Les alignements de filtres d'ordre supérieur utilisent plus de composants pour donner une atténuation plus nette et plus définie de l'atténuation des bruits indésirables.

Par exemple, les filtres elliptiques (Cauer) donnent le roll-off le plus net et sont les moins sensibles à la variation des composants. En contrepartie, il y a plus d'ondulation de bande passante et d'ondulation de bande d'arrêt dans les filtres LC elliptiques. [36]

2.9.CONCLUSION :

Dans ce chapitre, nous avons représenté la modélisation d'un système constitué par un générateur éolien et un système de stockage et des convertisseurs pour adapter les sources avec la charge. Tous ces éléments sont reliés à travers un bus continu.

Les modèles des convertisseurs statiques élaborés dans ce chapitre seront utilisés pour commander l'énergie produite par les sources éolienne.

Dans le chapitre suivant, nous allons étudier la simulation et l'analyse du système étudié .

Chapitre 3 :

Simulation et discussion des résultats .

3.1.Introduction :

Dans ce chapitre, on s'est consacré à la modélisation et la simulation sous l'environnement MATLAB/SIMULINK de système qui contient des différents composants de deux parties essentielles du système de conversion d'énergie éolienne.

3.2.Le système renouvelable étudié :

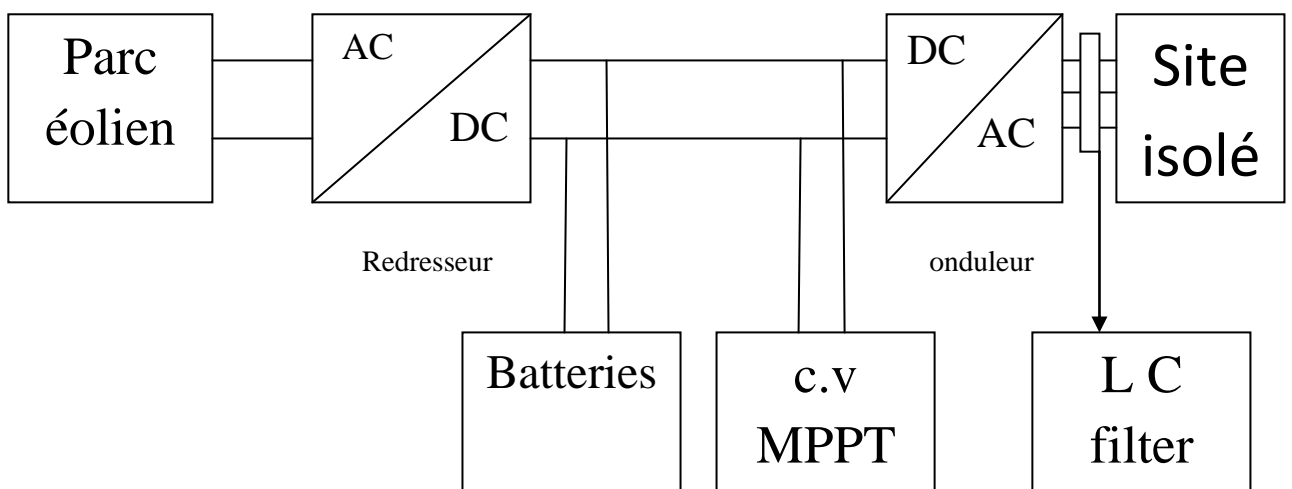


Fig 3.1 : schéma de système renouvelable étudié

3.2.1.Les conditions de notre étude :

Le temps de simulation : 6 (s)

$t=0(s)$ à $t=4(s)$: la charge = 15 kv

$t=4(s)$ à $t=5(s)$: la charge = 15 kv + 5 kv = 20 kv

$t=5(s)$ à $t=6(s)$: la charge = 15 kv

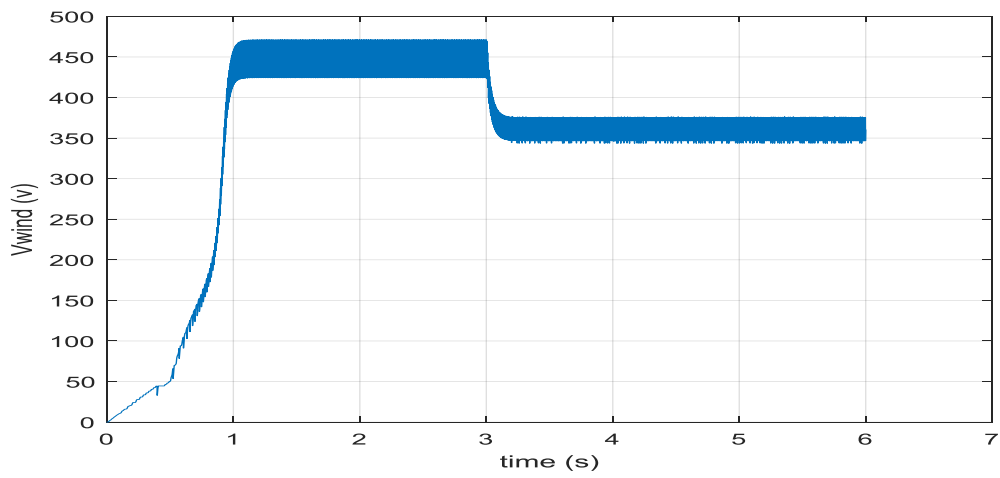
le temps de variation du vent :

$t=0(s)$ à $t=0.5(s)$: $V_v = 0$ m/s

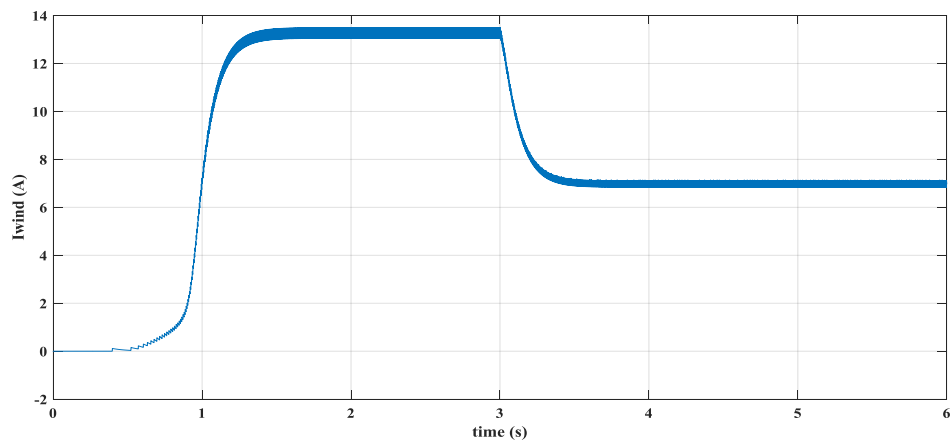
$t=0.5(s)$ à $t=3(s)$: $V_v = 12$ m/s

$t=3(s)$ à $t=6(s)$: $V_v = 9$ m/s

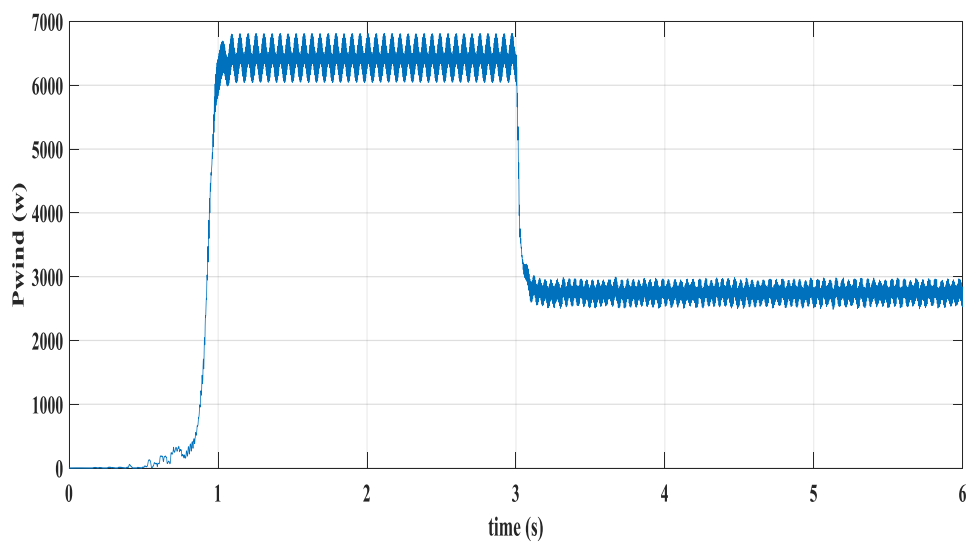
3.2.2.parc éolien étudié :



(A)



(B)



(C)

Figure 3.2: Résultats du parc éolien : (a) Tension produite, (b) Courant produit,(c) Puissance produite.

Comme illustré dans la figure 3.2, nous avons pu voir :

- De $t = 0$ s à $t = 0.5$ s, sachant que la vitesse du vent était 0 m/s, le parc éolien n'a aucune production.
- De $t = 0.5$ s à $t = 3$ s, la météo a changé et la vitesse du vent a augmenté jusqu'à 12 m/s. La tension de l'éolien augmente et se stabilise à peu près à 468 V. Le courant augmente et sa stabilité est à peu près à 13.5 A. La puissance augmente et reste à peu près stable à 6.8 KW.
- De $t = 3$ s à $t = 6$ s, la météo a changé encore, mais cette fois la vitesse du vent a diminué jusqu'à 9 m/s. La tension de l'éolien diminue et reste à peu près stable à 348 V. Le courant diminue et se stabilise à peu près à 7 A. La puissance diminue et sa stabilité est à peu près à 2.5 KW.

3.3. La tension dans le bus continue (V_{DC}) :

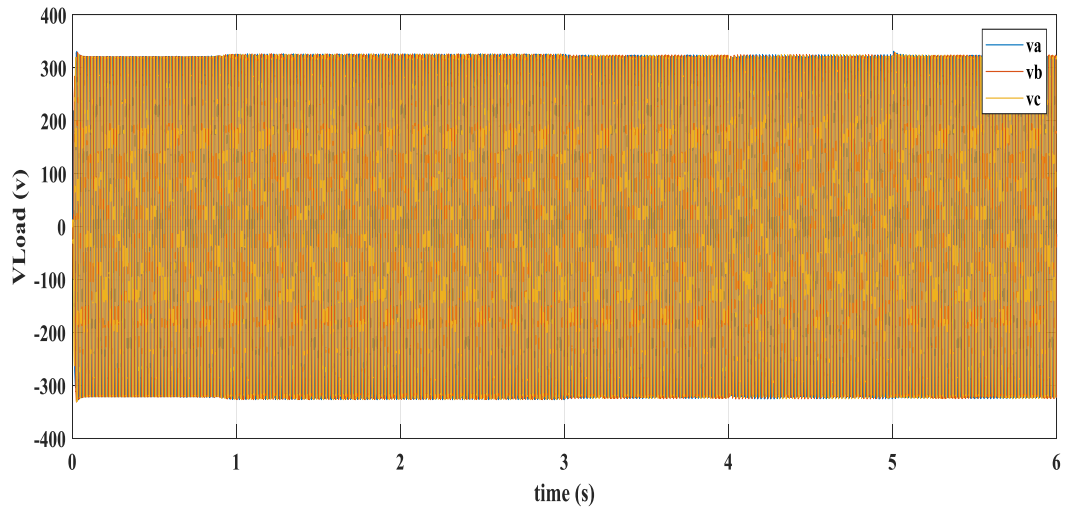
Grace à (constant voltage mppt) la tension dans le bus continue augmente jusqu'à 650 (v) et reste stable .

3.4. La charge :

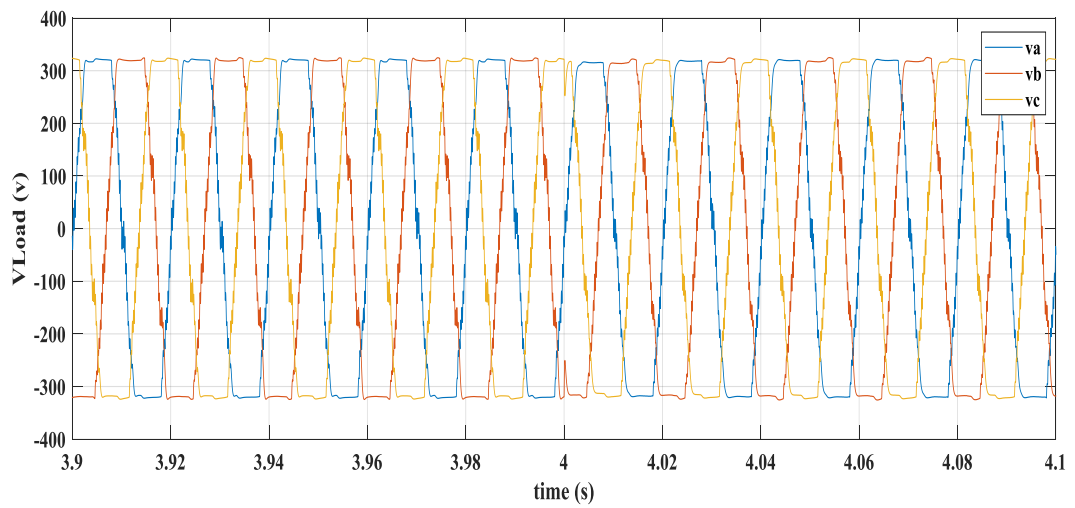
La demande de puissance du site isolé étudié est de 20 kv . pour que le park éolien puis alimente la demande de puissance de ce site ; l'équation suivante doit être vérifiée :

$$P_{\text{charge}} = P_{\text{éolien}} + P_{\text{batterie}} \quad (3.1)$$

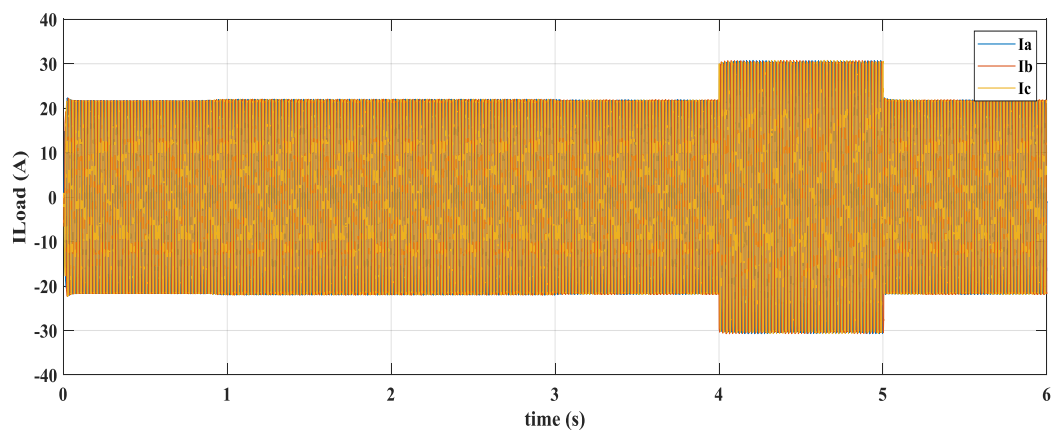
1. les résultats de simulation de la demande de puissance de site isolé :



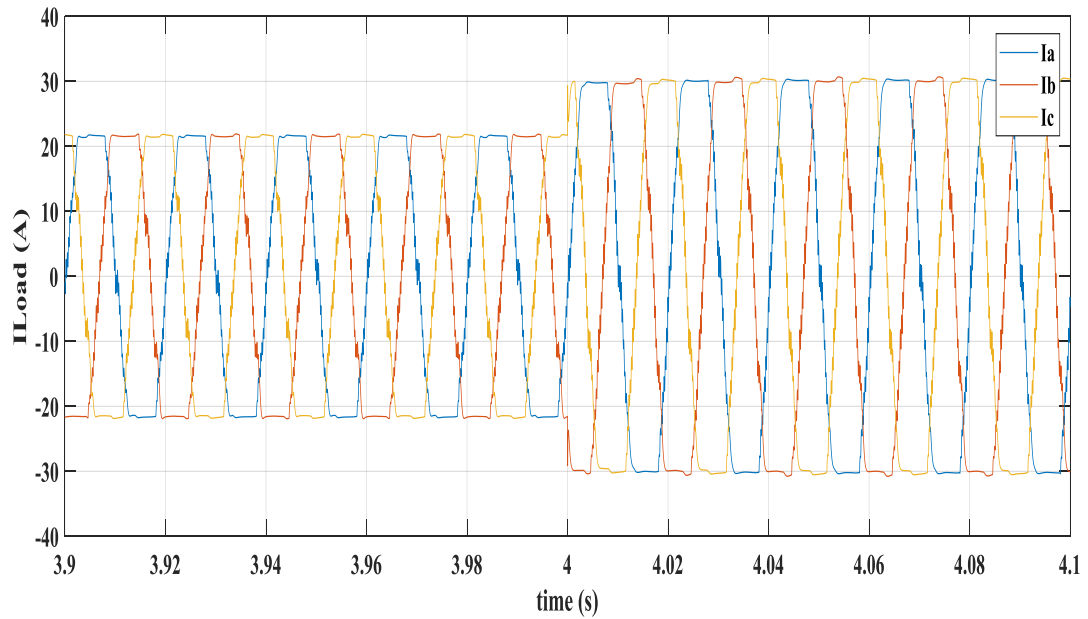
(A)



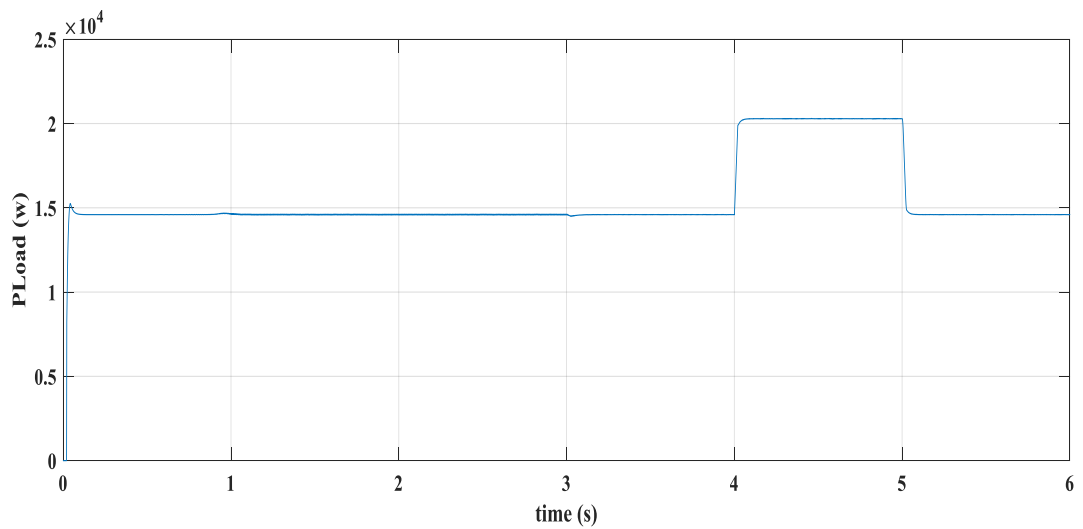
(B)



(C)



(D)



(E)

Figure 3.3 : résultats de la demande de la charge : (A) Tension de charge, (B) Zoom de la tension de la charge, (C) Courant de la charge, (D) Zoom de courant de la charge, (E) Puissance de la charge.

Comme illustré dans la figure (E) la charge a une 1^{er} demande de tension de 320 (v) ; et une seconde pour la puissance de 14.6 (kw) . Entre 4 (s) et 5 (s) ; la demande de puissance augmente jusqu'à 20,27 (kw) .

3.5.Discussion et comparaison des résultats :

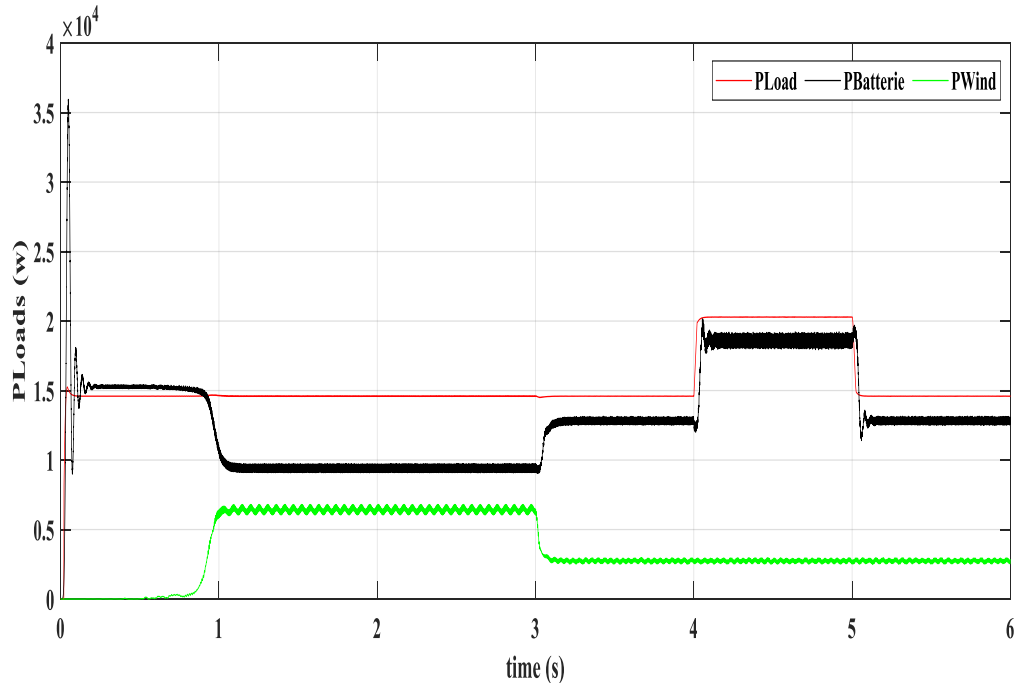


Fig 3.4. les résultats des puissance du SER étudié

D'après la figure (E) la charge a une 1^{er} demande de tension de 320 (v) ; et une seconde pour la puissance de 14.6 (kw) . Entre 4 (s) et 5 (s) ; la demande de puissance augmente jusqu'à 20,27 (kw) .

le fonctionnement du parc éolien pour alimenté la demande du site isolée .

* Nous avant constaté que :

- t =0 (s) à t = 0.8 (s) : la puissance consommée par le cite isolée est fournit par les batteries ; le parc éolien ne fournit aucune puissance .
- t =0.8 (s) à t = 3 (s) : la puissance consomé par la charge est livré par le parc éolien et les batteries .
- t =3 (s) à t = 4 (s) et t = 5(s) à t = 6 (s) : la puissance consomé par la charge est fourni par le parc éolien et les batteries mais les batteries fourni plus de puissance que le parc éolien parce que la puissance du parc à déminué .
- t = 4 (s) à t = 5 (s) : la puissance demandé par le site isolée augmente jusqu'à 20 (kw) ; cette demande fournit par les batteries plus que le parc éolien .

3.6.conclusion :

les résultats de tension ; courant et la puissance de parc éolien ont été analysés ce qui peut être dit ; c'est que le système de l'énergie éolien (parc éolien / batteries) a assuré l'alimentation de la charge .

donc on peut dire qu'on a assuré l'alimentation d'un site isolé purement par l'énergie éolienne .

Conclusion générale

Conclusion générale :

Nous nous sommes intéressés dans ce travail à développer une commande pour un système d'énergie renouvelable autonome : parc éolien et des batteries afin de faciliter l'intégration des énergies renouvelables dans le réseau électrique étudié dans ce travail. Notre objectif est de proposer un système éolien purement renouvelable capable d'alimenter le smart grid proposé. Afin d'atteindre notre but, nous avons organisé nos recherches en quatre chapitres. En effet, nous avons commencé notre travail par une introduction générale, où nous avons identifié les problématiques trouvées dans un parc éolien à base des ERs.

Le premier chapitre traite des généralités sur l'énergie éolienne en rendant compte de l'état de l'art actuel sur l'exploitation mondiale de ce créneau énergétique. Nous avons également traité les lois fondamentales permettant la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique. Une comparaison entre les éoliennes à vitesse variable et les éoliennes à vitesse fixe nous a permis de choisir un système à vitesse variable. Puis la comparaison entre les différentes génératrices utilisées dans ce domaine nous a permis de choisir un système basé sur une machine synchrone à aimants permanents GSAP.

Dans cette mémoire on a fait la modélisation et la simulation d'une éolienne à base d'un générateur asynchrone et on a présenté les différents types d'éoliennes existant avec leurs différentes structures à savoir les éoliennes à axe horizontal et à axe vertical.

En considère la vitesse du vent comme une entrée perturbatrice de ce système. En peut contrôler la vitesse de la turbine par action sur deux entrées le couple électromagnétique de la génératrice, l'angle d'orientation de la pale. Notons qu'à vide la vitesse du rotor est proche de la vitesse de synchronisme. Enfin l'objectif principal de notre étude est l'alimentation d'un site isolé purement par l'énergie éolienne .

RÉFÉRENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

[01] REpower ([http:// www. repower. fr/](http://www.repower.fr/))

[02] BOUDIA Sidi Mohammed «Optimisation de l'Évaluation Temporelle du Gisement Énergétique Éolien par Simulation Numérique et Contribution à la Réactualisation de l'Atlas des Vents en Algérie » Thèse de Doctorat. Université de Tlemcen. 2013.

[03] Haritza CAMBLONG «Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse» Thèse de Doctorat. Bordeaux. Soutenue le 18 décembre 2003.

[04] G. Grellet, G. Clerc, « Actionneurs électriques », Editions Eyrolles, Paris, France, 1997.

[05] S. Louassa , M. Merzouk , O. Guerri « Evaluation des performances de quatre types d'éolienne dans une zone aride » Evaluation des performances de quatre types d'éolienne dans une zone aride.

[06] HAMDY NAOUEL « Amélioration des performances des aérogénérateurs» Thèse de Doctorat de l'Université de Constantine. Soutenu le 03/07/2013.

[07] M. JOURIEH «développement d'un modèle représentatif d'une éolienne afin d'étudier l'implantation de plusieurs machines sur un parc éolien» Thèse de Doctorat Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2007.

[08] TOUAL BELKACEM « Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable» mémoire de magister Université de Batna, 2010.

[09] B. MULTON, O. GERGAUD, H. BEN AHMED, X. ROBOAM, S. ASTIER, B. DAKYO, C. NICHITA «état de l'art dans les aérogénérateurs électriques» paru mai en 2002.

[10] F. POITIERS «Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne-Machine asynchrone à cage autonome-Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau» Thèse de Doctorat Université de Nantes, 2003.

[11] TIR ZOHEIR «Contribution à l'Etude d'un Aérogénérateur Asynchrone en Cascade» mémoire de magister Université Ferhat Abbas de Setif, 2010.

[12] WWEA « Rapport Mondial sur l'Energie Eolienne 2008 », Fev 2009, Allemagne.

[13] WWEA «Rapport Mondial 2010 sur l'Energie Eolienne» April 2011.

[14] Mr.AFTIS Zahir & MrASLOUNI Youcef ,Commande non linéaire d'un système de pompage éolien, mémoire master, Université de Bejaia (2016)

[15] Mr. SAIDI Yazid & Mr.YAHIAOUI Yahia, Etude et réalisation d'une turbine éolienne, mémoire master , Université Abderrahmane Mira-Bejaia (2014)

[16] Khelfat Lotfi & Maataoui Lakhdar, Etude et Simulation d'une éolienne à base d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée, mémoire master , UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR-ANNABA (2017)

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[17] HERISSI Belgacem , Commande d'une Eolienne basée sur les modèles flous de Takagi-Sugeno], mémoire master ,UNIVERSITÉ LARBI TEBESSI-TÉBESSA(2015)

[18] <https://mtaterre.fr/dossiers/comment-ca-marche-lenergie-eolienne/le-fonctionnement-de-lenergie-eolienne>.

[19] A. MIRECKI «Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance » Thèse de Doctorat, INPT de France, 2005.

[20] M. LOPEZ «contribution a l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée» Thèse de Doctorat de l'Université de Paris-sud11.

[21] NAOUEL HAMDI «Modélisation et commande des génératrices éoliennes» mémoire de magister de l'université MENTOURI de CONSTANTINE, 2008

[22] https://www.researchgate.net/figure/Aerogenerateur-a-vitesse-variable_fig10_324929383

[23] KHALED FERKOUS «étude d'une chaîne de conversion d'énergies éolienne» mémoire de magister de l'Université Mentouri de Constantine, 2009.

[24]: Désiré Le Gourières, "Energie Eolienne. Théorie, conception et calcul pratique des installations", deuxième édition, EYROLLES Paris 1982.

[25]: D. Spera, editor, "Wind Turbine Technology – Fundamental Concepts of Wind Turbine Technology", ASME Press, New York, 1998.

[26]: J. Ercolino, "Modélisation en régime nominal et partiel de l'écoulement méridien dans les turbomachines axiales et hélicocentrifuges", Thèse Mécanique, Laboratoire d'Energétique et Mécanique des Fluides Internes, Arts et Métiers, ENSAM 2002.

[27]: S. Heier ; translated by R. Waddington "Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems", John Wiley & Sons LTD, 3rd edition 1998.

[28]: A. Benjemaa, Coopération méta heuristique et logique floue pour le dimensionnement d'une installation hybride. Thèse doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, 2015.

[29]: F.Valenciaga, P.F.Puleston, P.E.Battaiotto and R.J.Mantz, " Passivity/sliding mode control of a stand-alone hybrid generation system ",IEE Proc.-Control Theory Appl., Vol. 147, No. 6, p.680-686 November 2000.

[30]: S.Belakehal, "conception & commande des machines à aimants permanents dédiées

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

aux énergies renouvelables", Thèse Doctorat, département d'électrotechnique, Université de Constantine ,2010.

[31]: F. Delfosse, "Détermination de l'Etat de Charge des Batteries d'un Véhicule Electrique", Travail de fin d'études, Université de Liège, 1998.

[32]: M. Thele, S. Buller, D. U. Sauer, R. W. De Doncker, E. Karden, "Hybrid Modelling of Lead-Acid Batteries in Frequency and Time Domain", Journal of Power Sources, Vol. 144, Pages 461-466, 2005.

[33]: A. Jossen, J. Garche, H. Doering, M. Goetz, W. Knaupp, L. Joerissen, "Hybrid systems with lead-acid battery and proton-exchange membrane fuel cell", Journal of Power Sources, Vol. 144, pp. 395-401, 2005.

[34]: A. D. Hansen. P. Sørensen, L. H. Hansen, H. Bindner, "Models for Stand-Alone PV System", Risø-R-1219(EN)/SEC-R-12, 2000.

[35]: Sevty Satria Bhatara; Reza Fauzi Iskandar; M. Ramdhan Kirom Volume 1712, Issue 1
24 February 2016.

[36]: <https://www.coilcraft.com/en-us/edu/series/what-is-an-lc-filter/>

[37] SOLTANE BELAKEHAL «Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables» thèse de doctorat de l'université de Constantine, 2010.

[38] ABDENOUR ABDELLI «Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive» thèse de docteur de l'institut national polytechnique de Toulouse, 2007.

[39] NICOLAS LAVERDURE «Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires» Thèse de Doctorat d'institut national polytechnique de Grenoble, 2005.

[40] GASSAB SAMIR «Modélisation d'une centrale hybride photovoltaïque-éolienne» mémoire de magister de l'Université Ferhat Abbas – Sétif, décembre 2011.

[41] SAID HASSAINE «Application des nouvelles techniques de commande de la machine synchrone à aimants permanents» thèse de doctorat de l'université des sciences et de technologie d'Oran, 2008.

[42] : LAURENT GASC «conception d'un actionneur à aimants permanents à faibles ondulations de couple pour assistance de direction automobile approches par la structure et par la commande» thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de Toulouse, 2004.

[43]: B. Madaci, R. Chenni, E. Kurt, K. E.Hemsas, "Design and control of a stand-alone hybrid power system", International Journal of Hydrogen Energy, p. 1-1 2, 2016.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[44]: S. Dimitar, L. Vladimir, R. Daniel, Z. Zahari, MA. Omar, „Modélisation Des Convertisseurs Statiques Dc-Dc Pour Des Applications Dans Les Energies Renouvelables En Utilisant MATLAB/SIMULINK, Conférence EF UTC, Compiègne, 24-25 Septembre 2009.

[45]: Z. Laid, "étude technique d'un système d'énergie hybride photovoltaïque-éolien hors réseau", thèse doctorat en Electrotechnique, Université de Constantine ,2010

[46]: V. Boitier, P. Maussion, and C. Cabal, "Recherche du maximum de puissance sur les générateurs photovoltaïques ", revue 3E.I (2008), no. 54, 90–96.