

الجمهورية الديمقراطية الشعبية الجزائرية

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique
Ecole Supérieure des Sciences Appliquées
d'Alger



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
المدرسة العليا في العلوم التطبيقية بالجزائر

Département du second cycle

Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme de MASTER

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Traction électrique

Thème :

Etat de l'art sur l'énergie éolienne

Présenté par : Hita Yassine

Encadré (e) par : Benkraouda Souleyman

Co-encadré(e) par : Djelloul-khedda Zakarya

Soutenu publiquement, le : 20/06/2023,

Devant le Jury composé de :

M Teffahi Abdelkader
M Deboucha Abdelhakim
M Benkraouda Souleyman
M Djelloul-khedda Zakarya

Président
Examineur
Encadreur
Co-Encadreur

Binôme N° : 04/Master /TR/ 2023

Résumé

Ce sujet présenté dans cette thèse traite d'un aperçu historique général de l'énergie éolienne et de la manière d'exploiter et de bénéficier de cette énergie dans la production d'électricité, en plus d'aborder les types de machines électriques utilisées dans les systèmes d'éoliennes. L'objectif, les éoliennes convertissent l'énergie cinétique de l'air en énergie mécanique convertie en électricité. Différentes techniques puissantes de contrôle des éoliennes à vitesse variable sont proposées et appliquées sur la base d'un générateur synchrone magnétique permanent capable d'améliorer l'énergie produite par le système éolien pour atteindre plusieurs objectifs, notamment :

Maximiser la puissance de sortie et rechercher des chemins de référence et assurer la stabilité et la robustesse aux changements de paramètres et d'instructions de contrôle

Mots clés

L'énergie éolienne, générateur asynchrone, Machine à double alimentation asynchrone, générateur synchrone, Générateur synchrone à aimant permanent, Générateur Synchrone à Rotor Bobiné

ABSTRACT

This topic presented in this thesis deals with a general historical overview of wind energy and how to harness and benefit from this energy in the production of electricity, in addition to discussing the types of electrical machines used in wind turbine systems. The objective, wind turbines convert the kinetic energy of the air into mechanical energy converted into electricity. Different powerful variable speed wind turbine control techniques are proposed and applied based on a permanent magnetic synchronous generator capable of enhancing the energy produced by the wind system to achieve several goals, including:

Maximize output power and find reference paths and ensure stability and robustness to changes in parameters and control instructions

KEY WORDS

Wind energy, Asynchronous generator, Asynchronous dual-feed machine, Synchronous generator, Permanent magnet synchronous generator, Synchronous Generator With Rotor Coil

ملخص

يعالج لنا هذا الموضوع المقدم في هذه الأطروحة نظرة تاريخية عامة حول طاقة الرياح وكيفية إستغلال والإستفادة من هذه الطاقة في إنتاج الكهرباء بإضافة إلى ذلك التطرق إلى أنواع الآلات الكهربائية المستخدمة في أنظمة توربينات الرياح ومن أجل تحقيق هذا الهدف تقوم توربينات الرياح على تحويل الطاقة الحركية للهواء إلى طاقة ميكانيكية تم إلى كهرباء كما يتم اقتراح وتطبيق مختلف تقنيات التحكم القوية لتوربينات الرياح في متغيرة السرعة على أساس مولد متزامن مغناطيسي دائم قادر على تحسين الطاقة التي ينتجها نظام الرياح لتحقيق عدة أهداف من بينها

تعظيم الطاقة المنتجة والسعي وراء المسارات المرجعية وضمان الاستقرار والمتانة للتغيرات في المعلمات وتعليمات التحكم

كلمات مفتاحية

طاقة الرياح مولد غير متزامن آلة التغذية المزدوجة غير المتزامن مولد متزامن مولد متزامن دوار الجرح مولد متزامن مغناطيسي دائم

Remerciements

Au terme de ce travail, on tient à remercier en premier lieu Dieu miséricordieux qui nous a donné la force et la volonté d'achever ce travail.

Nous tenons à exprimer notre sincère gratitude envers Mr BENKRAOUDA Souleymane, Docteur de l'Ecole supérieure des sciences Appliquées Alger, pour la confiance qu'il nous a témoignée en acceptant de diriger ce travail. Nous aimerions également lui dire à quel point nous avons apprécié sa grande disponibilité ainsi que ses idées et conseils judicieux apportés tout au long de ce travail. Enfin, nous avons été extrêmement sensibles à ses qualités humaines d'écoute et de compréhension tout au long de ce travail.

Nos remerciements vont également à Mr DJELLOUL KHEDDA Zakarya, co-encadreurs de cette thèse. Nous tenons à exprimer notre reconnaissance pour leur aide, leur disponibilité, leurs encouragements ainsi que leur apport scientifique tout au long de ce travail.

Un grand merci aussi à tous nos camarades, nos amis et toutes les personnes qui ont été à nos côtés et nous ont soutenus d'une façon ou d'une autre. Vous êtes tellement nombreux que vous citer tous serait un trop grand défi. Sachez toutefois que vous êtes tous dans nos pensées.

Nous terminons ces remerciements en saluant vivement les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant d'examiner notre travail.

Dédicaces

A la mémoire de mon père

A ma mère, que dieu la protégé

A mes chers frères et mes chères sœurs

A tous mes amis

Yassine

Liste des figures

Figure 1-1	Première aérogénératrice de Poul La Cour en 1891 à Askov, Danemark	2
Figure 1-2	Evolution de la puissance totale du parc éolien installée dans le monde 2001- 2020.....	3
Figure 1-3	Répartition de la nouvelle capacité de production éolienne ajoutée en 2020	4
Figure 1-4	Nouvelle capacité installée des éoliennes par type (année 2020)	4
Figure 1-5	Les plus grands pays exploitants d'énergie éolienne par type (Onshore/ Offshore)	4
Figure 1-6	Prévision globale de la capacité installée d'énergie éolienne entre 2020-2025.....	6
Figure 1-7	Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol (m/s) en Algérie	7
Figure 1-8	Eolienne installée en Algérie (Grand Vent) en 1957	7
Figure 1-9	Éolienne installée en Algérie en 1953	8
Figure 1-10	La 1ère ferme éolienne de 10MW à Kabertène (Adrar)	8
Figure 1-11	Principe de conversion de l'énergie éolienne	9
Figure 1-12	Différentes taille et puissance des éoliennes au fil des années	10
Figure 1-13	Différentes formes d'éoliennes à axe vertical	11
Figure 1-14	Différentes formes d'éoliennes à axe Horizontal	12
Figure 1-15	Éolienne Amont Horizontale.....	12
Figure 1-16	Éolienne Aval Horizontale.....	13
Figure 1-17	Différentes parties d'une éolienne Nordex N60 (1300 kW) [16,25].....	14
Figure 1-18	Zones de fonctionnement d'une éolienne	16
Figure 1-19	Eolienne à vitesse fixe basée sur la machine asynchrone à cage d'écureuil	17
Figure 1-20	Eolienne à vitesse variable basée sur une GADA	18
Figure 1-21	Classification des générateurs	20
Figure 1-22	Schéma équivalent d'un système éolien basé sur la machine asynchrone à cage	21
Figure 1-23	Schéma équivalent d'un système éolien basé sur la machine asynchrone double alimentation	22
Figure 1-24	Schéma équivalent d'un système éolien basé sur la machine synchrone	22

Liste des tableaux

Tableau1- 1 Les plus grands pays exploitants d'énergie éolienne	5
Tableau1- 2 Classification des éoliennes	10

Sommaire

1	Généralités sur l'Energie Eolienne	1
1.1	Introduction	1
1.2	Généralités sur l'énergie éolienne.....	1
1.2.1	Définition d'Energie éolienne.....	1
1.2.2	Historique de l'éolien	1
1.2.3	Situation actuelle de l'énergie éolienne	2
1.2.4	Potentiel éolien en Algérie.....	6
1.2.5	Energie éolienne en Algérie.....	7
1.3	Notions théoriques sur l'éolien.....	9
1.3.1	Principe de l'énergie éolienne	9
1.3.2	Eolien domestique	9
1.3.3	Eolien urbain	9
1.3.4	Classification des éoliennes	10
1.4	Principaux éléments d'une éolienne à axe horizontal	13
1.5	Zones de fonctionnement de l'éolienne	15
1.6	Application des éoliennes	16
1.6.1	Systèmes isolés	16
1.6.2	Systèmes hybrides	17
1.6.3	Systèmes liés au réseau.....	17
1.7	Technologies des systèmes éoliens	17
1.7.1	Les éoliennes à vitesse fixe FSWT	17
1.7.2	Eoliennes à vitesse variable VSWT	18
1.8	Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	18
1.8.1	Les Avantages	19
1.8.2	Les inconvénients	19
1.9	Types des machines électriques utilisées dans les systèmes éoliens	20
1.9.1	Système utilisant une génératrice asynchrone.....	20
1.9.2	Système Utilisant une Génératrice Synchrone	22
1.10	Conclusion	24

1 Etat de l'art sur l'énergie éolienne

1.1 Introduction

De nos jours, l'énergie électrique devient très nécessaire dans toutes nos activités quotidiennes car elle sert à énormément de chose, elle permet à se chauffer, à s'éclairer ou encore à se déplacer. L'énergie se présente sous de nombreuses formes et provient de diverses sources, on peut donc les classer en deux grande catégories : les sources d'énergies renouvelables et les sources d'énergies non renouvelables. Les sources d'énergie non renouvelable, ce sont des sources qui s'épuisent avec le temps, il y en a donc de moins en moins sur terre. Parmi les sources d'énergies non renouvelables on distingue : source d'énergie fossile qui est produite par la combustion du charbon, du pétrole et du gaz naturel et source d'énergie fissile qui est produite par la fission de l'uranium. Certainement, l'épuisement des combustibles industriels et leurs impacts dangereux sur l'environnement, et avec l'intérêt à la réduction des émissions de gaz à effet de serre, la production d'énergie verte se présente comme obligation primordiale de l'humanité. Donc, le recours aux autres types de ressources d'énergie dite renouvelables est inévitable. Parmi lesquelles, on trouve l'énergie éolienne qui prend une place de plus en plus importante dans le domaine de la production d'électricité. Au cours des deux dernières décennies, l'énergie éolienne est devenue la source la plus prometteuse d'énergie renouvelable en raison du développement de l'aérodynamique des éoliennes en matière de type, les génératrices utilisées, les technologies de fonctionnement, ainsi que le développement dans le domaine de l'électronique de puissance ont donné plus de fiabilité et de performance au système éolien [1]. Dans ce contexte, ce chapitre sera consacré aux notions générales sur les systèmes éoliens ainsi que les différents types d'aérogénérateurs et leurs fonctionnements. Ces rappels sont suivis par une présentation de la situation de la puissance éolienne installée dans le monde et les différentes topologies des turbines employées. Ce chapitre présente aussi les nouvelles technologies des éoliennes et les différentes catégories de génératrices utilisées dans le but de procéder à une comparaison qui sera intéressante par la suite pour le bon choix de la génératrice. En termina ce chapitre par les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne.

1.2 Généralités sur l'énergie éolienne

1.2.1 Définition d'Energie éolienne

L'énergie éolienne est l'énergie cinétique des masses d'air en mouvement autour du globe, c'est une forme indirecte de l'énergie calorifique de soleil ; les rayons solaires entraînent des différences de température et de pression. De ce fait, les masses d'air se mettent en mouvement et accumulent de l'énergie cinétique.

1.2.2 Historique de l'éolien

L'histoire de l'énergie éolienne ne date pas d'aujourd'hui. Depuis l'antiquité, elle fut utilisée notamment pour faire avancer les bateaux à voiles, moulin le grain, pompage d'eau et produire de l'électricité [2].

La première utilisation de l'énergie de vent remonte à 1700 ans environs avant J'esusChrist [8, 9]. Hammourabi prestigieux roi de Babylone, avait conçu, en utilisant la puissance du vent, tout un projet d'irrigation de la Mésopotamie. La première description écrite relative à l'utilisation des moulins à vent en Inde, date de 400 ans environ avant J.-C. Ce n'est qu'au moyen-âge que ces derniers ont fait leur apparition en Europe [4]. Les moulins à vent ont entamé leur progressive disparition dès l'apparition de la machine à vapeur [3].

Au fil d'années, les éoliennes sont sans cesse perfectionnées et prennent des différentes architectures.

En 1887, le scientifique Américain CHARLES F. BRUSH, le plus grand pionnier dans le domaine de la conversion d'énergie éolienne en énergie électrique construit la première turbine éolienne énorme de puissance 12 KW, cette turbine mesure 17 m de haut, composé de 144 pales, pesant 3,6 tonnes, suivi par le Professeur danois Poul La Cour encouragé par le gouvernement danois qui voulait fournir de l'électricité dans des zones rurales. Trois ans plus tard, la première éolienne construite pour la production de l'énergie électrique était en 1891 par le fondateur Danois Poul La Cour.

En 1957 la turbine Gadser fut créée par le danois JOHANNES JUUL, cette éolienne tripale génère une puissance de 200 KW.

L'exploitation de l'énergie électrique à partir de l'énergie potentielle des masses d'air en mouvement ne débute pratiquement qu'au XXème siècle lors du premier choc pétrolier en 1973 [7,11], cette fois à plus grande échelle. Avant cette date, et plus précisément durant la période 1961-1973, le développement des éoliennes s'est véritablement stoppé à cause de la concurrence déloyale avec les autres types d'énergies classiques. Le coût du KWh thermique était moins élevé par rapport à la source éolienne [4]. Bien entendu, c'est à partir de décembre 1997 que l'essor des éoliennes prend son véritable développement et précisément lors de la conférence- Cadre de Kyoto des Nations Unies sur les changements climatiques.

Evidemment, c'était un véritable challenge mondial qui a été pris au sérieux, et durant cette conférence, la majorité des pays industrialisés se sont engagés à réduire leur émission de gaz à effet de serre pour le ramener à leur niveau de 1990 [12,13], et se tournent vers des alternatives de production d'énergie plus propres.



Figure 1-1 Première aérogénératrice de Poul La Cour en 1891 à Askov, Danemark [5].

1.2.3 Situation actuelle de l'énergie éolienne

Dès le premier choc pétrolier, l'exploitation de l'énergie éolienne a connu pendant environs 23 ans un grand essor sans précédent.

Selon le rapport annuel du Conseil Mondial de l'Energie Eolienne (Global Wind Energy Council GWEC), l'année 2020 a été l'année record pour l'industrie éolienne, 93 (GW)

d'éolien de plus avaient été raccordés au réseau. Une telle progression annuelle fulgurante n'a jamais été vue avant 2020. Son meilleur résultat a été réalisé en 2015 avec 63,8 GW ajouté.

L'année 2020 a vu des nouvelles installations éoliennes dépassant les 90 GW, soit 53 % croissance par rapport à 2019, portant la capacité totale installée à 743 GW, soit une croissance de 14% par rapport à l'année dernière, (figures (1.2) et (1.3)).

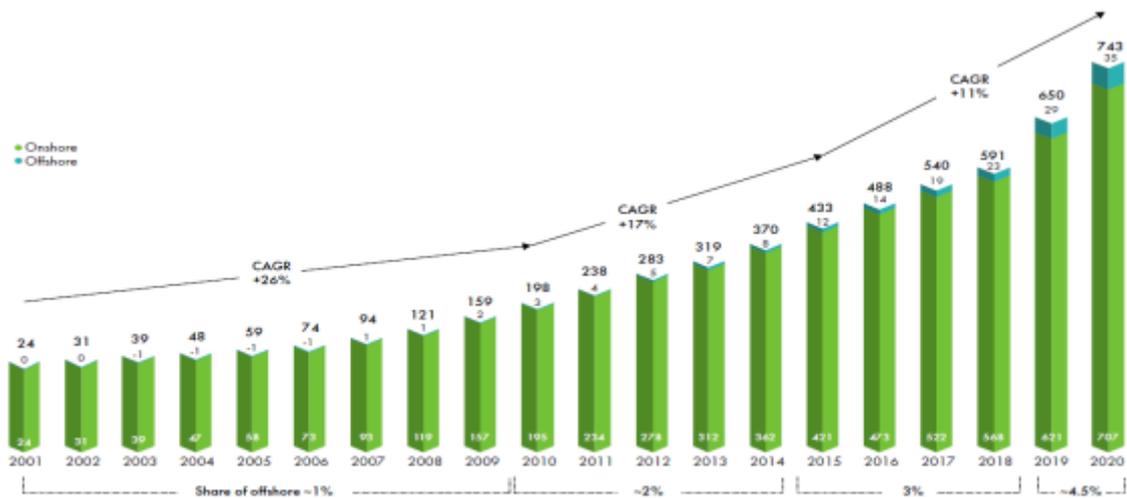


Figure 1-2 Evolution de la puissance totale du parc éolien installée dans le monde 2001-2020[W01].



Nouvelles installations éolienne en 2020

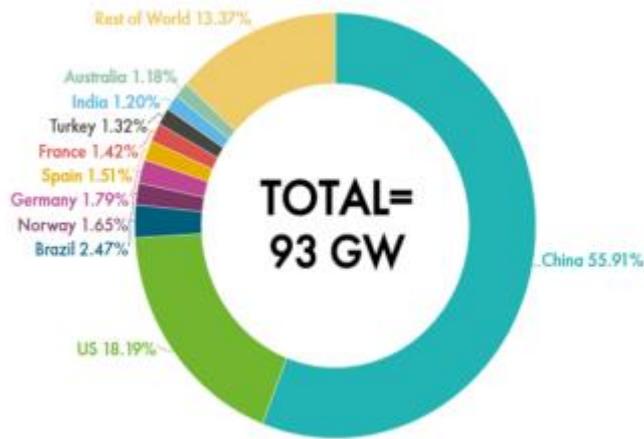


Figure 1-3 Répartition de la nouvelle capacité de production éolienne ajoutée en 2020 [W01].

Selon la même source (GWEC), le segment de l'éolien de type "terrestre" ou "onshore", a enregistré une mise en service de 86,9 GW, soit 59 % de plus qu'en 2019, ce qui porte la puissance totale installée de ses capacités à 707,4 GW, tandis que l'éolien de type "marin" ou "offshore" a enregistré 6,1 GW poussant la puissance totale de son parc à 35,3 GW, c'est la seconde meilleure année de l'histoire de ce type.

Nouvelles installations Onshore (%)

Nouvelles installations Offshore (%)

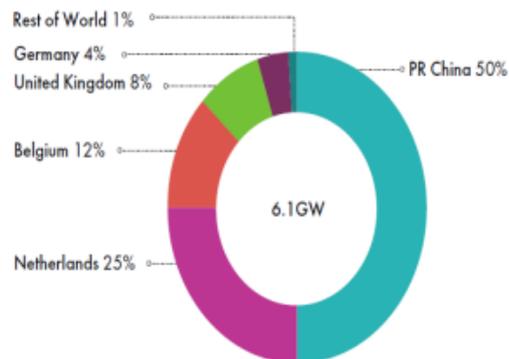
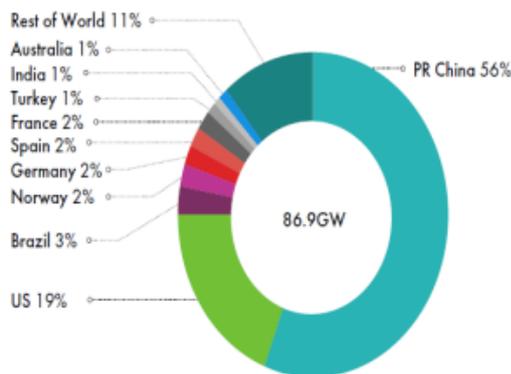


Figure 1-4 Nouvelle capacité installée des éoliennes par type (année 2020) [W01].

Total installations Onshore (%)

Total installations Offshore (%)

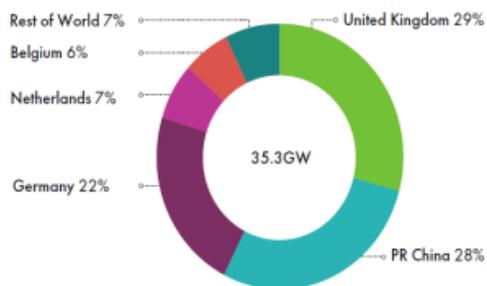
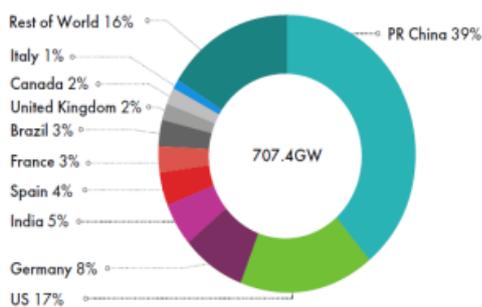


Figure 1-5 Les plus grands pays exploitants d'énergie éolienne par type (Onshore/ Offshore) [W01].

On s'aperçoit que l'année 2020 a été principalement marquée par une nouvelle dynamique de l'énergie éolienne. La Chine devance le classement mondial, suivi des États-Unis, En troisième et quatrième place on trouve respectivement l'Allemagne et l'Inde avec 62 GW et 38 GW de puissance installée, l'Espagne et le Royaume-Uni sont en cinquième et sixième place. La Chine se trouve toujours en tête de classement avec 289 gigawatts, soit 39 % de la capacité mondiale. Le marché américain s'est également développé de manière extraordinaire et a augmenté de près de 17 gigawatts en 2020 avec un nouveau record et des parcs éoliens totalisant 122 gigawatts, La Chine détient plus du tiers de la puissance mondiale.

Les dix premiers marchés de l'énergie éolienne n'ont pratiquement pas changé. Le Brésil est passé de la 9e à la 8e position avec un volume de marché fort de 2,5 gigawatts (total : 18 gigawatts), tandis que la France est passée de la 8e à la 7e position.

Le tableau suivant synthétise les pays les plus exploitants d'énergie éolienne, dont deux (02) avec plus de 10 GW installés, et 06 qui ont passé la barre des 1 GW.

Pays /Région	2020	Nouvelles capacités 2020	2019	2018
Chine	290000	52000	237029	209529
Etats-Unis	122328	16895	105433	96363
Allemagne	62784	1427	61357	59313
Inde	38625	1096	37529	35129
Espagne	27446	1638	25808	23494
Royaume-Uni	24167	652	23515	20743
France	17949	1303	16646	15313
Brésil	18010	2558	15452	14707
Canada	13588	175	13413	12816
Italie	10850	280	10512	9958
Turquie	9305	1249	8056	7369

Tableau1- 1 Les plus grands pays exploitants d'énergie éolienne [W02].

Selon le taux de croissance des dernières années, le Conseil Mondial de l'Energie Eolienne estime que la production d'énergie éolienne continuera son développement dans les années qui suivent. Les estimations mentionnées dans la figure (1.6) prévoient une capacité mondiale de l'énergie électrique à base du vent de l'ordre de 743 GW éolienne en 2020 et qui peuvent atteindre les 1212.3 GW à l'horizon de l'année 2025, soit 63.16 % de plus qu'en 2020.



Figure 1-6 Prévision globale de la capacité installée d'énergie éolienne entre 2020-2025[W01].

1.2.4 Potentiel éolien en Algérie

Malgré le potentiel considérable qui peut être exploité en Algérie pour la production d'énergie électrique à base de l'éolienne, surtout dans le sud où les vitesses de vents peuvent dépasser 6m/s dans la région de Tindouf et jusqu'à 7m /s dans la région d'Adrar, la puissance éolienne totale installée reste toujours insignifiante.

Avant toute éventuelle implantation d'un parc éolien, l'estimation de l'énergie éolienne disponible dans une région devient nécessaire comme le cas de l'Algérie qui a été réalisée par le Centre de Développement des Energies Renouvelables CDER, figure (1.7) depuis les années 90 à travers la production des atlas de la vitesse du vent [6]. C'est ce qui a permis d'ailleurs d'identifier huit zones ventées susceptibles d'être de bon endroits de recevoir des installations éoliennes : [6]

- Deux zones sur le littoral.
- Deux zones sur les hauts plateaux.
- Quatre zones en sites sahariens.

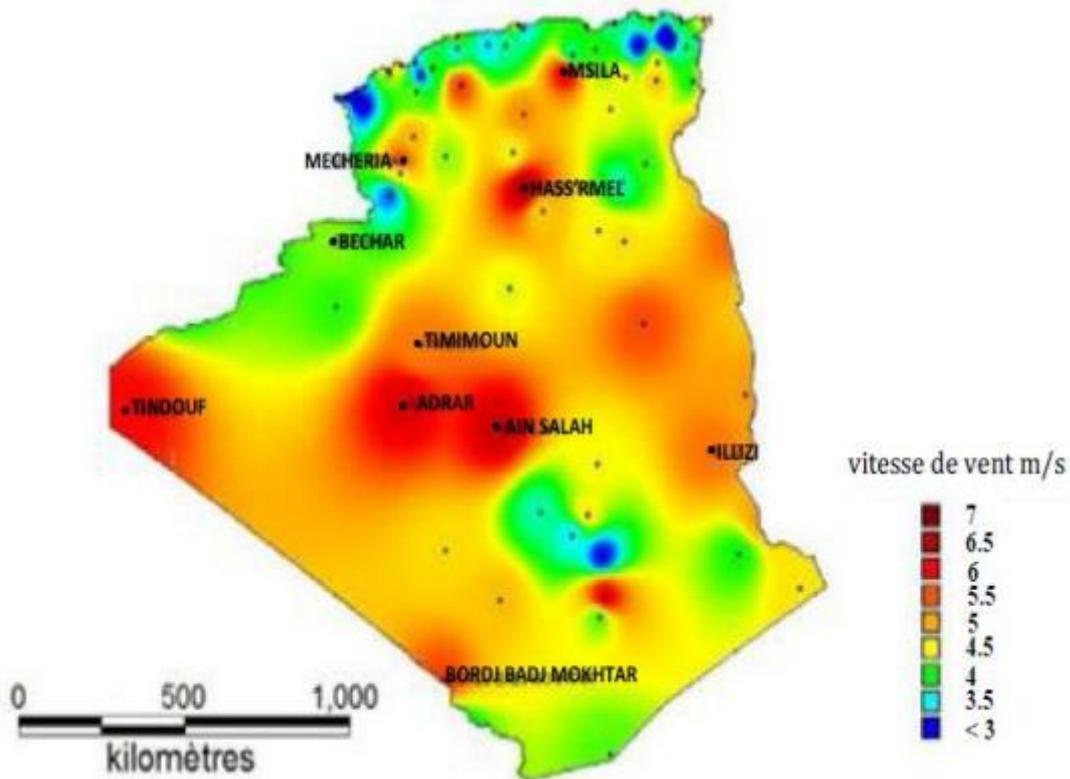


Figure 1-7 Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol (m/s) en Algérie [7].

1.2.5 Energie éolienne en Algérie

La première tentative d'utilisation des éoliennes en Algérie remonte à 1957, avec l'installation d'un aérogénérateur de 100 kW sur le site des Grands Vents (Alger). Ce prototype de 25 m de diamètre et de 30m de haut (figure (1.8)), conçu par l'ingénieur français ANDREAU, avait été installé initialement à St-Alban en Angleterre [8].



Figure 1-8 Eolienne installée en Algérie (Grand Vent) en 1957 [8].

Autrefois, durant la période de colonisation française, le service de la colonisation et de l'hydraulique relevant des militaires qui contrôlaient les territoires du sud algérien avait installé en 1953 une autre éolienne constituée d'un mât de 24 m surmonté d'une hélice à trois pales d'un diamètre de 15 m [9], elle se trouve actuellement à l'intérieur de la station de l'Institut National de Recherche Agronomique (INRA) d'Adrar.



Figure 1-9 Éolienne installée en Algérie en 1953 [10].

En Algérie, l'énergie éolienne constitue un deuxième axe de développement des énergies renouvelables après le solaire, à cet effet, la wilaya d'Adrar a bénéficié à la faveur d'un partenariat Algéro-Français première du genre à l'échelle nationale, d'un projet de ferme de 12 éoliennes de 850 kW chacune et d'une puissance cumulée de 10.2MW se trouve dans la région de Kabertene (80 km au nord d'Adrar), ce projet est implanté sur une superficie de 30 hectares et a été mis en service le 8 juin 2014.

Les turbines utilisées dans cet édifice sont à rotor tripale de 52 m de diamètre de type « G52/850/50-60Hz », équipées par des générateurs asynchrones à double alimentation (GADA) et fournies par le constructeur espagnol GAMESA.



Figure 1-10 La 1ère ferme éolienne de 10MW à Kabertène (Adrar) [9].

1.3 Notions théoriques sur l'éolien

1.3.1 Principe de l'énergie éolienne

L'ensoleillement de la terre provoque indirectement un perpétuel déplacement des masses d'air créées par la pression du réchauffement et du refroidissement de certaines zones de la planète constituant ainsi la première ressource éolienne.

Un aérogénérateur transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique rotative. Cette dernière est transmise à travers un système d'entraînement, généralement composé d'un multiplicateur de vitesse, à une génératrice électrique pour produire l'électricité, figure (1.11).

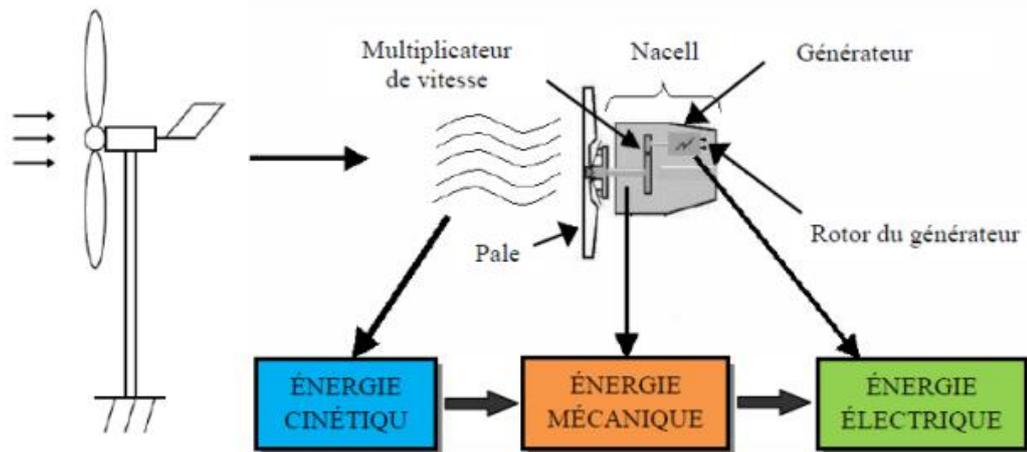


Figure 1-11 Principe de conversion de l'énergie éolienne [11].

1.3.2 Eolien domestique

L'éolien domestique ou encore éolien individuel ou petit éolien couvre la gamme des puissances de 20W à 100kW réparties en trois catégories : micro-éoliennes de 20W à 500W, mini-éoliennes de 500W à 1kW et petites éoliennes de 1 à 100kW. Au-delà les projets s'apparentent au grand éolien [17]. Aujourd'hui il existe plus de 100 modèles différents proposés par les constructeurs. Généralement, les éoliens domestiques de 100 watts à 20 kilowatts (moyennes et petites puissances), sont montés sur des mâts de 10 à 35 mètres et elles comprennent le plus souvent deux à trois pales, autonomes en site isolé ou bien raccordées au réseau. L'éolien domestique est utilisé principalement en milieu rural pour alimenter des appareils électriques (éclairage, pompes, instruments de bord...) de manière durable et économique. L'élément essentiel pour qu'une éolienne domestique soit économiquement rentable est le vent, qui doit être à la fois puissant et fréquent. Généralement, Les éoliens domestiques classiques sont à axe horizontal [18].

1.3.3 Eolien urbain

Le nom Eolien urbain est spécifique pour les systèmes de production d'énergies éoliennes spécialement adaptés aux milieux urbains. La production d'énergie éolienne dans les zones urbaines est particulièrement difficile pour : localiser la direction et la vitesse du vent qui est turbulent avec des variations rapides, sites d'implantation difficiles d'accès (bâtiments par exemple). C'est pour ça, la technologie d'éolien urbain a émergée par rapport à l'éolien classique. Différents types d'éoliennes avec deux catégories principales (à axe horizontal ou à

axe vertical) ont été développés par les constructeurs qui peuvent s'adapter aux conditions particulières des zones urbaines. Cependant, le potentiel est important et la production est proche de l'utilisation [18]-[30].

1.3.4 Classification des éoliennes

On classe les aérogénérateurs suivant plusieurs facteurs à savoir : mode de fonctionnement, l'emplacement 'Offshore' (placés dans la mer) ou 'Onshore' (placé sur la terre), gammes de puissances [12].

1.3.4.1 Générateurs éoliens selon la gamme de puissance

Selon la puissance on peut classer les éoliennes en trois catégories et cela en fonction de la puissance nominale produite, donc on trouve des éoliennes de petite, moyenne et grande puissance.

Le tableau suivant synthétise les trois catégories des éoliennes :

Echelle	Diamètre des pales	Valeur de puissance
Petite puissance	< 12m	< 45 KW
Moyenne puissance	12 à 45 m	40 kW à 1MW
Grande puissance	< 46m	< 1MW

Tableau1- 2 Classification des éoliennes [13].

La figure (1.12) illustre l'augmentation de la taille moyenne des éoliennes commerciales avec le temps.

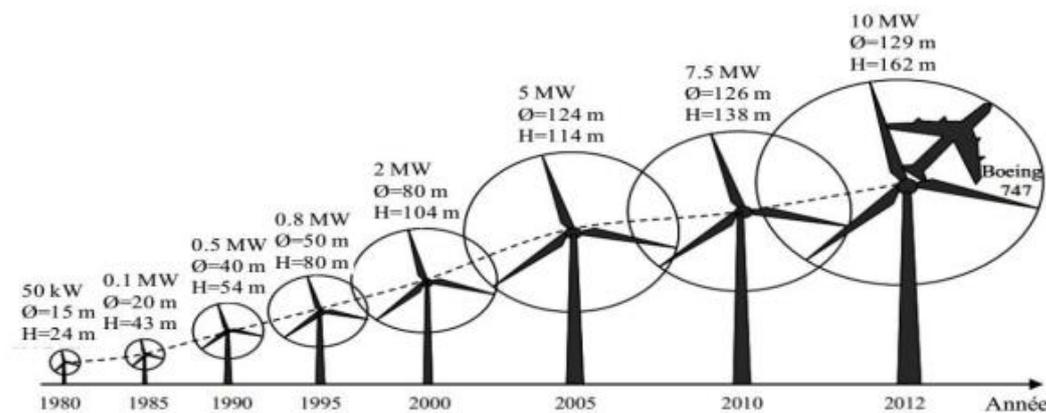


Figure 1-12 Différentes taille et puissance des éoliennes au fil des années [13].

1.3.4.2 Types d'éoliennes (selon axe)

Les turbines éoliennes sont classées selon la disposition géométrique de leur arbre sur lequel est montée l'hélice en deux types : les éoliennes à axe vertical DARRIEUS, SAVONIUS principalement et à axe horizontal bipales, tripales et multi-pales.

1.3.4.2.1 Turbines éoliennes à axe vertical

Elles sont les premières éoliennes à être utilisées dans la conversion d'énergie leurs principe de fonctionnement c'est qu'elle tourne autour d'un axe qui est perpendiculaire à la direction du vent et verticale par rapport au sol. Ce type de turbine peut recevoir le vent de n'importe quelle direction. En plus, les organes de commande, le générateur et le multiplicateur sont disposés au niveau du sol, ce qui rend facile l'entretien et la maintenance. Il existe principalement trois types de ce type d'éoliennes [14]

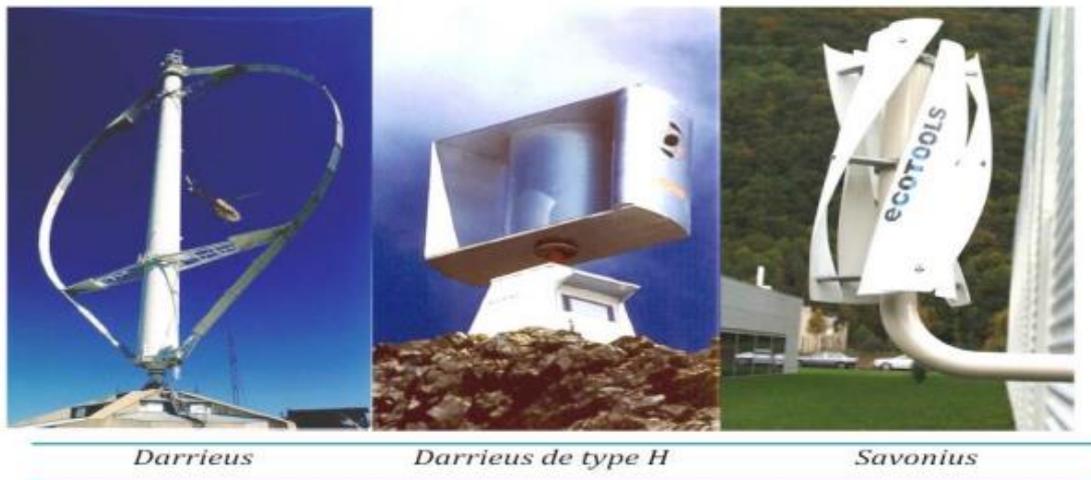


Figure 1-13 Différentes formes d'éoliennes à axe vertical [14].

Les principaux avantages de ce type sont :

- L'implantation du multiplicateur, générateur et les appareils de commande au sol ;
- Maintenance des équipements plus facile ;
- Coût d'installation réduit ;
- Ne nécessite pas d'un dispositif d'orientation ;
- Construction assez simple ;
- Peu de bruit car l'éolienne tourne à faible vitesse.

Leurs inconvénients sont :

- Rendement aérodynamique faible ;
- Options limitées pour le contrôle de la vitesse ou de la puissance.
- Forte variation du couple mécanique sur les éléments des pales ;
- Occupe une importante superficie du terrain pour les puissances élevées ;
- Exige un dispositif auxiliaire pour démarrer (doit démarrer en mode moteur).

1.3.4.2.2 Éoliennes à axe horizontal

Elles sont les plus répandues et les plus utilisées dans les fermes éoliennes à grandes puissances. Elles produisent plus d'énergie et moins exposées aux contraintes mécaniques par rapport aux éoliennes à axe verticale. Elles sont composées d'une ou de plusieurs pales [06].

À cause du compromis entre le coût, le coefficient de puissance, la vitesse de rotation qui caractérisent les éoliennes tri-pales, elles sont le plus utilisées actuellement [09].



(a) *Éolienne bipale* (b) *Éolienne tripale* (c) *Éolienne multipale*

Figure 1-14 Différentes formes d'éoliennes à axe Horizontal [14].

Il existe deux types d'éoliennes à axe horizontal :

- **En Amont (UP-WIND) :** La voilure placée avant la nacelle et alors un système mécanique d'orientation de la surface active de l'éolienne « face au vent » est nécessaire [3].

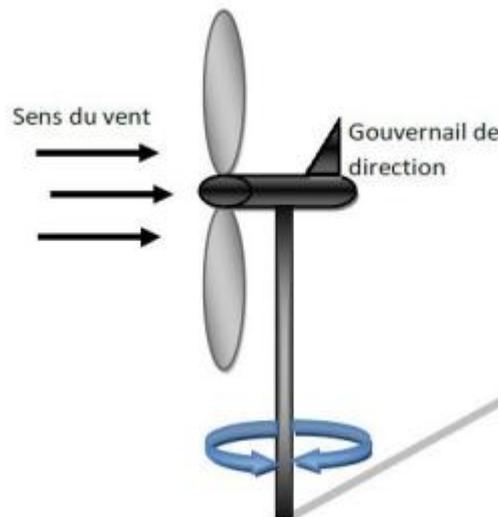


Figure 1-15 Éolienne Amont Horizontale.

- **En Aval (DOWN-WIND) :** dans ce type l'emplacement de la turbine est derrière la nacelle. Dans ce cas la turbine se place automatiquement face au vent [09].

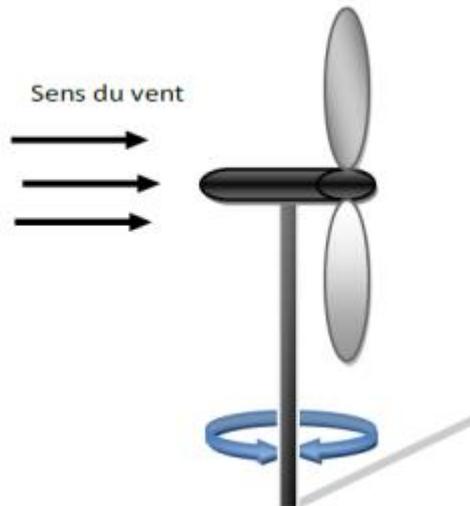


Figure 1-16 Éolienne Aval Horizontale.

Avantages des aérogénérateurs à axe horizontal :

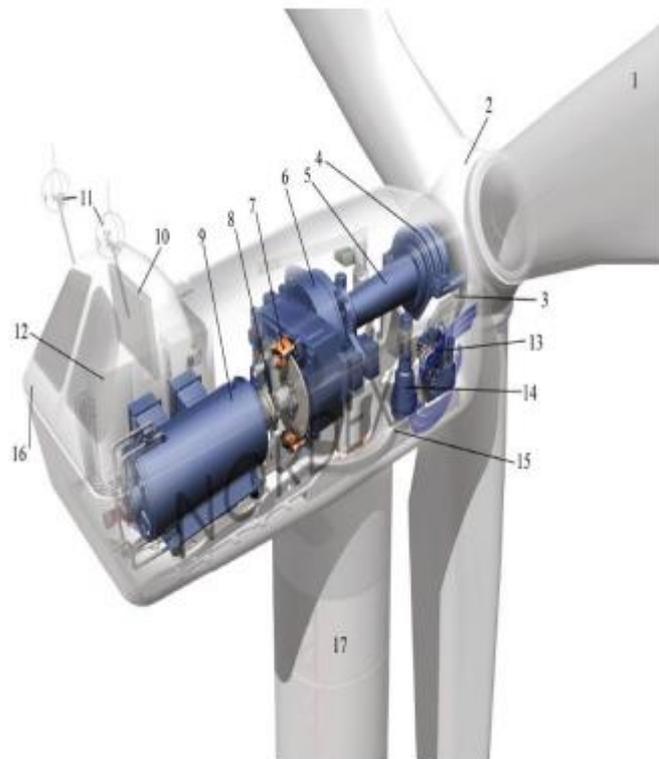
- Occupation du sol est petite par rapport aux éoliennes à axe vertical ;
- Le rendement de ce type des éoliennes reste le plus important ;
- Les éoliennes captent au maximum d'énergie du vent et peuvent s'adapter à la direction du vent ;
- La hauteur joue un rôle très important au niveau d'efficacité énergétique vue la position du récepteur du vent ;
- Possibilité d'avoir d'un maximum de puissance en contrôlant la vitesse via des convertisseurs statiques ;
- Ces éoliennes peuvent être auto démarrées ;
- Rotor positionné en hauteur donnant accès à des vents élevés ;

Les inconvénients des aérogénérateurs à axe horizontal même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolienne a quelques désavantages :

- Coût d'installation est plus élevé ;
- La nacelle se trouve au sommet du mât ce qui gêne l'intervention en cas d'incident ;
- Nécessite de longs câbles électriques ;
- Nécessite une tour renforcée et robuste.

1.4 Principaux éléments d'une éolienne à axe horizontal

Les principaux composants d'une éolienne sont illustrés sur la figure (1.17), qui correspond à une turbine à axe horizontal à trois pales de type Nordex N60 (1.3MW).



1 : pales, 2 : moyeu de la turbine, 3 : nacelle, 4 : cardan, 5 : arbre lent, 6 : multiplicateur de vitesse, 7 : frein mécanique à disque, 8 : accouplement flexible, 9 : générateur, 10 : système de refroidissement, 11 : anémomètre et une girouette, 12 : contrôle, 13 : centrale hydraulique, 14 : dispositif d'orientation des pales, 15 : système d'orientation équipés d'un frein à disque, 16: capot en acier, 17: tour.

Figure 1-17 Différentes parties d'une éolienne Nordex N60 (1300 kW) [16,25].

La tour ou le mât : c'est un élément porteur, généralement un tube en acier ou un treillis métallique. Le mat devient de plus en plus haut pour bénéficier du maximum de l'énergie cinétique du vent, éviter les perturbations près du sol aussi permettre l'utilisation de pales plus longues.

La nacelle : placée à la partie supérieure dans la tour, elle regroupe tout le système de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique et divers équipements auxiliaires ainsi que les capteurs et actionneurs de commande.

Le rotor : Il est composé d'un moyeu auquel les pales sont assemblées. Son rôle est de transférer une partie de l'énergie cinétique du vent à l'arbre lent de l'éolienne. Son diamètre détermine la puissance récupérable. Les pales sont fabriquées à base de matériaux composite telle la fibre de verre.

Le moyeu : c'est l'élément qui supporte les pales. L'ensemble moyeu-pales forme le rotor de la turbine.

Les pales : des éléments permettent de capter la puissance du vent et la transférer au rotor. L'ensemble moyeu-pales forme le rotor de la turbine.

Le multiplicateur de vitesse : son rôle est d'adapter la vitesse de la turbine éolienne avec la vitesse de la génératrice électrique.

L'arbre : relie le moyeu au multiplicateur, il contient un système hydraulique permettant le freinage aérodynamique en cas de besoin.

L'arbre secondaire : relie le multiplicateur au générateur. Généralement.

La génératrice électrique : c'est l'élément principal de la conversion mécano-électrique (convertit l'énergie mécanique en énergie électrique) qui est généralement une machine synchrone, asynchrone à cage ou à rotor bobiné [06].

Le système de commande : qui contrôle en permanence le bon fonctionnement de l'éolienne et intervient automatiquement, en cas de défaillance pour l'arrêter.

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.

Le système d'orientation des pâles : Ce système intervient dans le fonctionnement de la turbine, par la variation du calage β ,

Le système de refroidissement : se compose généralement d'un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice et d'un refroidisseur à l'huile ou radiateurs d'eau pour le multiplicateur.

L'anémomètre : situé sur le toit de la nacelle, est un élément de mesure relié à un système de contrôle, son rôle d'activer les mécanismes de freinage de l'éolienne afin de ralentir, et même d'arrêter l'éolienne si le vent est très fort.

La girouette : située sur le toit de la nacelle, ce composant fournit les données nécessaires au système de contrôle pour orienter l'éolienne.

1.5 Zones de fonctionnement de l'éolienne

La turbine éolienne est dimensionnée pour développer sur son arbre mécanique une puissance nominale P_n obtenue à partir d'une vitesse nominale du vent V_n .

Une turbine éolienne à vitesse variable est caractérisée par sa courbe de puissance en fonction de la vitesse du vent.

On distingue quatre (04) zones de fonctionnement d'une turbine éolienne à vitesse variable comme démontre la figure (1.18), où :

V_d : Vitesse du vent correspondant au démarrage de la turbine ;

V_n : Vitesse du vent pour laquelle la puissance extraite correspond à la puissance nominale ;

V_m : Vitesse maximale du vent pour laquelle la turbine ne convertit plus d'énergie éolienne ;

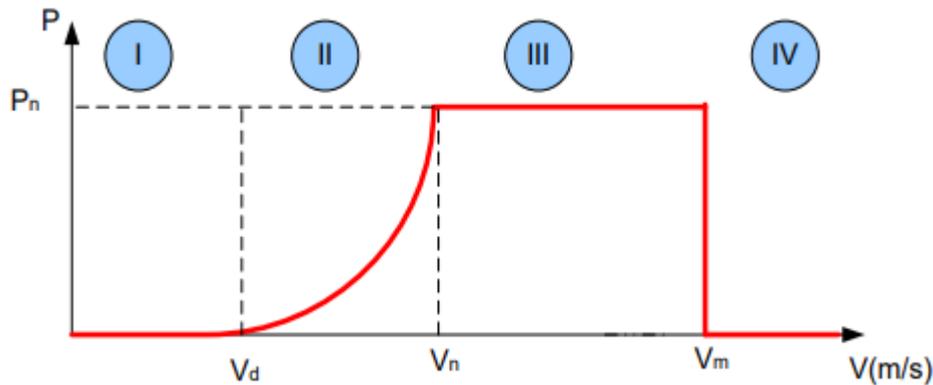


Figure 1-18 Zones de fonctionnement d'une éolienne [15].

- **Zone I** : dans cette zone la vitesse du vent est très faibles et insuffisantes pour démarrer l'éolienne donc la turbine ne fonctionne pas, par conséquent la puissance extraite est nulle ($P = 0$).
- **Zone II** : la vitesse du vent est comprise entre une valeur minimale à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie et une valeur nominale correspondant à la puissance nominale de l'éolienne. Dans cette zone un algorithme de commande est appliqué pour extraire la puissance maximale pour chaque vitesse du vent, cet algorithme est connu sous la terminologie MPPT (Maximum Power Point Tracking).
- **Zone III** : la vitesse du vent est au-dessus de la vitesse nominale, la vitesse de rotation est maintenue constante et la puissance P fournie reste égale à P_n . Par un système d'orientation des pales (Pitch control) qui est utilisée pour réguler la vitesse de la turbine.
- **Zone IV** : la vitesse de vent est trop importante, elle dépasse la valeur maximale admissible par l'éolienne V_m , les pales de la turbine sont mises en drapeaux ($\beta = 90^\circ$) la turbine s'arrête et la puissance générée sera nulle.

1.6 Application des éoliennes

Un système éolien peut être utilisé en trois applications distinctes :

- Systèmes isolés ;
- Systèmes hybrides ;
- Systèmes reliés au réseau.

1.6.1 Systèmes isolés

L'énergie éolienne est aussi utilisée pour fournir de l'énergie à des sites isolés. Pour les réseaux de petites puissances en site isolé l'énergie éolienne est utilisée pour fournir de l'énergie pour le pompage de l'eau dans des champs, produire de l'électricité dans les îles ou encore pour alimenter en électricité des phares, des voiliers, en associant des aérogénérateurs à un ou des groupes électrogènes, souvent diesel [16].

1.6.2 Systèmes hybrides

Les systèmes hybrides sont ceux qui présentent plus d'une source d'énergie comme, par exemple, turbines éoliennes, génératrices Diesel, modules photovoltaïques. Actuellement, le système hybride représente une solution d'approvisionnement énergétique efficace et économique pour le réseau électrique.

Dans les systèmes hybrides, la réalisation d'une commande de contrôle de toutes sources confondues est nécessaire pour maximiser la livraison de l'énergie à l'utilisateur [17].

Il existe de nombreuses combinaisons de différentes sources d'énergies renouvelables pour construire un système hybride dont les principales utilisées sont les énergies éoliennes et photovoltaïques.

1.6.3 Systèmes liés au réseau

Les systèmes connectés au réseau ne nécessitent pas d'un système de stockage d'énergie mais ils nécessitent des convertisseurs statiques, ils sont conçus de manière à couvrir leur demande locale en fonction de la capacité du réseau électrique, l'excédent de production peut être vendu au réseau électrique pour être transféré vers d'autres lieux de la demande.

1.7 Technologies des systèmes éoliens

Les turbines éoliennes peuvent également être classifiées en deux technologies celles dont la vitesse de rotation est fixe FSWT : (Fixed Speed Wind Turbine) et celles dont la vitesse est variable VSWT : (Variable Speed Wind Turbine).

1.7.1 Les éoliennes à vitesse fixe FSWT

Comme leur nom l'indique les turbines à vitesse fixes tournent à une vitesse relativement constante pour différentes vitesses du vent.

Les éoliennes à vitesse de rotation constante sont connectées directement au réseau électrique utilisant un générateur asynchrone à cage d'écureuil comme illustre la figure (1.19).

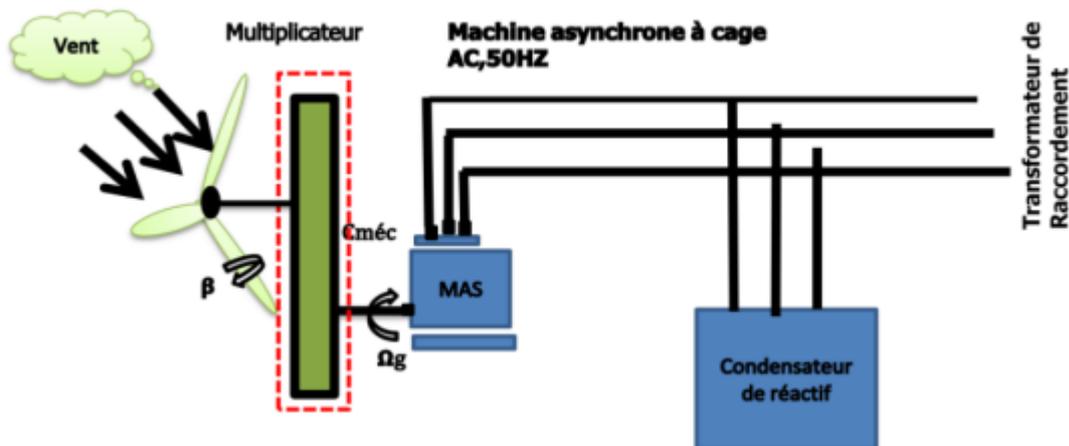


Figure 1-19 Eolienne à vitesse fixe basée sur la machine asynchrone à cage d'écureuil [10].

Elles sont également équipées d'un banc de condensateur afin de réduire la consommation de la puissance réactive nécessaire à la magnétisation de la machine et d'un multiplicateur de vitesse qui entraîne cette machine à une vitesse approximativement constante. Les avantages de cette technologie d'éolienne sont la simplicité, la robustesse, la fiabilité et le faible coût. Leurs inconvénients sont la limitation de la qualité de la puissance car il n'y a pas de convertisseurs statiques, la consommation de la puissance réactive, les contraintes mécaniques élevées [18].

1.7.2 Eoliennes à vitesse variable VSWT

Au cours des dernières années, les turbines éoliennes à vitesse variable sont devenues le type dominant dans les installations des fermes éoliennes. Elles sont conçues pour atteindre une efficacité aérodynamique maximale sur une large gamme de vitesses de vent.

L'opération à vitesse variable permet continuellement l'adaptation de la vitesse de rotation de l'éolienne en fonction de la vitesse du vent afin d'opérer un niveau d'efficacité aérodynamique optimal (MPPT). Ce concept technologique ne peut pas être utilisé sans l'ajout d'un convertisseur électronique de grande puissance dont son rôle est de découpler la vitesse du générateur et la fréquence du réseau électrique. Contrairement à une éolienne à vitesse fixe, les tensions et les fréquences à la sortie de la génératrice ne sont plus imposées par le réseau, ce qui permet de réguler la vitesse de l'éolienne. Une éolienne basée sur ce principe, comporte un rotor éolien, un générateur et un convertisseur statique coté réseau et coté générateur connectés dos-à-dos par une liaison à Courant Continu (CC). La connexion se fait au moyen d'un filtre à inductance de lissage permettant de réduire significativement les harmoniques de courant.

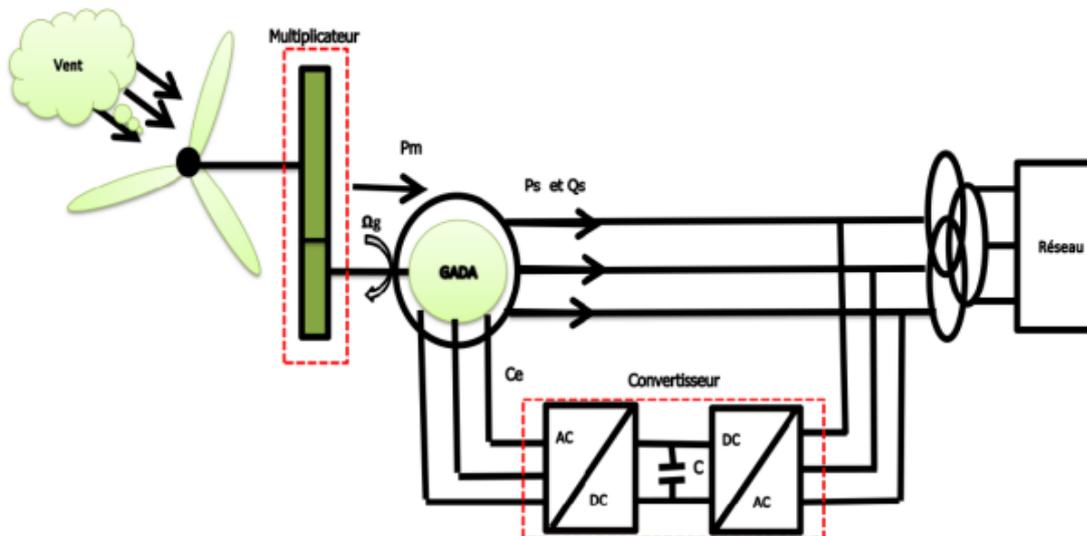


Figure 1-20 Eolienne à vitesse variable basée sur une GADA [10].

1.8 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée à leurs avantages. Parmi les avantages et les inconvénients de l'exploitation de l'énergie éolienne on peut énumérer ce qui suit :

1.8.1 Les Avantages

- L'énergie éolienne est une énergie propre, écologique, économique qui respecte l'environnement et n'a aucun impact néfaste sur l'environnement. Elle contribue efficacement dans la réduction des émissions de CO₂.
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui ne nécessite aucun carburant, étant donné que son fonctionnement est basé sur la puissance du vent.
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable propre, gratuite, et inépuisable, n'engendre aucune pollution. Elle ne rejette aucune substance dangereuse dans l'environnement et n'engendre aucun déchet.
- L'énergie éolienne est abondante dont toutes les générations futures en bénéficier.
- L'énergie éolienne ne crée pas de gaz à effet de serre (sans dégrader la qualité de l'air), ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs, ne pollue pas les eaux (pas de rejet dans le milieu aquatique, pas de pollution thermique) et ne pollue pas les sols.
- Les installations électriques à base de l'énergie éolienne peuvent facilement être arrêtées en cas d'urgence contrairement aux autres installations.
- Les parcs éoliens peuvent être installés sur des terres agricoles et ils se démontent très facilement et ne laissent pas de trace [11, 20,22].
- Cette énergie est intéressante pour les pays en voie de développement puisqu'elle se développe et s'intègre facilement dans un système électrique existant.
- L'industrie éolienne représente un potentiel important en terme d'absorption de chômage grâce à la disponibilité de postes de travail.

1.8.2 Les inconvénients

- L'énergie éolienne est une énergie dépendante de mouvement des masses d'airs donc elle est irrégulière (intermittente).
- L'éolienne a des effets sur le paysage (au niveau de l'esthétique).
- L'éolienne nécessite un entretien régulier et très coûteux, surtout si elle est en pleine mer.
- La pollution visuelle et sonore, l'éolienne produit de bruit à 500 mètres de distance et le volume sonore d'environ 35 décibels.
- Les éoliennes peuvent construire des obstacles mortels face à la migration des oiseaux.
- La perturbation des ondes électromagnétiques (télévision, radio, portable) sont des obstacles à l'installation chez les particuliers et cela oblige l'installation des éoliennes loin des habitations.
- Le vent est une grandeur stochastique, de nature très fluctuante. Ces fluctuations constituent la perturbation principale de la chaîne de conversion éolienne et créent donc des variations de puissance.

1.9 Types des machines électriques utilisées dans les systèmes éoliens

Aujourd'hui, on utilise plus fréquente les turbines éoliennes pour la production d'électricité, c'est pourquoi l'utilisation d'une génératrice électrique est jugée indispensable. De nombreux types de générateurs électriques sont utilisés dans les aérogénérateurs à vitesse fixe ou variable. Ces générateurs peuvent être classés selon différents aspects tels que (à vitesse constante ou à vitesse variable, avec ou sans convertisseur électronique de puissance et avec ou sans de multiplicateur de vitesse.

La figure (1.22) montre la classification des générateurs utilisés dans un système éolien.

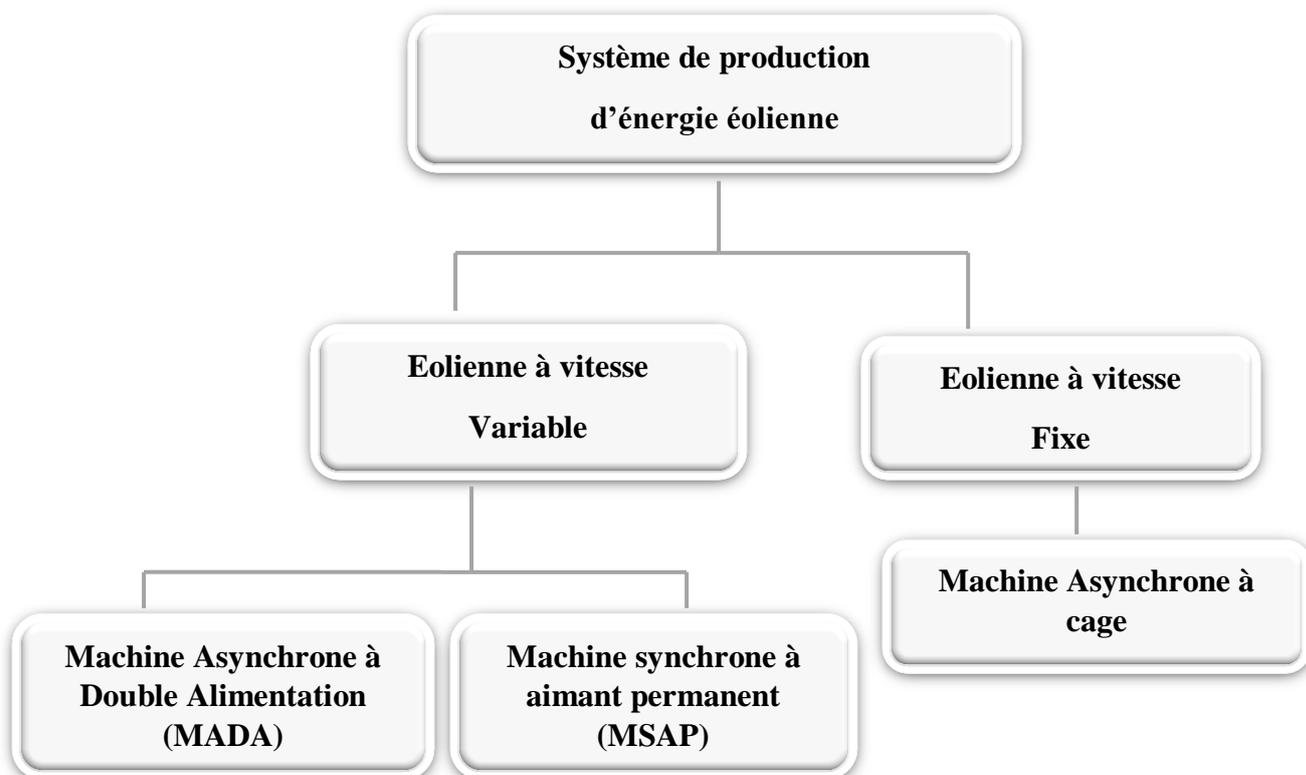


Figure 1-21 Classification des générateurs [19].

1.9.1 Système utilisant une génératrice asynchrone

1.9.1.1 Systèmes à base de la machine asynchrone à cage

La machine asynchrone à cage fut le premier type de génératrice à être utilisée pour les éoliennes de grande puissance, connue par la robuste et peu coûteuse, elle ne comporte aucune pièce d'usure (pas de système balais-collecteur), réduisant ainsi les coûts de maintenance. Par ailleurs, le stator connecté directement au réseau, le besoin en équipement électronique est réduit. Elle est aussi le moins exigeante en termes d'entretien et présentent un taux de défaillance très peu élevé.

La figure (1.23) représente la configuration la plus simple utilisant une machine asynchrone à cage qui est couplée mécaniquement à la turbine par le biais d'un multiplicateur. Le fonctionnement en génératrice débute dès que la vitesse de la génératrice dépasse le synchronisme (mode hypersynchrone). La présence d'une batterie de condensateurs permettant de compenser l'énergie réactive consommée par la génératrice pour sa magnétisation.

La vitesse de la turbine basée sur MAS est généralement maintenue constante via un système d'orientation des pales, ce système de commande s'appelle "pitch control" qui se base sur la rotation des pales par des actionneurs électrique ou hydraulique qui va ajuster l'angle de calage β . Par conséquent, et lors de forte fluctuation du vent, ce système mis en drapeau les pales de la turbine ($\beta=90^\circ$).

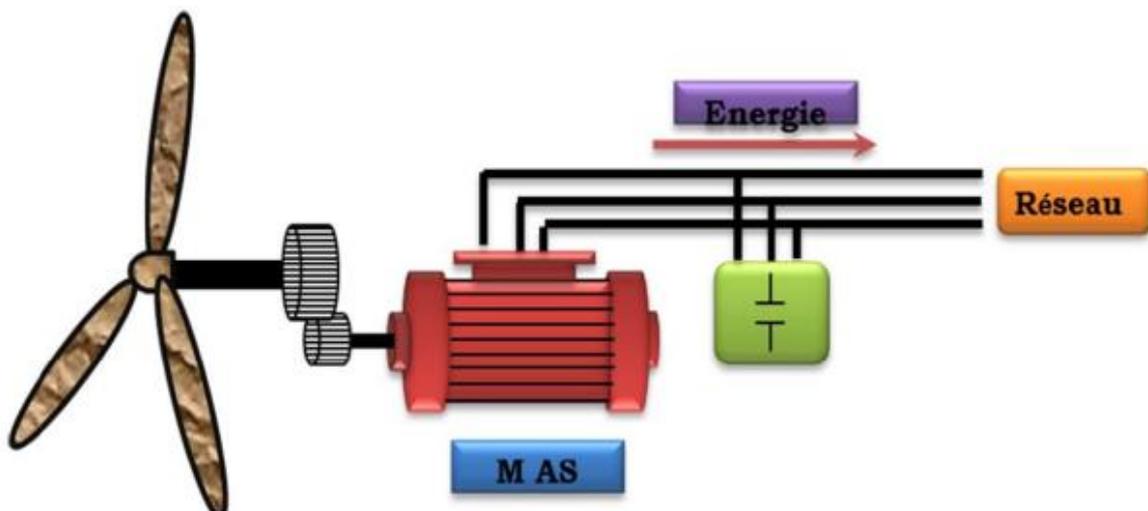


Figure 1-22 Schéma équivalent d'un système éolien basé sur la machine asynchrone à cage [17].

Par contre, cette configuration représente quelques inconvénients :

- Elle ne permet pas une vitesse variable ;
- Maintenance régulière de la boîte de vitesse ;
- La puissance extraite non optimisée ;
- Magnétisation de la machine imposée par le réseau
- Il n'y a pas de contrôle de l'énergie réactive ;

1.9.1.2 Systèmes à base de la Machine Asynchrone à Double Alimentation

La configuration à base de la génératrice Asynchrone à induction à double alimentation (GADA) est généralement employée pour les éoliennes à vitesse variable suivant l'architecture présentée dans la figure (1.24) [20]. Son circuit statorique est connecté directement au réseau électrique. Un second circuit placé au rotor est également relié au réseau mais par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance. Le convertisseur statique coté MADA (CCM) contrôle les puissances active et réactive transitant du stator vers le réseau électrique, tandis que le convertisseur coté réseau (CCR) contrôle la tension de bus continu et assure le fonctionnement avec des facteurs de puissance élevés.

L'avantage de ce type d'architecture se réside sur la taille des convertisseurs de fréquence qui restent plus petit et qui rendent ce concept plus attrayant du point de vue économique.

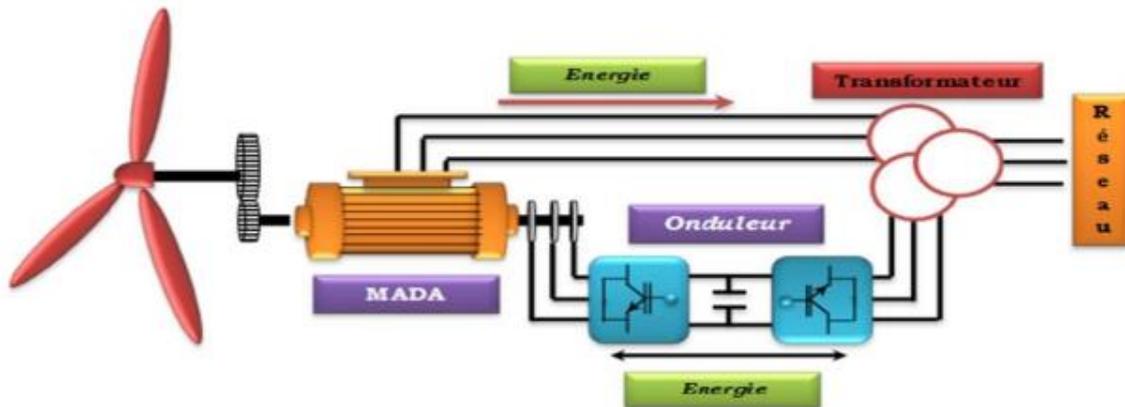


Figure 1-23 Schéma équivalent d'un système éolien basé sur la machine asynchrone double alimentation [17].

Cette configuration représente quelques inconvénients :

- Maintenance du multiplicateur ;
- Maintenance des contacts bagues-balais ;
- Commande complexe ;
- Surcoût des convertisseurs ;
- Electronique de puissance chère.

1.9.2 Système Utilisant une Génératrice Synchrone

Les machines synchrones se composent d'un rotor, qui est la partie tournante, et d'un stator, la partie fixe. Les éoliennes à base de ce type de machine seront connectées au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur statique. Le rotor et le champ magnétique tournant au stator tournent à la même vitesse. Pour réaliser cela, on place systématiquement une interface électronique de puissance entre le stator de la machine et le réseau ce qui permet d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable dans une large plage de variation. Deux types de génératrices sont utilisés dans les applications éoliennes à vitesse variable, à savoir machine synchrone à rotor bobiné ou machine synchrone à aimants permanents figure (1.25).

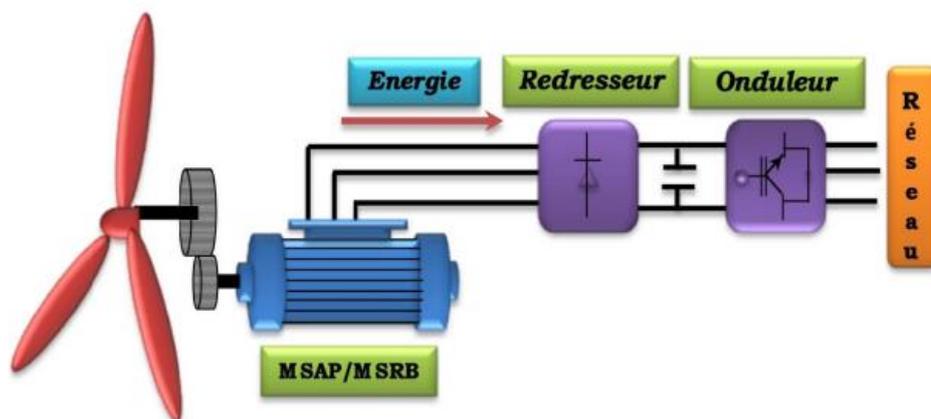


Figure 1-24 Schéma équivalent d'un système éolien basé sur la machine synchrone [17].

1.9.2.1 Générateur Synchrones à Rotor Bobiné

Ce genre de machine est constitué d'un rotor qui comporte des bobines au lieu d'aimants permanents. Pour obtenir le flux magnétique inducteur dans l'entrefer, on alimente les bobines de la machine par des courants continus via des contacts glissant balais-bagues. L'avantage principal d'une machine synchrone à inducteur réside dans le fait que l'on contrôle directement le facteur de puissance de la machine elle-même. On pourra donc jouer sur le courant statorique et le diminuer. Cependant, l'existence du circuit d'excitation pose des problèmes d'équilibrage du rotor, et introduit un convertisseur supplémentaire, donc un coût et des pertes supplémentaires. Il existe deux types de machines synchrones à rotor bobiné à savoir : les machines à pôles saillants et les machines à pôles lisses [15].

1.9.2.2 Générateur Synchrones à Aimants Permanents (GSAP)

Dans les petites et moyennes éoliennes les machines synchrones les plus utilisées sont des machines synchrones à aimants permanents par rapport à la machine asynchrone.

Les éoliennes à base des machines asynchrones, nécessitent les bagues, le balai, et le multiplicateur. Cela rend l'installation plus coûteuse avec une maintenance particulière. Des éoliennes à base des machines synchrones à grand nombre de paires de pôles, couplées directement à la turbine ont été développées. La machine synchrone élimine la technologie de balais et des bagues. La machine synchrone à aimant permanent (MSAP) offre un bon rendement et une souplesse de commande avec une maintenance réduite, tout en fonctionnant avec un facteur de puissance élevé dû à la présence de l'aimant permanent. De plus, cette machine ne consomme pas d'énergie réactive dans le rotor, ce qui la rend propice dans les systèmes de conversion d'énergie éolienne (WECS). Cependant, dans les applications de plus grande puissance, leur utilisation est limitée essentiellement à cause de leur prix qui est plus élevé que celui des générateurs à induction de la même taille.

Du point de vue architectural de la génératrice, plusieurs topologies sont présentées : on distingue notamment les machines à flux radial et les machines à flux axial [15].

1.10 Conclusion

Dans ce chapitre, on a exposé, en première partie quelques généralités sur l'énergie éolienne, son historique et son évolution dans le monde pendant ces dernières années et les prévisions de la production mondiale en se basant sur les dernières statistiques du conseil mondial de l'énergie éolienne. Nous avons également décrit les technologies d'éoliennes ainsi que les différents composants constituant l'aérogénérateur seront brièvement présentés.

La deuxième partie présente les types des éoliennes et leurs fonctionnements (vitesse fixe, vitesse variable, axe vertical, axe horizontal) ainsi que l'intérêt d'exploitation de la vitesse variable pour les nouvelles installations éoliennes. Vu les avantages incontestés de l'aérogénérateur tripal à axe horizontal à vitesse variable on se limitera dans la suite de cette étude à ce mode de fonctionnement.

La troisième partie de ce chapitre a été consacrée aux différents types de machines utilisées et leurs influences sur les plans technique et économique des aérogénérateurs. Notre choix se portera sur l'utilisation d'une chaîne de conversion éolienne basée sur une machine synchrone à aimant permanent MSAP.

Le chapitre suivant, sera consacré à la modélisation mathématique et la simulation des différentes parties constituant une chaîne de conversion d'énergie éolienne basé sur une génératrice synchrone à aimant permanent GSAP fonctionnant à vitesse variable.

Références bibliographiques

- [1] 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.
- [2] Z. TIR, « Contribution à l'étude d'une machine asynchrone à double alimentation sans balais en vue de son application dans le domaine de l'énergie éolienne », Thèse de doctorat, Université Batna, 2014.
- [3] A. MIRECKI « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance » Thèse de Doctorat, INPT de France, 2005.
- [4] T. K. A. BREKKEN, N.MOHAN, "Control of a doubly fed induction wind generator under unbalanced grid voltage conditions". In: IEEE Transaction on Energy Conversion,22 (March (1)) 2007 129–135.
- [5] E. Hau and H. Von Renouard, « The wind resource ». Book, in Springer, pp 451-483, 2006.
- [6] N. KasbadjiMerzouk « Quel avenir pour l'Énergie Éolienne en Algérie ?, » Bul.Ene. Ren, CDER, N°14, Dec 2008, p.6-7.
- [7] K. BOULAAM, « Commande d'une machine à courant alternatif avec système hybride de stockage pour la production éolienne », Thèse de doctorat, USTHB, 2020.
- [8] O. Guerri, "L'Énergie Eolienne en Algérie : un Bref Aperçu", Bulletin des Energies Renouvelables N°. 21, CDER, Ministère de l'Enseignement Supérieur et la Recherche Scientifique, Algérie, 2011.
- [9] B. TOUAL, « Contribution à la Commande et la Gestion des Sources Hybrides d'Énergie Electrique », Thèse de doctorat, Université Batna, 2018.
- [10] F.Z. BELAIMECHE, « Contribution à la commande d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) dédié à l'énergie renouvelable », Thèse de doctorat, Université DJILLALI LIABES de Sidi Bel Abbas, 2018.
- [11] H. BENZAADI, « contribution à la commande d'un aérogénérateur basé sur un GSAP », Thèse de doctorat, Université de Batna, 2020.
- [12] A. SCHAFFARCZYK; 'Understanding wind power technology, theory, deployment and optimization, Wiley, 2014.
- [13]. Y. DJERIRI : « Commande directe du couple et des puissances d'une MADA associée à un système éolien par les techniques de l'intelligence artificielle », Thèse de doctorat université DJILLALI LIABES de sidi bel-abbés 2015.
- [14]. A. DAHBI : « Contribution à la Commande et à l'Amélioration des Performances de l'Énergie Électrique d'une Chaîne de Production Éolienne », Thèse de doctorat, Université Batna, 2018.
- [15] M. LOPEZ, « contribution à l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée » ; Thèse de Doctorat, Université de Paris-Sud 11, France,2007.

[16] O. GERGAUD, « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur », Thèse de Doctorat, ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE de CACHAN, 2002.

[17] A. MAHBOUB : « Commande robuste d'un système de génération éolien a base de génératrice double alimentée sans balais », Thèse de doctorat, Université Batna, 2016.

[18] B. Multon, O.Gergaud, H. Ben Ahmed, X. Roboam, S. Astier, B. Dakyo, C. Nikita ; 'Etat de l'art des aérogénérateurs', Ed. NOVELECT - ECRIN, pp.97-154, 2002.

[19] H. Li, Z. Chen, «Overview of Different Wind Generator Systems and their Comparison», IET Journals & Magazines on Renewable Power Generation, Vol. 2, Issue 2, PP. 123-138, 2008.

[20] B. BELTRAN, "Contribution à la commande robuste des éoliennes à base de génératrices asynchrones double alimentation : Du mode glissant classique au mode glissant d'ordre supérieur", Thèse de Doctorat de l'université de Bretagne occidentale le 6 juillet 2010.

Webographie

[W01]: <https://gwec.net/global-wind-report-2021> 17.06.2023

[W02]: <https://www.wwindea.org> 17.06.2023