

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
UNIVERSITE AHMED DRAIYA ADRAR
FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE



Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme
de master en Commande électrique

Thème :

Etude, Modélisation et Commande d'un Système
Eolien à Base d'une Turbine à Axe Vertical

Evaluation le : 24/06/2021

Présenté par :

Mr. Zahoui Athmane abdessamed

Mr. Boudenna Omar abdelhak

Membres de jury:

Encadreur : Dr. HARROUZ Abdelkader

Co- Encadreur : Dr. Beltrache Djamel

Président: Prof. Messaoud HAMOUDA

Examineur : Mr. Massmoudi Ramdhan

Année Universitaire : 2020/2021

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne populaire et démocratique
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

UNIVERSITE AHMED DRAYA - ADRAR
BIBLIOTHÈQUE CENTRALE
Service de recherche bibliographique
N°.....B.C/S.R.B//U.A/2021



جامعة احمد دراية - ادرار
المكتبة المركزية
مصلحة البحث البليوغرافي
الرقم.....م.م/م.ب.ب/ج.أ/2021

شهادة الترخيص بالإيداع

انا الأستاذ(ة): حور عبد القادر
المشرف على مذكرة الماستر.
الموسومة ب: Etude Modélisation et commande d'un système éolien à base d'une turbine à axe vertical
من إنجاز الطالب(ة): يودنة عمر عيد الحقة
و الطالب(ة): راهوي عثمان عيد الصمد
كلية: العلوم والتكنولوجيا
القسم: العلوم والتكنولوجيا
التخصص: الالكترونىة بحكم
تاريخ تقييم / مناقشة: 2021/06/24
أشهد ان الطلبة قد قاموا بالتعديلات والتصحيحات المطلوبة من طرف لجنة التقييم، وان المطابقة بين النسخة الورقية والإلكترونية استوفت جميع شروطها.
وإمكانهم إيداع النسخ الورقية (02) والأليكترونية (PDF).

- امضاء المشرف

ادرار في: 2021/07/08

مساعد رئيس القسم:-

مساعد رئيس قسم علوم التكنولوجيا والتكنولوجيا
والتقييم في التدرج بكلية العلوم والتكنولوجيا

A-HARROU Z

ملاحظة: لاتقبل أي شهادة بدون التوقيع والمصادقة.

Dédicace

Nous dédions ce modeste travail, comme preuve de respect, de gratitude, et de reconnaissance à :

- *Nos chers parents : Qui n'ont jamais cessé de nous encourager et nous conseiller*

Ils nous ont beaucoup aidé tout au long de notre chemin, grâce à leur amour, leur dévouement, leur compréhension et leur patience sans jamais nous quitter des yeux ni baisser les bras et leur soutien moral et matériel, on ne saurait jamais traduire ce qu'on ressent vraiment envers eux.

- *Nos frères et sœurs : Pour leur indulgence en notre faveur qu'ils touchent ici l'affection la plus intime qu'on ressent à leur égard.*
- *Nos amis et collègues : Pour leur compagnie et bons moments passés ensemble*

Remerciement

- ✚ *Avant toute chose, je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donnée courage, Patience et force durant toutes ces années d'étude.*
- ✚ *Nous tenons à présenter nos très sincères remerciements à notre encadreur de ce mémoire Dr. HARROUZ Abdelkader et notre co-encadreur Dr. Beltrache Djamel, pour leur soutien, leurs encouragement, sont bienveillance et les critiques pertinentes qui nous ont été précieuses tout au long de ce travail.*
- ✚ *Nos remerciements s'adressent particulièrement à notre président de jury Prof. Messaoud HAMOUDA qui a accepté de examiner ce travail et Pour leur avis critique, Pour leur soutien émotionnel et Pour avoir relu notre mémoire et corrigé certaines imperfections.*
- ✚ *Nos voudraions exprimer nos reconnaissances envers les amis et collègues qui ont apporté leur soutien moral et intellectuel tout au long de ma démarche.*

✚ Zahoui

✚ Boudenna

الملخص:

يسير العالم في الوقت الحالي الي التخلي عن الطاقات الملوثة كالطاقة النووية و الطاقات الاستخراجية من بترول و غاز و ذلك من خلال استغلال الطاقات المتجددة ، من بين هاته الطاقات الشائعة. طاقة الرياح. التي تعتمد بشكل اساسي علي سرعة الرياح التي تحول وفق نظام تحويل الي استطاعة كهربائية قابلة للاستغلال. هذا التحويل يتم بواسطة ما يسمى بالمولد المتزامن بالمغناطيس الدائم. الذي يقوم باستقبال استطاعة ميكانيكية و تحويلها لاستطاعة كهربائية. هاته الاخيرة هي ناتجة عن تحويل الاستطاعة الحركية بواسطة العنفة الهوائية. النظام مزود ببطاريات لغرض تخزين الطاقة الكهربائية المحولة .

الكلمات المفتاحية:

الطاقات المتجددة، استطاعة كهربائية، المولد المتزامن،المغناطيس الدائم، العنفة الهوائية

Résume :

Le monde s'oriente dans le moment actuelle vers l'abandon des énergies polluantes telles que l'énergie nucléaire et des énergies extractives telles que le pétrole et le gaz et Cela passe par l'exploitation des énergies renouvelables, parmi ces énergies communes. L'énergie éolienne, qui dépend principalement de la vitesse de vent qui est converti selon un système de conversion en un potentiel électrique exploitable. Cette conversion se fait par ce qu'on appelle un génératrice synchrone a aiment permanent qui reçoit de la puissance mécanique et la convertit en puissance électrique Ce dernier est le résultat de la conversion de l'énergie cinétique par l'éolienne. Le système est équipé des batteries dans le but de stocker l'énergie électrique convertie.

Les mots clé :

Energies renouvelables, puissance électrique, génératrice synchrone, aiment permanent, éolienne, MPPT, GSAP,

Abstract:

The world is moving in the current moment towards the abandonment of polluting energies such as nuclear energy and extractive energies such as oil and gas and This involves the exploitation of renewable energies, among these common energies. Wind energy, which mainly depends on the wind speed which is converted according to a conversion system into a usable electrical potential. This conversion is done by what is called a permanent a-like synchronous generator which receives mechanical power and converts it into electrical power. The latter is the result of the conversion of kinetic energy by the wind turbine. The system is equipped with batteries for the purpose of storing converted electrical energy.

Key words: PMSG, SMC, VSS, PASM, MPPT.

Sommaire

Dédicace	II
Remerciement	IV
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I GENERALITES SUR LES SYSTEMES EOLIENS.....	5
INTRODUCTION.....	6
I.1. ÉVOLUTION HISTORIQUE DE L'ENERGIE EOLIENNE	6
I.2.1 DEFINITION DE L'ENERGIE EOLIENNE :	8
I.2.2. LES DIFFERENTS TYPES D'EOLIENNES :	8
I.2.3. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT :	10
I.2.4. COMPOSITION D'UNE ÉOLIENNE :	11
1.3 L'ENERGIE EOLIENNE EN ALGERIE	13
1.4 Potentiel éolien en Algérie :	14
1.5. Les avantages et les inconvénients d'énergie éolienne.....	17
1.5.1.Avantages de l'éolien	17
1.5.2.Inconvénients de l'éolien.....	17
1.6 CONCLUSION	18
CHAPITRE 2: ETAT DE L'ART DES SYSTEMES DE CONVERSION DE L'ENERGIE EOLIENNE.....	19
2.1. Introduction	20
2.2. Définition de l'énergie éolienne	21
2.3. Historique et croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne.....	21
2.4. L'énergie éolienne en quelques chiffres :	23
2.5. Les systèmes de conversion d'énergie éolienne : Survol	24
2.6 Système de conversion d'énergie éolienne :	25
2.7 Système de stockage d'énergie.....	25
2.9. Carte des vents en Algérie	27
2.10 Programme des énergies renouvelables en Algérie :	30
2.11 Turbines éoliennes à axe horizontal et vertical :	31
2.12. Type de turbine :	33
2.13 Turbines éoliennes à vitesse fixe /variable	34
2.14 Conclusion :	35

CHAPITRE 3 GENERALITES SUR LE GENERATRICE SYNCHRONNE A AIMANT PERMANENT	36
3.1 Introduction :	37
3.2 Présentation :	37
3.3 Constitution :	38
3.3.1 Stator (induit) :	39
3.3.2 Rotor (inducteur) :	39
3.4 Classification du rotor de la MSAP :	39
3.4.1. Le rotor avec pièces polaires :	39
3.4.2. Le rotor sans pièces polaires :	40
3.5 Différentes structures de MSAP :	41
3.5.1 Structure à flux radial :	42
3.5.2 Structure à flux axial :	44
3.6 Aimant permanents	46
3.6.2 Différents types d'aimants [39]:	46
3.6.3 Performances magnétiques des aimants :	46
3.7 Les domaines d'application :	48
3.8 Alimentation et commande de la MSAP:	49
3.9 Bilan de Puissance et rendement :	50
3.10 Avantage de la machine synchrone à aimant permanent :	51
3.11 L'inconvénient de la machine synchrone à aimant permanent	51
3.12 Conclusion.....	52
CHAPITRE 4: MODELISATION ET SIMULATION DE LA TURBINE EOLIENNE.....	53
4.1 Introduction	54
4.2 Le vent :	54
4.4.1 Modélisation de vent :	55
4.5 Modèle de la partie mécanique :	56
4.5.1 Modèle du multiplicateur :	58
4.5.2 Modèle de l'arbre mécanique	58
4.6 Stratégie de maximisation de puissance "MPPT" :	59
4.6.1 Bilan des puissances :	60
4.6.2 Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique :	61
4.6.3 Contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse mécanique :	62
4.7 Résultats obtenus par simulation :	64

4.7.1 MPPT avec asservissement de vitesse :	65
4.7.2 MPPT sans asservissement de vitesse :	67
4.8 Résultats obtenus par simulation	70
4.9.Conclusion.....	71
CONCLUSION GENERALE.....	72
BIBLIOGRAPHIE	75
Bibliographie	76

LISTES DES FIGURES

Figure 1.1 : a) moulin perse b) moulin du moyen âge	6
Figure 1.2 : éolienne à axe horizontal	10
Figure 1.3 : éolienne a axe verticale	9
Figure 1.4 : Constitution d'une éolienne horizontale	11
Figure 1.5 : La distribution de la vitesse moyenne saisonnière du vent en Algérie à 10 m de hauteur	16
Figure 2.1 : Moulins à vent dans la région de La Mancha, Espagne.	22
Figure 2.2 : La première éolienne automatique, fabriquée à Cleveland.....	23
Figure 2.3 : Distribution de la vitesse moyenne annuelle du vent en Algérie à 10 m.....	28
Figure 2.4 : Cartes annuelles de la vitesse du vent en Algérie à 10 m de hauteur	29
Figure 2.5 : Programme algérien des énergies renouvelables.	31
Figure 2.6 : Éoliennes à axe horizontal et vertical.....	32
Figure 3.1 : Photographie d'un moteur à aimants permanent.	38
Figure 3.2 : Stator et rotor de la machine à aimant permanent.....	38
Figure 3.3 : : a - Une tôle (feuille) de l'empilage du stator. b -Couplage étoile des enroulements.....	39
Figure 3.4 : Rotor avec pièces polaires	40
Figure 3.5 : Rotor sans pièces polaires.....	41
Figure 3.6 : Vue schématique des machines : (a) à flux radial, (b) à flux axial.	41
Figure 3.7 : Exemple de structure : (a) à rotor interne, (b) à rotor externe.	42
Figure 3.8 : Génératrice synchrone à aimants permanent montés en surface.....	43
Figure 3.9 : Génératrice synchrone à aimant permanent inséré.....	43
Figure 3.10 : Génératrice synchrone à aimant permanent chapeauté.....	44
Figure 3.11 : Génératrice synchrone à aimant permanent enterré.	44
Figure 3.12 : Structures des machines à flux axial.	45
Figure 3.13 : Courbes de désaimantation de différents types d'aimants	47
Figure 3.14 : Principales applications des machines synchrones à aimants permanents	49
Figure 3.15 : Structure générale d'alimentation et commande de la MSAP.....	50
Figure 3.16 : Bilan de puissance d'une génératrice synchrone à aimant permanent triphasé	51
Figure 4.1 : La chaîne de conversion d'énergie au niveau de l'aérogénérateur.....	54
Figure 4.2 : Modèle mécanique simplifié de la turbine.....	57
Figure 4.3 : Modèle mécanique de la turbine éolienne.	57
Figure 4.4 : Schéma bloc du modèle de la turbine.....	59
Figure 4.5 : Diagramme de conversion de puissance.....	60
Figure 4.6 : Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique.	62
Figure 4.7 : Contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse mécanique.	64
Figure 4.8 : Schéma block simulés en utilisant le logiciel MATLAB/SIMULINK	65
Figure 4.9 : la vitesse de vent avec asservissement	65
Figure 4.10 : la vitesse transmet à la génératrice avec asservissement.....	66
Figure 4.11 : vitesse de vent fixe	66
Figure 4.12 : la vitesse transmet a la génératrice avec vitesse de vent constant	67
Figure 4.13 : Schéma block simulés en utilisant le logiciel MATLAB/SIMULINK	67
Figure 4.14 : la vitesse de vent sans asservissement.....	68
Figure 4.15 : la vitesse transmet à la génératrice avec asservissement.....	68
Figure 4.16 : vitesse de vent fixe	69
Figure 4.17 : la vitesse transmet a la génératrice avec vitesse de vent constant.....	69

Liste des tableaux :

Tableau 1.1 :Rang des Puissances éoliennes Installées dans l’Afrique (fin 2015).....	26
Tableau 2.1 : Avantages et inconvénients des éoliennes à vitesse fixe et variable.	35
Tableau 3.1 : tableau récapitulatif des caractéristiques des aimants	47

Liste des symboles

Symboles spécifiques à la turbine :

v	(m/s)	Vitesse du vent,
m	(Kg)	Masse de l’air,
P_t	(W)	Puissance aérodynamique de la turbine,
P_g	(W)	Puissance mécanique de la génératrice,
P_v	(W)	Puissance théorique maximale extractible d'un vent non perturbé,
ρ	(Kg/m ³)	Masse volumique de l’air en température ambiante (15°C),
S	(m ²)	Surface circulaire balayée par la turbine $S = \pi.R^2$,
C_p	(-)	Coefficient de puissance,
C_{p-max}	(-)	Coefficient de puissance relatif à l’extraction maximale de puissance,
C_c	(-)	Coefficient du couple,
C_{c-max}	(-)	Coefficient du couple relatif à l’extraction maximale de puissance,
Ω_t	(rad/s)	Vitesse mécanique de la turbine,
Ω_g	(rad/s)	Vitesse mécanique de la génératrice,
Ω_t^*	(rad/s)	Vitesse de référence de la turbine,
Ω_g^*	(rad/s)	Vitesse de référence de la génératrice,
R	(m)	Longueur d’une pale (Rayon de l’éolienne),
G	(-)	Gain du multiplicateur,
λ	(-)	Vitesse relative ou Ratio de vitesse,
λ_{opt}	(-)	Vitesse relative optimale,
β	(deg)	Angle de calage des pales,
α	(deg)	Angle d’incidence des pales,
C_g	(N.m)	Couple mécanique sur l’arbre de la génératrice,
C_g^*	(N.m)	Couple mécanique de référence
C_t	(N.m)	Couple mécanique disponible sur l’arbre lent de la turbine,
C_f	(N.m)	Couple de frottement visqueux,
J_t	(Kg.m ²)	Moment d’inertie de la turbine,
J_g	(Kg.m ²)	Moment d’inertie de la génératrice,
J	(Kg.m ²)	Moment d’inertie totale de l’ensemble « turbine + génératrice »,
K_p	(-)	Composante proportionnelle du correcteur PI ,
K_i	(-)	Composante intégrale du correcteur PI
P_a	(-)	La puissance absorbée par l’alternateur
$P_{méc}$	(-)	Puissance mécanique reçue

P _{ém}	(-)	La puissance Electromagnétique de l'alternateur
P _j	(-)	Les pertes Joule
P _u	(-)	Puissance utile

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

L'énergie éolienne prend de plus en plus d'importance dans le monde entier. Ce développement rapide de la technologie de l'énergie éolienne et du marché a des implications importantes pour un certain nombre de personnes et d'institutions : par exemple, pour les scientifiques qui recherchent et enseignent les vents futurs les ingénieurs électriciens et électriciens dans les universités ; pour les professionnels des services publics d'électricité qui vraiment besoin de comprendre la complexité des effets positifs et négatifs que le vent l'énergie peut avoir sur le système d'alimentation; pour les fabricants d'éoliennes ; et pour les développeurs de projets éoliens, qui ont également besoin de cette compréhension pour pouvoir développer des projets éoliens réalisables, modernes et rentables.

Actuellement, cinq pays - Allemagne, USA, Danemark, Inde et Espagne – concentrent plus de 83 % de la capacité éolienne mondiale dans leur pays. Ici, on trouve aussi l'essentiel de l'expertise liée à la production d'énergie éolienne et son intégration dans le système électrique de ces pays. Cependant, l'utilisation de cette source renouvelable de le pouvoir se répand rapidement dans d'autres régions du monde. Cela nécessite les connaissances théoriques et l'expérience pratique accumulées dans les principaux marchés actuels de l'énergie éolienne. A transférer aux acteurs de nouveaux marchés. L'un des principaux objectifs de cette recherche est de connaissances disponibles pour toute personne intéressée et/ou professionnellement impliquée dans ce domaine.

L'utilisation de l'énergie éolienne a une tradition d'environ 3000 ans, et la technologie est devenu très complexe. Elle implique des disciplines techniques telles que l'aérodynamique, dynamique des structures et génie mécanique et électrique. Au cours des dernières années un nombre de livres sur l'aérodynamique et la conception mécanique de l'énergie éolienne ont été publié. Il n'existe cependant aucune publication générale qui traite de l'intégration dès l'énergie éolienne dans les systèmes électriques.

L'énergie éolienne offre de nombreux avantages, ce qui explique qu'elle soit l'une des sources d'énergie à la croissance la plus rapide au monde. Les efforts de recherche visent à relever les défis d'une plus grande utilisation de l'énergie éolienne.

La technologie de l'énergie éolienne est basée sur la capacité de capter l'énergie contenue dans le mouvement de l'air. L'énergie éolienne quantifie le taux de cette extraction d'énergie cinétique. L'énergie éolienne est également le taux de flux d'énergie cinétique transporté par l'air en mouvement. Parce que le mouvement est à la fois la source de l'énergie et le moyen de son transport, l'efficacité de l'extraction de l'énergie éolienne est un équilibre entre le ralentissement du vent tout en maintenant un débit suffisant.

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.

L'objectif de ce mémoire est de contribuer à l'étude des systèmes de contrôle éolien à base d'une turbine à axe verticale ; pour cela, nous avons choisi une éolienne à vitesse variable basée sur un générateur à aimants synchronisés permanents (GSAP).

Ce choix se justifie par l'intérêt porté aux éoliennes, qui sont considérées comme une source d'énergie d'avenir, ou par les nombreuses recherches qu'elles font l'objet de la part de leur structure. Le développement actuel qui permet l'étude des matériaux magnétiques résume que le principal inconvénient de ces structures est le prix des aimants qui n'est plus un obstacle à la construction d'éoliennes géantes basées sur des générateurs synchrones à aimants permanents (GSAP), un objectif qui, il y a des années, était impossible en raison du prix énorme des aimants permanents.

Ce travail est structuré comme indiqué ci-dessous

Dans le premier chapitre on présentera brièvement des généralités sur l'énergie éolienne sous la forme suivante en première partie l'historique et la situation de l'énergie éolienne dans le monde et en Algérie, ensuite l'évolution technologique et les différents types et configurations d'éoliennes et finalement, l'évolution du prix de revient de l'énergie sera discutée. Nous allons nous intéresser plus particulièrement aux éoliennes rapides à axe horizontal de grande puissance qui sont non seulement les plus répandues, mais aussi les plus efficaces.

Dans le chapitre deux, on présente une définition de l'énergie éolienne de manière générale, puis l'évolution des éoliennes durant les dernières décennies. Des statistiques sont données montrant l'évolution de la production et la consommation de l'énergie éolienne dans le monde, ainsi que les différents générateurs utilisés dans les systèmes éoliens.

Dans le troisième chapitre nous abordons une vision générale sur la génératrice synchrone à aimant permanent utilisé dans les systèmes éoliens.

Le chapitre quatre sera consacré à la commande d'une éolienne à vitesse variable. Cette commande a pour but de pouvoir capturer le maximum de puissance possible du vent par la turbine. L'optimisation de cette puissance se fait par la recherche continue de ce point maximal par des techniques dites MPPT (Maximum Power Point Tracking).

Finalement, on terminera ce mémoire par une conclusion générale qui résume les résultats obtenus et expose quelques perspectives de recherche envisagées.

CHAPITRE I
GENERALITES SUR
LES SYSTEMES
EOLIENS

INTRODUCTION

Tout au long de l'histoire de l'humanité, l'énergie éolienne a été exploitée pour des applications à petite échelle telles que le pompage de l'eau de puits ou l'exploitation d'usines de céréales et de textiles. Aujourd'hui, l'énergie éolienne peut être convertie en électricité et les coûts de production de l'énergie éolienne ont diminué de 80 % depuis le siècle dernier. Aujourd'hui, l'énergie éolienne est considérée comme le type d'énergie renouvelable disponible le moins cher [1].

Le reste de ce chapitre est divisé en des sections principales l'historique et la situation de l'énergie éolienne dans le monde et en Algérie, puis l'évolution technologique et les différents types et configurations d'éoliennes et finalement, l'évolution du prix de revient de l'énergie sera discutée.

I.1. ÉVOLUTION HISTORIQUE DE L'ÉNERGIE EOLIENNE

Voir des exemples sur l'évolution de la forme d'éolienne (figure 1.1).



(a)

(b)

Figure 1.1 : (a) moulin perse ; (b) moulin du moyen âge [1]

L'origine de l'éolienne est obscure. La spéculation impliquait la présence de rotors éoliens dans la Grèce classique, la Babylonie, le début de la Gaule et l'Angleterre saxonne, mais aucune référence aux machines éoliennes n'existe dans les archives fiables des périodes

antiques et médiévales. Les moulins à vent et les pompes à vent étaient probablement inconnus des Grecs et des Romains. Cependant, Héron d'Alexandrie fait référence dans le *Pneumatica* à un anémurion (c'est-à-dire une girouette).[2] Selon les interprétations traditionnelles depuis le XVI^e siècle, un appareil constitué d'un rotor à vent à axe horizontal entraînant un piston ou une pompe à air attaché à un orgue musical a été décrit. Mais Schmidt, après avoir traduit un manuscrit ancien, contenant le schéma original de l'appareil, avec les lettres de référence grecques habituelles, n'enregistre que l'orgue musical. Vitruve, moins de deux cents ans après la mort de Héron, a passé en revue de manière approfondie les dispositifs mécaniques connus à cette époque. Il a mentionné les moulins à eau, les roues élévatrices d'eau, les organes hydrauliques et les machines de levage. Il a également discuté des vents, décrit spécifiquement le comportement des girouettes et fait référence à la production de sons d'orgue par l'utilisation d'air forcé sous pression. Mais aucune mention n'a été faite de pompes à vent, de moulins à vent ou d'autres mécanismes actionnés par des voiles ou des palettes [2]. Il n'est donc pas surprenant que ni Vitruve ni, apparemment, tout autre ingénieur classique de la période hellénistique, se référant aux éoliennes, il y a eu une tendance à douter de l'existence de la roue à vent de Héron. Cependant, il n'y a aucune raison de l'écarter complètement, mais il est probable que le rotor de Héron n'était rien de plus qu'un jouet à main qui n'a pas évolué davantage à cette époque [2].

Il existe deux autres incertitudes concernant l'origine de l'éolienne. La première mentionnée par Clarke, tout en discutant d'un ancien livre hindou, impliquait que les moulins à vent étaient monnayés courante vers 400 Be. Mais Law, en traduisant l'*Artha.was Ira* de Kautilya, n'a fait référence qu'une seule fois à l'eau produite par des artifices actionnés par le vent. Deuxièmement, Flettner" a suggéré que le souverain babylonien Hammurabi (vers 1700 Be) prévoyait d'utiliser l'énergie éolienne dans ses projets d'aménagements d'irrigation ambitieux. Cependant, il ne semble pas y avoir de documents corroborants indiquant si la construction de ce système a même commencé [2]. Il n'y a pas non plus d'autres références au développement de l'éolienne à ces époques.

I.2.1 DEFINITION DE L'ENERGIE EOLIENNE :

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 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences[3].

I.2.2. LES DIFFERENTS TYPES D'EOLIENNES :

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

I.2.2.1 Les éoliennes à axe vertical :

Les éoliennes verticales (représentées dans la figure 1.2) comprennent un arbre de rotor principal sur un axe vertical avec les autres pièces clés à la base de la turbine. Les pales de ce type d'éolienne ressemblent davantage à des poteaux sur un carrousel qu'à des rayons sur une roue. Il est idéal pour la production d'énergie résidentielle urbaine. Elles ont un rendement élevé[4].

Les éoliennes à axe vertical ont traditionnellement été reléguées à une catégorie de niche sur le marché global des éoliennes. Historiquement, leur avantage a été qu'elles peuvent produire de l'électricité à partir du vent provenant de n'importe quelle direction, contrairement à une éolienne à axe horizontal qui doit lacet pour tenir compte des changements de direction du vent. Cet avantage vient avec un désavantage associé par rapport aux éoliennes à axe horizontal traditionnelles en termes de rendement global et puissance de sortie. De nombreuses start-ups axées sur une éolienne à axe vertical ont été lancées en grande pompe pour échouer quelque temps plus tard, car leurs conceptions ne sont tout simplement pas assez efficaces pour rivaliser avec les éoliennes à axe horizontal, à la fois sur une base de coefficient de puissance et sur une base économique (mesurée en dollars par kilowatt)[5].

I.2.2.2 Les éoliennes à axe horizontal :

Ce sont les machines les plus répandues actuellement du fait de : -Leur rendement est supérieur à celui de toutes les autres machines. Elles sont appelées éoliennes à axe horizontal car l'axe de rotation du rotor est horizontal, parallèle à la direction de vent. Elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales, ou des hélices multipales pour le pompage de l'eau[6].

-Elles ont un rendement élevé.

-Les éoliennes à axe horizontal (ou à hélice) sont de conception simple.

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

- les éoliennes à rotation lente "multi-pales" Elles sont, depuis longtemps, relativement répandues dans les campagnes, et servent quasi exclusivement au pompage de l'eau.

Aérogénérateurs :

Les éoliennes à rotation rapide, bi- ou tripales en général, constituent actuellement la catégorie des éoliennes en vogue, et sont essentiellement affectées à la production d'électricité, d'où leur nom le plus courant "d'aérogénérateurs". Parmi les machines à axe horizontal parallèle à la direction du vent, il faut encore différencier l'aérogénérateur dont l'hélice est en amont de machine par rapport au vent « hélice au vent »et celle dont l'hélice est en aval de la machine par rapport au vent « hélice sous le vent »[6].



Figure 1.2: éolienne a axe verticale [7]



Figure 1.3: éolienne à axe horizontal. [8]

1.2.2.3. Principe de l'éolienne verticale :

Les éoliennes à axe vertical ont été testées et utilisées plus largement dans les années 1980 et 1990 car elles étaient plus silencieuses et pouvaient fonctionner sans nécessiter de contrôle de lacet, quelle que soit la direction du vent.

L'éolienne à axe vertical (VAWT) est une éolienne dont l'axe de rotation principal est orienté dans le sens vertical[9].

Les VAWT étaient des conceptions innovantes qui ne se sont pas avérées aussi efficaces en général que les HAWT, mais elles présentent quelques bonnes caractéristiques, notamment un fonctionnement silencieux.

Parce qu'ils ne sont pas aussi efficaces que les HAWT, ils sont rarement utilisés dans les grandes unités. La plupart des VAWT sont des unités plus petites qui peuvent être situées dans des emplacements résidentiels et commerciaux car elles sont beaucoup plus silencieuses que les turbines à axe horizontal[9].

1.2.3. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT :

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

Au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique, en utilisant des profils aérodynamiques. Le flux d'air crée autour du profil une poussée qui entraîne le rotor et une traînée qui constitue une force parasite[6].

Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique[6].

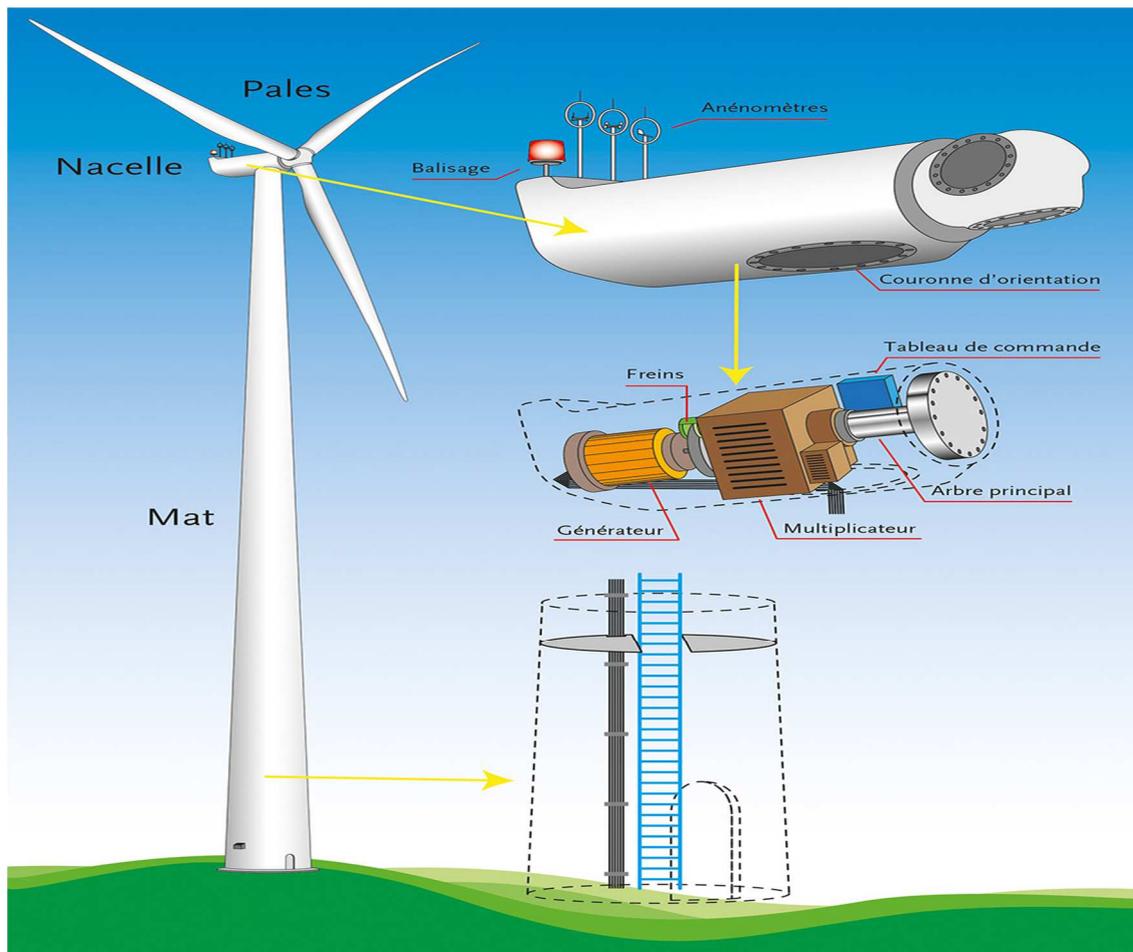


Figure 1.4 : Constitution d'une éolienne horizontale [10].

I.2.4. COMPOSITION D'UNE ÉOLIENNE :

Une éolienne se compose de cinq parties principales et de nombreuses parties auxiliaires. Les pièces principales sont la tour, le rotor, la nacelle, le générateur et la fondation ou la base. Sans tout cela, une éolienne ne peut pas fonctionner[11].

Fondation :

La fondation est sous terre pour les turbines on shore ; on ne le voit pas parce qu'il est recouvert de terre. C'est un gros et lourd bloc de béton structuré qui doit contenir toute la turbine et les forces qui l'affectent. Pour les turbines offshore, la base est sous l'eau et n'est pas visible. Dans les turbines offshore qui sont bien dans la mer, la base flotte, mais sa masse est suffisante pour supporter le poids de la turbine et toutes les forces qui s'exercent sur elle et la maintenir droite[11].

La tour :

Dans la plupart des turbines modernes est en acier tubulaire rond d'un diamètre de 3 à 4 m (10 à 13 pi), avec une hauteur de 75 à 110 m (250 à 370 pi), selon la taille de la turbine et son emplacement. La règle de base pour une tour de turbine est qu'elle a la même hauteur que le diamètre du cercle que font ses pales lorsqu'elles tournent. Normalement, plus une turbine est haute, plus elle est soumise au vent avec une vitesse plus élevée. En effet, plus on est loin du sol, plus le vent est rapide (le vent n'a pas la même vitesse à différentes distances du sol)[11].

Rotor :

Le rotor est la partie tournante d'une turbine ; il se compose (principalement) de trois pales et de la partie centrale à laquelle les pales sont attachées, le moyeu. Une turbine ne doit pas nécessairement avoir trois pales ; il peut avoir deux, quatre ou un autre nombre de lames. Mais le rotor à trois pales a la meilleure efficacité et d'autres avantages.

Les lames ne sont pas solides ; ils sont creux et sont en matériau composite pour être légers et résistants. La tendance est de les rendre plus grandes (pour plus de puissance), plus légères et plus solides. Les pales ont la forme d'un profil aérodynamique (identique aux ailes d'un avion) pour être aérodynamiques. De plus, ils ne sont pas plats et présentent une torsion entre leur racine et leur extrémité. Les lames peuvent tourner jusqu'à 90° autour de leurs axes. Ce mouvement est appelé pas de pale[11].

La nacelle :

Est un logement au sommet de la tour qui accueille tous les composants qui doivent être au sommet d'une turbine. Il existe un certain nombre de composants pour le fonctionnement correct et sain d'un système électromécanique compliqué qu'est une turbine. Une partie majeure de la turbine parmi ces composants est le générateur et l'arbre de la turbine qui transfère la puissance récoltée du vent au générateur via une boîte de

vitesses[11].

La boîte de vitesses est un composant essentiel des éoliennes ; il réside dans la nacelle. Une boîte de vitesses augmente la vitesse de l'arbre principal d'environ 12 à 25 tr/min* (pour la plupart des turbines actuelles) à une vitesse adaptée à son générateur. Pour cette raison, l'arbre côté générateur est appelé « arbre à grande vitesse »[11].

Parce qu'une éolienne doit suivre le vent et ajuster son orientation à la direction du vent, son rotor doit tourner par rapport à la tour. Cette rotation est appelée mouvement de lacet dans lequel la nacelle et le rotor tournent autour de l'axe de la tour [11].

1.3 L'ENERGIE EOLIENNE EN ALGERIE

En Algérie, la première expérience avec l'éolienne remonte à l'année 1957 avec l'installation d'un aérogénérateur de 100 kW sur le site des Grands Vents (Alger) qui fut racheté de l'Angleterre par la société « Electricité et Gaz d'Algérie » puis démontée et installée en Algérie. Par la suite, de nombreux autres aérogénérateurs, de plus petites puissances, ont été installés en différentes locations, notamment pour l'alimentation de localités isolées ou d'accès difficiles telles que les installations de relais de télécommunications. Cependant, la technologie des éoliennes n'étant pas encore mature, ces expériences n'étaient pas toujours concluantes. Il est à noter que ce constat était également valable même à l'échelle internationale. Mais après le premier choc pétrolier, d'importants investissements ont été consacrés à la recherche/développement des éoliennes. L'exploitation de l'énergie éolienne pour la production d'électricité a alors pris un essor considérable, notamment depuis la fin des années 80. Les éoliennes actuelles sont de plus en plus fiables, plus performantes et de plus en plus grandes. Ainsi, la taille du plus grand aérogénérateur qui était de 50 kW avec un diamètre de 15 m en 1989 a atteint, en 2014, une puissance de 8 MW, avec un diamètre de 164 m (VESTAS Offshore). La hauteur du mât a augmenté en conséquence pour atteindre dans certaines installations, plus de 150 mètres. Par ailleurs, les grandes éoliennes sont généralement développées et installées dans des zones assez ventées. Cependant, du fait de la saturation des sites terrestres potentiellement exploitables, on assiste, ces dernières années, au développement de machines Low Wind. Pour cette catégorie d'éoliennes dont la hauteur du mât est plus élevée, les pales sont plus grandes et les générateurs électriques plus petits. La puissance éolienne totale installée dans le monde qui était de l'ordre de 6 GW en 1996 est passée à 336 GW en juin 2014. En Algérie, une première ferme éolienne de 10 MW de puissance a été implantée à Adrar et mise en service en juin 2014. La plus grande éolienne de pompage a été installée en 1953 à Adrar par les services de la colonisation et de l'hydraulique. Montée sur un mat de 25 mètres de hauteur, cette machine à trois pales de 15 m de diamètre a fonctionné pendant près de 10 ans[12].

1.4 Potentiel éolien en Algérie :

La part des sources d'énergie renouvelables dans l'approvisionnement en énergie primaire de l'Algérie est relativement faible par rapport aux pays européens, bien que les tendances de développement soient positives. L'une des principales priorités stratégiques de New Energy Algeria (NEAL) qui est l'Algérie l'agence de l'énergie (gouvernement, Sonelgaz et Sonatrach), s'efforce d'atteindre une part des sources d'énergie renouvelables dans l'approvisionnement en énergie primaire de 10–12 % d'ici 2010. L'IEA prévoit que les sources d'énergie à la croissance la plus rapide seront fournies par les énergies renouvelables. Une grande partie de cette capacité sera installée dans pays en développement où l'énergie électrique solaire et éolienne est déjà compétitive. De toute évidence, la nation qui peut s'emparer d'une position de leader a potentiel de rendements économiques substantiels. L'article présente une revue de la situation actuelle de l'énergie éolienne et évalue le potentiel de l'énergie éolienne sources en Algérie en particulier la région sud-ouest de l'Algérie (Adrar, Timimoun et Tindouf)[13].

L'Algérie présente un potentiel éolien considérable qui peut être exploité pour la production d'énergie électrique, surtout dans le sud où les vitesses de vents sont élevées et peuvent dépasser 4m/s (6m/s dans la région de Tindouf), et jusqu'à 7m /s dans la région d'Adrar. Les ressources énergétiques de l'Algérie ont déjà été estimées par le CDER depuis les années 90 à travers la production des atlas de la vitesse du vent et du potentiel énergétique éolien disponible en Algérie[14].

La ressource éolienne en Algérie varie beaucoup d'un endroit à un autre. Ceci est principalement dû à une topographie et un climat très diversifiés. En effet, notre vaste pays, se subdivise en deux grandes zones géographiques distinctes : Le Nord méditerranéen est caractérisé par un littoral de 1200 Km et un relief montagneux, représenté par les deux chaînes de l'Atlas tellien et l'Atlas saharien. Entre elles, s'intercalent des plaines et les hauts plateaux de climat continental. Le Sud, quant à lui, se caractérise par un climat saharien[15].

Les cartes de vents établis par plusieurs chercheurs montrent que le Sud est caractérisé par des vitesses plus élevées que le Nord, plus particulièrement dans le Sud-Est.

Concernant le Nord, on remarque globalement que la vitesse moyenne est peu élevée. On note cependant, l'existence de microclimats sur les sites côtiers d'Oran, Bejaïa et Annaba, sur les hauts plateaux de Tebessa, Biskra, M'sila et El-Bayadh (6 à 7 m/s),

Selon le premier atlas vent de l'Algérie établi en 19902, les vitesses les plus élevées sont de l'ordre de 6 m/s et sont localisées dans la région d'Adrar. Ces résultats faits sur 10 ans de mesures, sont la base des cartes éoliennes établies par les chercheurs du CDER[15].

Les travaux effectués récemment, ont mis en évidence l'existence de sites ventés dans d'autres régions du Sud. Les régions de Tamanrasset, Djanet et In Salah disposeraient d'un potentiel éolien exploitable. Le gisement éolien en Algérie est donc toujours en cours d'évaluation.

Après avoir fait des tests sur 63 sites étudiés à l'intérieur du pays et 24 dans les pays voisins, les résultats des chercheurs du centre du Développement sont comme suit[15]:

- On constate que le printemps est la saison la plus active suivie par l'été au sud et l'hiver au nord, avec un vent stable 3.

La vitesse annuelle des vents varie du 1.2 à 6.3 m/s à 10 m de hauteur. Les sites situés au sud de l'Algérie sont plus ventés, avec un maximum enregistré à Adrar à 6.3 m/s, suivi par Hassi R'mel avec 6.1 m/s 1,

- La densité annuelle (mean power density) varie selon la région, la valeur maximale est enregistrée à Hassi R'mel avec 295 w/m².

La production annuelle de l'énergie varie entre 273.59 MWh à Adrar jusqu'à 5467.07 MWh à Hassi R'mel utilisant divers modèles de turbines éoliennes.

Parlant toujours du potentiel éolien, il faut savoir que le rendement électrique des éoliennes varie en fonction de la vitesse du vent, par exemple en passant d'une vitesse de 5m/s à 10 m/s, la quantité d'électricité produite se multiplie par 8 en non pas par deux, et pour les installations de grandes puissances, les vitesses du vent doivent être supérieures à 6 m/s, la hauteur de référence état 10 mètres. Aussi, la disponibilité (heures/an) joue un rôle important dans l'importance du gisement éolien.

En conclusion, on peut classer la carte des vents en Algérie selon les zones suivantes (Classement « Pacific Northwest Laboratory » PNL)[15]:

Adrar et Hassi-R'Mel avec respectivement des vitesses moyennes annuelles égales à 6.37 et 6.11m/s sont comprises dans la classe 5 considérée avec un bon potentiel éolien.

Tindouf avec une vitesse moyenne annuelle égale à 5.67m/s est répertoriée dans la classe 4, appropriée à des applications éoliennes.

In-Salah avec une vitesse moyenne annuelle égale à 5.13m/s est comprise dans la classe 3, qui peut être utilisée pour des utilisations éoliennes mais avec des mâts très hauts.

Mechria, Bordj-Badji-Mokhtar, Timimoun, Djelfa, In-Amenas, Biskra, le Port d'Oran et Arzew quant à eux, sont compris dans la classe 2, considérée comme étant marginalisée pour une utilisation éolienne.

Le reste des sites est compris dans la classe 1

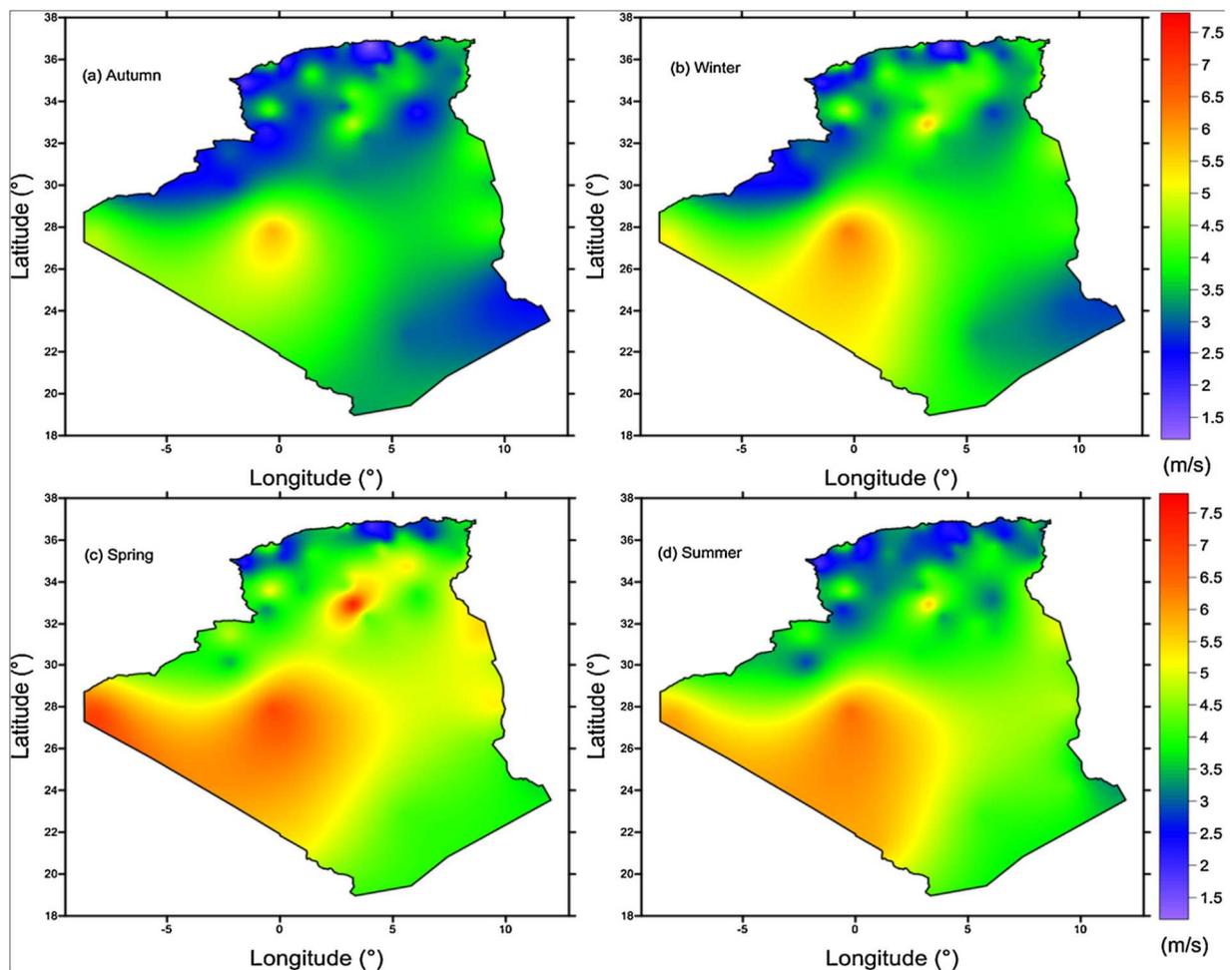


Figure 1.5 : La distribution de la vitesse moyenne saisonnière du vent en Algérie à 10 m de hauteur (m/s).[16]

1.5. Les avantages et les inconvénients d'énergie éolienne

1.5.1. Avantages de l'éolien

Les avantages de l'énergie éolienne sont plus évidents que les inconvénients. Les principaux avantages comprennent une ressource renouvelable illimitée, gratuite (le vent lui-même), une valeur économique, des coûts de maintenance et l'installation d'installations de récolte de vent. Le vent est avant tout une ressource illimitée, gratuite et renouvelable. Le vent est un phénomène naturel et la récolte de l'énergie cinétique du vent n'affecte en aucune façon les courants ou les cycles du vent. Ensuite, la récolte d'énergie éolienne est un moyen propre et non polluant de produire de l'électricité. Contrairement à d'autres types de centrales électriques, elle n'émet aucun polluant atmosphérique ni gaz à effet de serre. Les éoliennes produisent de l'électricité sans danger à partir du vent qui passe. L'énergie éolienne est beaucoup plus écologique que la combustion de combustibles fossiles pour l'électricité. Actuellement, les États-Unis, ainsi que d'autres pays, restent dépendants des combustibles fossiles importés de pays instables et peu fiables[14]. Les tensions sur l'approvisionnement (en combustibles fossiles) sont susceptibles d'augmenter les prix des ressources en combustibles fossiles et de laisser l'économie américaine exposée à la volatilité des marchés internationaux. L'énergie éolienne a la capacité de libérer les États-Unis de l'esclavage économique figuratif des combustibles fossiles. Une fois les turbines et les centres énergétiques installés, le coût d'entretien des turbines et de production d'énergie éolienne est presque nul. Un autre avantage de l'énergie éolienne est la possibilité de placer des turbines là où cela est nécessaire. Après avoir effectué des recherches et trouvé des zones qui ont suffisamment de vent, les experts peuvent placer les éoliennes dans les zones souhaitées. Ces zones sont généralement inhabitées (éoliennes offshore par exemple). [14] En fait, les vents offshore ont tendance à souffler plus fort et plus uniformément que sur terre, offrant un potentiel de production d'électricité accrue et un fonctionnement plus fluide et plus stable que les systèmes éoliens terrestres.

1.5.2. Inconvénients de l'éolien

- L'impact visuel: les éoliennes installées sur terre ont tendance à défigurer le paysage, mais après l'apparition des fermes offshore on commence à oublier cette idée reçue[17].

- Le bruit : il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor. Celle-ci doit donc être limitée[17].
- Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classiques : bien qu'en terme de coût, l'éolien puissant implanté sur des sites très favorables (c'est à dire là où il y a le plus de vent) est entrain de concurrencer la plupart des sources d'énergie classiques. Son coût reste encore néanmoins plus élevé que celui des autres sources classiques sur les sites moins ventés[17].

1.6 CONCLUSION

L'énergie éolienne se présente comme une énergie renouvelable, moyennement rentable et pas électivement coûteuse. C'est pourquoi les éoliennes sont encore en grande évolution de nos jours. En effet, les éoliennes à faible rendement on peu à peu été améliorées et s'améliorent encore.

De plus, les éoliennes qui se cantonnaient autrefois aux continents à des zones restreintes par de nombreuses contraintes, ont pu s'étendre à la mer, bien que plus coûteuses elles permettent une production plus forte et plus régulière d'électricité, et de nos jours, les chercheurs travaillent sur de nouveaux modèles qui s'étendraient au ciel jusqu'à 500 mètres du sol pour récupérer la puissance des jets Stream.

L'énergie éolienne semble avoir un avenir très prometteur, permettant d'éviter toute production d'énergie « sale » qui posera de nouveaux problèmes dans quelques années.

**CHAPITRE 2: ETAT DE
L'ART DES SYSTEMES
DE CONVERSION DE
L'ENERGIE EOLIENNE**

2.1. Introduction

Le combustible fossile est la principale ressource énergétique de l'économie mondiale, mais sa reconnaissance comme cause majeure de problèmes environnementaux pousse l'humanité à rechercher une énergie alternative.

La puissance du vent est utilisée depuis 3000 ans. En effet, l'Homme l'a d'abord utilisée comme un moyen mécanique afin d'accomplir des tâches simples, comme le broyage des grains, le pompage de l'eau et la coupe du bois. Beaucoup plus tard, la nécessité de faire correspondre la puissance de l'éolienne avec la capacité de stockage du réservoir d'eau et les statistiques du vent disponibles ont entraîné le pompage mécanique à vitesse variable au début du XIXe siècle. Par ailleurs, la technologie industrielle naissante a utilisé des plaques plates ou des lamelles en bois pour un contrôle aérodynamique. À l'ère électrique du début du XXe siècle, une turbine à grande vitesse a été développée pour répondre aux besoins électriques des zones éloignées qui ne peuvent pas être connectées à la source d'alimentation. En effet, en 1937, l'association américaine en charge de l'électrification des zones rurales ou éloignées (la *Rural Electrification Association*) a procédé à l'élimination progressive de ces turbines pour laisser place libre à la génération du courant alternatif avec une fréquence constante de 60 Hz [17, 18].

La découverte des combustibles fossiles a entraîné ensuite le développement de la technologie du moteur à combustible au détriment de l'énergie éolienne. En effet, cette nouvelle technologie est plus fiable et fournit une puissance constante. Néanmoins, le choc pétrolier du début des années 1970 a ravivé l'intérêt pour la technologie de l'énergie éolienne. Différentes méthodes ont été alors mises au point afin d'améliorer les caractéristiques de sortie l'éolienne. Ainsi, la tension et la fréquence de sortie de l'éolienne sont devenues constantes. [17, 18]

Ce faisant, le développement de générateurs éoliens autonomes a non seulement permis de produire de l'énergie domestique individuelle mais a permis aussi de faire participer le consommateur dans la production de l'énergie pour la collectivité en injectant l'excès de puissance produite par les générateurs éoliens individuels dans le réseau national. Sur un autre registre, la technologie éolienne s'est considérablement améliorée depuis le début des années 1970. En 1989, une éolienne de 300 kW avec un diamètre de

rotor de 30 m était déjà développée. Après 10 ans, une éolienne de 1500 kW et de diamètre de rotor de 70 m a été développée. À la fin des années 1990, l'énergie éolienne s'est imposée comme l'une des ressources énergétiques durables les plus importantes. Depuis lors, le développement de l'éolienne a augmenté considérablement. Actuellement, les turbines éoliennes dans la gamme de capacité de 4 et 5 MW sont disponibles. Le concept de la technologie des éoliennes est mûri mais le défi est de produire une unité fonctionnant comme une centrale autonome fonctionnant avec des turbines qui répondent à des spécifications telles que la fréquence, les tensions, le contenu harmonique, etc. peuvent être directement injectés dans le réseau d'électricité standard. Un autre aspect des éoliennes a été considérablement amélioré. Il s'agit des problèmes de vibration. En effet, les premières éoliennes étaient à la fois aéro-dynamiquement et mécaniquement bruyantes. Aujourd'hui, le bruit mécanique est pratiquement éliminé et le bruit aérodynamique a été considérablement réduit. L'utilisation d'éoliennes à vitesse variable et l'avancement des progrès apportés par l'électronique de puissance ont atténué bon nombre des défis initiaux.[17].

2.2. Définition de l'énergie éolienne

L'éolienne est un dispositif destiné à convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, elles sont généralement utilisées pour produire de l'électricité et entre dans la catégorie des énergies renouvelables [6, 19].

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

Depuis plusieurs siècles (avant 3000 ans environ) l'énergie du vent, comme étant une source d'énergie inépuisable non polluante, a été exploitée. Avant que les énergies fossiles (le pétrole et le charbon) aient été découvertes, les Egyptiens et les Perses ont commencé à utiliser cette énergie pour le pompage d'eau [14]. Ensuite, des siècles avant les Européens l'homme servait des moulins à vent pour mouliner le blé (environ 200000 moulins à vent en Europe vers le milieu du 19^{ème} siècle). Probablement, la première turbine à vent générant de l'électricité a été construite par le danois Poul La Cour en 1891. Cette technologie n'a cessé d'évoluer, durant la première et la deuxième guerre mondiale elle a été améliorée avec une grande échelle par les ingénieurs danois. L'investissement pour l'amélioration et la modernisation de la technologie des aérogénérateurs a commencé juste après la crise pétrolière de 1974. Parmi

ces investissements, on cite le premier marché de la Californie au cours des années 1980/1986. Au début avec des turbines de moyenne puissance (55 kW), puis 144 machines d'une puissance totale de 7 MW en 1981 et 4687 machines avec un total de 368 MW en 1985. Après ces années, l'industrie de l'éolienne a été développée dans des pays comme l'Allemagne, le Danemark et l'Espagne (Figure 2.1) après le décolllement du marché européen. En 1998, la contribution de ces trois pays au marché mondial atteint 10000 MW et en 2004 environ 47000 MW avec 7500 MW d'une croissance annuelle [14].



Figure 2.1 : Moulins à vent dans la région de La Mancha, Espagne [6].

Actuellement, les progrès technologiques, tant dans les domaines de l'électrotechnique, de l'électronique que dans celui des matériaux, font que l'on peut désormais disposer de machines aux performances étonnantes en terme de puissance produite, tout en limitant les impacts sur l'environnement [18].

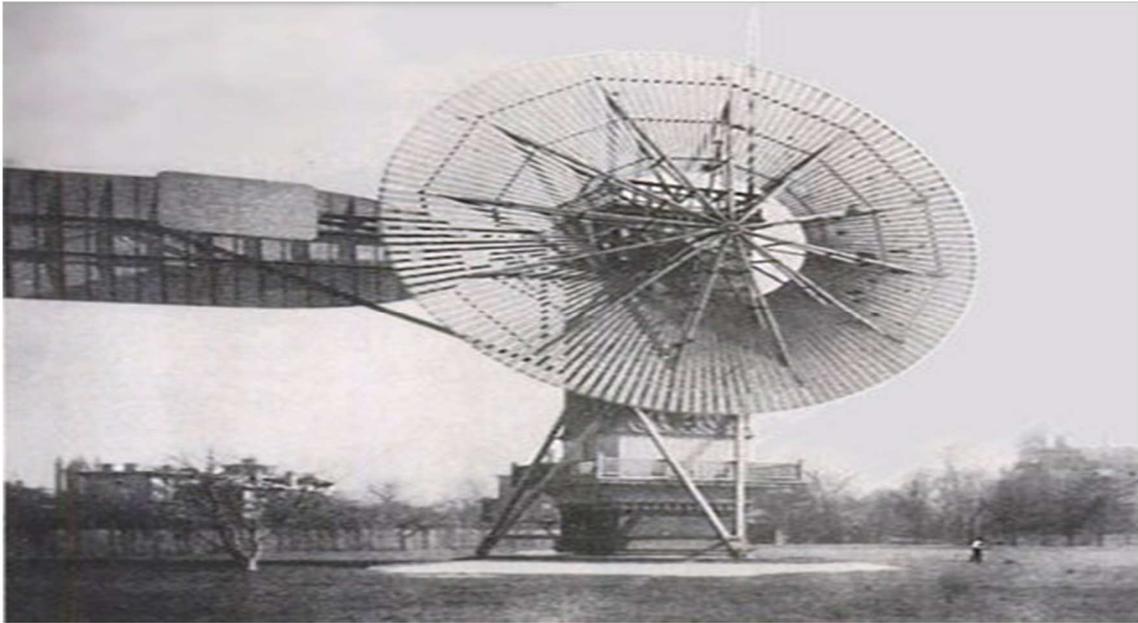


Figure 2.2 : La première éolienne automatique, fabriquée à Cleveland [1].

2.4. L'énergie éolienne en quelques chiffres :

L'énergie éolienne est l'une des technologies d'énergie renouvelable qui connaît la croissance la plus rapide. L'utilisation est en augmentation dans le monde entier, en partie parce que les coûts diminuent. La capacité mondiale de production éolienne installée à terre et en mer a été multipliée par près de 75 au cours des deux dernières décennies, passant de 7,5 gigawatts (GW) en 1997 à quelque 564 GW en 2018, selon les dernières données de l'IRENA. La production d'électricité éolienne a doublé entre 2009 et 2013, et en 2016, l'énergie éolienne représentait 16 % de l'électricité produite par les énergies renouvelables. De nombreuses régions du monde ont des vents forts, mais les meilleurs emplacements pour produire de l'énergie éolienne sont parfois éloignés. L'éolien offshore offre un potentiel énorme. [14]

La capacité des éoliennes a augmenté au fil du temps. En 1985, les turbines typiques avaient une capacité nominale de 0,05 mégawatt (MW) et un diamètre de rotor de 15 mètres. Les nouveaux projets éoliens d'aujourd'hui ont des capacités de turbine d'environ 2 MW onshore et 3-5 MW offshore.

Les éoliennes disponibles dans le commerce ont atteint une capacité de 8 MW, avec des diamètres de rotor allant jusqu'à 164 mètres. La capacité moyenne des éoliennes est passée de 1,6 MW en 2009 à 2 MW en 2014.

2.5. Les systèmes de conversion d'énergie éolienne : Survol

Aujourd'hui, le domaine énergétique est confronté à un triple défi: Comment atténuer l'impact négatif du profil industriel sur l'environnement?, Comment faire face à la croissance rapide de la demande énergétique (qui devrait doubler jusqu'en 2030) ? et finalement Comment fournir l'énergie électrique en toute sécurité et de manière optimale ?. L'énergie du vent se trouve être parmi les énergies renouvelables qui a été exploitée en premier par l'homme[17]. Depuis l'antiquité, elle fut utilisée pour la propulsion des navires, dans les moulins à blé et pour le pompage de l'eau. Les premières utilisations connues de l'énergie éolienne remontent à 2 000 ans environ avant Jésus-Christ (J-C). A l'époque de Hammourabi, fondateur de la puissance de Babylone, tout un projet d'irrigation de la Mésopotamie utilisant la puissance du vent avait été conçu. Au neuvième siècle avant J-C, l'énergie du vent a été utilisée par les perses dans le but de moulin le grain et de pomper l'eau . En Egypte des Pharaons, l'exploitation de cette énergie propre était déjà d'actualité au troisième siècle avant Jésus-Christ. L'inventeur égyptien Héron d'Alexandrie utilisa l'énergie éolienne grâce à un moulin à vent à axe horizontal. Au Moyen-âge, le premier moulin à axe horizontal est apparu en Angleterre vers 1150, en 1180 en France, en Allemagne en 1222 et au Danemark en 1259. Ce développement rapide a été probablement influencé par les Croisés, qui avaient pris connaissance des moulins à vent de la Perse. En Europe, les performances du moulin à vent ont été constamment améliorées entre le douzième et dix-neuvième siècle. À la fin du XIXe siècle, le moulin à moteur européen typique utilisait un rotor avec un diamètre de 25 m[17]. L'industrialisation a ensuite entraîné une baisse progressive des éoliennes. Cependant en 1904, l'énergie éolienne fournissait encore 11% de l'énergie industrielle néerlandaise et l'Allemagne disposait de plus de 18000 unités installées . Lorsque les moulins à vent ont commencé à disparaître lentement de l'Europe, les colons nouveaux européens ont commencé à les introduire en Amérique du Nord. Ces moulins à vent, également connus sous le nom de moulins à vent américains fonctionnaient entièrement en autonomie, ce qui signifiait qu'ils pouvaient être laissés sans surveillance. Cependant dans les années 1970 et après la crise du pétrole, les occidentaux gros consommateurs du pétrole ont pris la décision de développer la recherche dans le domaine de

l'énergie renouvelable. Les éoliennes ont ainsi continué à évoluer au cours des 20 dernières années et le coût global de l'énergie nécessaire à la production d'électricité à partir du vent est maintenant concurrentiel comparativement aux autres sources d'énergies renouvelables . Cette réduction du coût de l'électricité est le résultat de progrès importants de la technologie utilisée par cette industrie. Actuellement, l'énergie éolienne est bien implantée parmi les autres sources d'énergie avec une croissance très forte [17].

2.6 Système de conversion d'énergie éolienne :

Pour convertir l'énergie éolienne en énergie électrique le générateur va utiliser le Phénomène d'induction. En effet ce dernier est composé de deux parties, une partie mobile le rotor et une partie fixe, le stator, permettant de créer un champ magnétique et de générer un courant électrique. L'éolienne est également équipée d'une girouette permettant l'orientation des pales en fonction de la direction du vent. Elle doit être également fixée solidement au sol[19].

S'agissant du mât, il doit être dimensionné précisément en fonction de la machine, des Fondations...Plusieurs systèmes existent : haubané, haubané basculant, treillis, autoporteur... Pour qu'une éolienne produise...Quelques notions importantes Diapositives Plusieurs éléments doivent être pris avant installation. L'éolienne doit être adaptée au site et à ses besoins, Il faut vérifier le vent, on considère qu'un site est exploitable lorsque l'on dispose d'une vitesse minimale de vent de 4m/s, à une hauteur du sol de 10m.La donnée 'vent' est essentielle à l'installation d'une éolienne, cependant le coût d'une étude précise, à l'aide d'un anémomètre peut se révéler élevé. Il faut que cela reste cohérent avec le prix global de votre projet. L'observation du site (la présence de moulins, d'éoliennes altitude, vents dominants, végétation...) et l'intuition peuvent se révéler de bons indicateurs du potentiel éolien dans un premier temps[19].

2.7 Système de stockage d'énergie

Pour permettre aux unités de production basées sur des sources aléatoires (éolien, photovoltaïque) de participer pleinement aux services système, il faudra leur associer des systèmes de stockage de l'énergie électrique. L'électricité ne être, cependant, pas facilement stockée. Elle nécessiterait sa transformation sous une autre forme énergétique (chimique, mécanique, thermique, magnétique,...etc.). Le stockage de l'énergie électrique constitue une

des composantes d'un futur développement durable [17]. Il existe à l'heure actuelle plusieurs méthodes de stockage d'énergie qui peuvent être classées en deux catégories [17] :

Le stockage à court terme : Pour cette catégorie, le temps de stockage est inférieur à 10 minutes. Ce type est utilisé pour lisser les fluctuations de puissance produite par la ferme éolienne et pour régler la tension et la fréquence du réseau (réglage primaire)[17].

Le stockage à long terme : Le temps de stockage est supérieur à 10 minutes. Ce type est utilisé pour répondre aux pics d'appels de puissance aux heures de pointe du réseau électrique et en cas d'absence du vent[17].

Tableau 1.1 : Rang des Puissances éoliennes Installées dans l'Afrique (fin 2015)[17].

Pays	Capacités (MW)
Afrique du Sud	1694.44
Maroc	884.95
Egypte	744.82
Kenya	342.55
Ethiopie	324.18
Tunisie	242.36
Tanzanie	50.00
Mauritanie	34.40
Cap Vert	30.40
Libye	20.00
Maurice	10.45
Algérie	10.20
Nigeria	10.18
Seychelles	6.00
Namibie	0.22
Gambie	0.15
Erythrée	0.83
Mozambique	0.30

2.8.Énergie éolienne en Algérie

L'Algérie présente un potentiel éolien considérable qui peut être exploité pour la production d'énergie électrique, surtout dans le sud où les vitesses de vents sont élevées et peuvent dépasser 4m /s (6m/s dans la région de Tindouf), et jusqu'à 7m /s dans la région d'Adrar. Les ressources énergétiques de l'Algérie ont déjà été estimées par le CDER depuis les années 90 à travers la production des atlas de la vitesse du vent et du potentiel énergétique éolien disponible en Algérie [17].

2.9. Carte des vents en Algérie

L'étape la plus importante avant de mettre en place un parc éolien potentiel est d'estimer l'énergie éolienne disponible dans une zone particulière. Pour ce faire, il faut d'abord mesurer le stock d'énergie disponible en créant un atlas éolien de la région. Le travail le plus récent de création de cartes des vents (Atlas des vents) en Algérie est celui de Boudia [18] où il a présenté la vitesse moyenne annuelle donnée à partir de 24 stations météorologiques situées près de la frontière algérienne. La figure 2.3 montre la carte annuelle mise à jour des vents algériens à une hauteur de 10 mètres. La carte des vents montre que la vitesse annuelle moyenne du vent varie de 1,2 à 6,3 m/s. La région d'Adrar conserve sa suprématie en termes de vitesse maximale du vent à 6,3 m/s. Il est suivi par Hassi R'Mel avec 6,1 m/s. Le site de Tindouf à l'extrême ouest du pays occupe la troisième place avec une vitesse moyenne annuelle de ≈ 6 m/s.

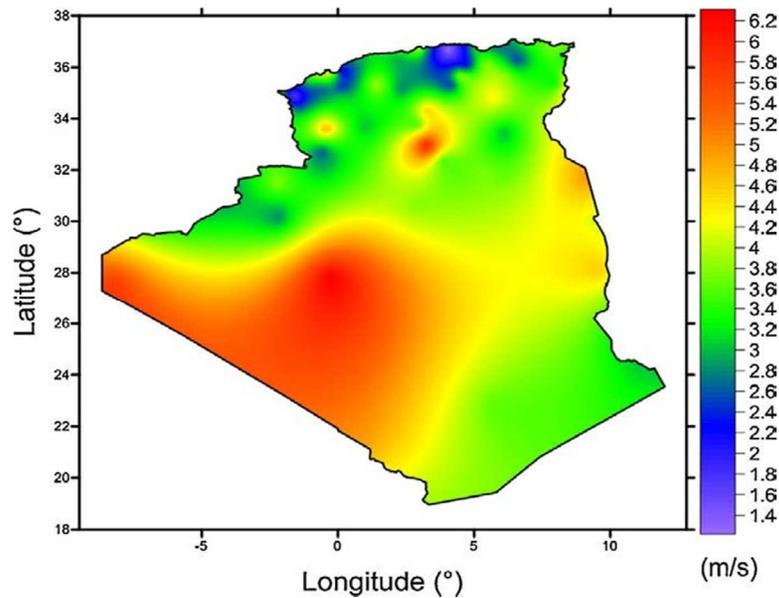


Figure 2.3 : Distribution de la vitesse moyenne annuelle du vent en Algérie à 10 m de hauteur (m/s) [20].

En incorporant de nouvelles stations météorologiques dans la carte établie par Boudia [20], la carte actuelle présente la mise à jour des études précédentes (voir la figure 2.4) où le potentiel du vent dans différentes régions a été révisé vers le haut, tels que :

- Mechria, dans les hautes terres occidentales, où la vitesse moyenne annuelle du vent est de ≈ 5 m/s.
- Bordj Badji Mokhtar, dans l'extrême Sud du Sahara, avec une vitesse annuelle moyenne du vent ≈ 5 m/s.
- La limite Est du pays avec la Tunisie, où la vitesse moyenne annuelle du vent ≈ 5 m/s.
- Les régions côtières s'ouvrant sur la mer Méditerranée, où :
 - La vitesse moyenne annuelle du vent dépasse 4 m/s dans les ports d'Oran et d'Alger.
 - Site d'El-Kala dans la côte orientale où la vitesse moyenne annuelle du vent est de 4m/s
 - Côte extrême occidentale, avec des frontières marocaines où la vitesse moyenne annuelle du vent ≈ 4 m/s.

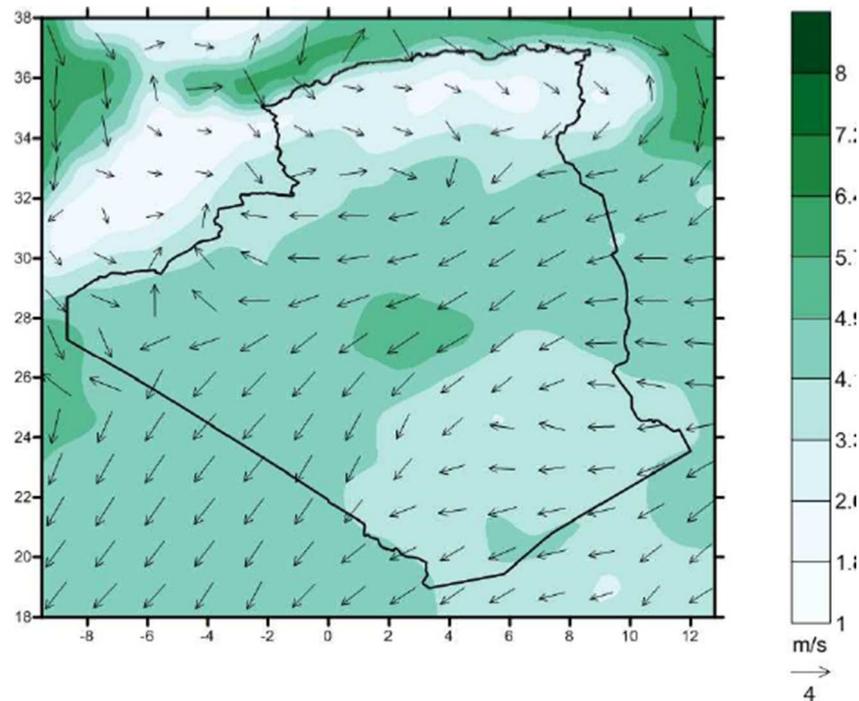


Figure 2.4 : Cartes annuelles de la vitesse du vent en Algérie à 10 m de hauteur [21-20].

Le potentiel éolien des autres régions a été revu à la baisse, comme suit :

- Tizi Ouzou et Maghnia au nord où la vitesse moyenne annuelle du vent est respectivement de 1,2 et 1,4 m/s[17].

En 2017, le CDER a publié un nouvel atlas éolien pour l'Algérie réalisé sur la base de données horaire et tri-horaire de la vitesse du vent enregistré sur 10 années consécutives de 2004 à 2014 dans 74 stations. Services météorologiques de l'Office national de la météorologie (ONM) et 21 stations supplémentaires des pays voisins (Figure 2.4) [22].

Sur la base de la répartition géographique uniforme entre le sud et le nord, les vents du nouvel atlas à 10 m au-dessus du sol reflètent les changements dans l'estimation des ressources éoliennes par rapport aux atlas précédents, en particulier dans le désert. De là, la vitesse moyenne du site d'Ain Saleh est de 6,4 m/s. Et aussi Adrar, qui enregistre 6,3 m/s. L'état de l'Elysée, avec une dizaine de stations, dépasse les 5 m/s. Sables de Hassi avec des vitesses moyennes assez élevées allant jusqu'à 6,5 m/s. Récemment, de nombreux climats locaux ont été découverts d'ouest en est dans les régions du nord. Et la

vitesse moyenne du vent dans les hauteurs à l'extrême ouest jusqu'à Mecheria a atteint 5,6 m/s. Légèrement à l'est, Tiaret et Djelfa ont respectivement des vitesses de 5,6 m/s et 5,1 m/s. M'sila est une zone importante avec une vitesse annuelle moyenne de 5,3 m/s. Il est à noter que certains sites comme Kasr El Chalala, Bou Saadeh et Tebessa affichent un pourcentage important de valeurs nulles (>50%) ce qui peut fortement réduire leur potentiel. En revanche, si cet atlas préliminaire fournit des informations utiles pour estimer le potentiel actuel, la sélection de sites éligibles pour la construction de parcs éoliens est encore insuffisante. L'exploration d'emplacements optimaux pour les parcs éoliens qui peuvent garantir un retour sur investissement et fournir une énergie éolienne compétitive s'accompagne de limites de faisabilité spécifiquement liées à la topographie du site et à la disponibilité du réseau électrique. La méthode d'optimisation (méthode SIG) [23] qui superpose les couches à l'aide du SIG a facilité le processus de ciblage des emplacements optimaux en Algérie et a suggéré une stratégie de synthèse. Parcs éoliens liés au programme national d'énergie renouvelable [22].

2.10 Programme des énergies renouvelables en Algérie :

En Algérie, avec l'absence d'énergie nucléaire et de grandes sources hydroélectriques, la majeure partie de la production d'électricité (99,2% en 2009) tirent parti des combustibles fossiles [17]. La majorité des centrales électriques installées en Algérie sont de type 'centrales à gaz', à l'exception de la région de l'extrême Sud où ce sont des centrales électriques alimentées en diesel pour la simple raison que le Sud de l'Algérie ne soit pas approvisionné en gaz naturel. D'un autre côté, 97% des agglomérations sont aujourd'hui couverts par le réseau électrique. Ceci est le résultat de l'évolution de la demande en énergie électrique de près de 7% par an de 1963 à 2007 [17]. En conséquence, la construction de nouvelles capacités de production, de transmission et de distribution de l'électricité est l'un des plus grands défis du secteur.

Depuis 2010, l'Algérie a mis en place une stratégie ambitieuse pour promouvoir et développer les énergies renouvelables sur son territoire (plan de promotion des énergies renouvelables, approuvé par le gouvernement le 3 février 2010 pour produire 40% de la consommation totale d'énergie à partir de sources renouvelables d'ici 2030 [17].

La Figure 2.5 représente le programme d'énergie renouvelable et d'énergie fossile en Algérie, défini en 2010. Ce programme des énergies renouvelables consiste à installer une puissance d'origine renouvelable de l'ordre de 22 000 MW à l'horizon 2030 pour le marché national, avec le maintien de

l'option de l'exportation comme objectif stratégique, si les conditions du marché le permettent. Le programme d'efficacité énergétique actualisé vise à réaliser des économies d'énergies à l'horizon 2030 de l'ordre de 63 millions de TEP, pour l'ensemble des secteurs (bâtiment et éclairage public, transport, industrie) et ce, en introduisant l'éclairage performant, l'isolation thermique et les chauffe-eau solaires, les carburants propres (GPLc et GNc), et les équipements industriels performants. Le programme de l'efficacité énergétique permettra de réduire les émissions de CO₂ de 193 millions de tonnes [23].

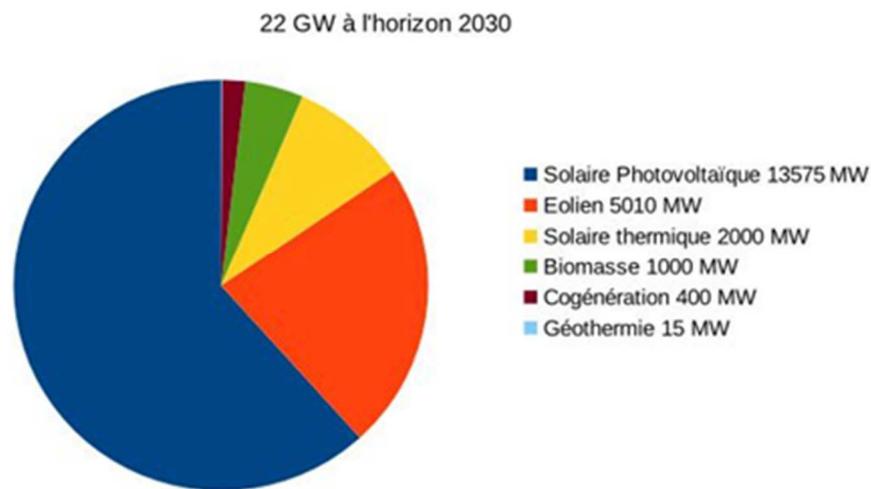


Figure 2.5 : Programme algérien des énergies renouvelables [sources : portail.cder.dz].

2.11 Turbines éoliennes à axe horizontal et vertical :

Les éoliennes sont un élément important des systèmes de conversion de l'énergie éolienne. Différents types d'éoliennes ont été développés au fil du temps [24]. Cette section donne un aperçu des technologies d'éoliennes, y compris les turbines à vitesse horizontale/verticale et fixe/variable.

Les turbines éoliennes sont classées en fonction de l'orientation de leur axe de rotation en deux catégories "éoliennes à axe horizontal" et "éoliennes à axe vertical" [24] (Figure 2.6). Dans les éoliennes à axe horizontal, l'orientation de l'axe de rotation est parallèle au sol.



Figure 2.6 : Éoliennes à axe horizontal et vertical [25].

Comme la montre la Figure 2.6. Le mât élève la nacelle d'une hauteur raisonnable afin d'assurer un espace suffisamment grand pour permettre la rotation des pales et pour bénéficier des meilleures conditions de vent. La nacelle prend en charge le moyeu du rotor qui maintient les pales du rotor et abrite également la boîte de vitesses, le générateur et, dans certains modèles, les convertisseurs de puissance. L'éolienne à axe horizontal industriel, connue sous le nom de 'configuration en amont', utilise un rotor à trois pales placées devant la nacelle. Dans les éoliennes à axe vertical, l'orientation de l'axe de rotation est perpendiculaire au sol. Le rotor de la turbine utilise des profilés incurvés verticalement montés. Le générateur et la boîte de vitesses sont normalement placés à la base de la turbine au sol. Les pales du rotor de l'éolienne à axe vertical possèdent une variété de modèles avec différentes formes et nombre de pales. La conception donnée dans la figure est l'une des plus populaires. Ce type d'éolienne a normalement besoin de fils de guidage pour maintenir l'arbre du rotor dans une position fixe et minimiser ainsi les vibrations mécaniques éventuelles[17].

Au contraire, les éoliennes à axe horizontal se caractérisent par de faibles coûts de maintenance et d'installation dus à l'installation du générateur et de la boîte de vitesses situés au niveau du sol. Ceci est compensé par la faible capacité de conversion de l'énergie éolienne en raison des performances aérodynamiques limitées des pales. Et la faible force du vent exercée sur le fond des chiffres. De plus, l'arbre est long, ce qui le rend propice aux vibrations

mécaniques. Ces lacunes entravent l'utilisation pratique généralisée des turbines à axe vertical pour la conversion de l'énergie éolienne. En conséquence, les turbines à axe horizontal dominant aujourd'hui le marché de l'énergie éolienne, en particulier sur les grands parcs éoliens commerciaux[17].

2.12. Type de turbine :

- **Eoliennes à axe horizontal :**

- a) **Avantages :**

- ✓ Ont un rendement plus élevé.
 - ✓ Sont équipées d'un système qui permet de les orienter en fonction du vent.
 - ✓ Les frais de leur fonctionnement sont faibles.
 - ✓ Ont un coût moins important [17].

- b) **Inconvénients :**

- ✓ Les pales du rotor doivent être non flexibles.
 - ✓ Sont moins sécuritaires pour les oiseaux car elles tournent à haute vitesse.
 - ✓ Font beaucoup de bruit[17].

- **Eoliennes à axe vertical :**

- a) **Avantages :**

- ✓ Leur conception est plus simple que pour les éoliennes à axe horizontal.
 - ✓ Sont plus facile d'accès
 - ✓ Plus facile à installer par rapport aux autres types d'éoliennes.
 - ✓ Transportable d'un endroit à un autre[17].

- b) **Inconvénients :**

- ✓ Les éoliennes ne démarrent pas automatiquement. Il faut donc utiliser une génératrice comme moteur pour leur démarrage.
 - ✓ Un démontage complet des éoliennes est obligatoire pour procéder au remplacement du palier principal du rotor.
 - ✓ Il n'y a pas de système d'orientation au vent.

- ✓ Offrent un rendement médiocre, c'est pour cela qu'elles n'ont pas connu un grand développement[17].

2.13 Turbines éoliennes à vitesse fixe /variable

Les éoliennes sont classées en turbines à vitesse fixe et à vitesse variable [26]. Comme son nom l'indique, une éolienne à vitesse constante tourne approximativement à une vitesse constante, déterminée par le rapport de démultiplication, la fréquence de la grille et le nombre d'arbres du générateur. Ainsi, l'efficacité de conversion maximale ne peut être obtenue qu'à une certaine vitesse du vent. Pour les autres vitesses de vent, l'efficacité du système se détériore. Le contrôle aérodynamique des pales protège la turbine contre d'éventuels dommages causés par de fortes rafales de vent. Les éoliennes à vitesse constante génèrent une puissance de sortie très fluctuante sur le réseau, ce qui provoque des perturbations dans le système électrique. Ce type de turbine nécessite également une conception mécanique robuste pour absorber des contraintes mécaniques élevées [27].

De plus, les éoliennes à vitesse variable peuvent atteindre une efficacité de conversion d'énergie maximale sur une large gamme de vitesses de vent [26]. L'éolienne ajuste en permanence sa vitesse de rotation en fonction de la vitesse du vent. ce qui aide à maintenir la vitesse définie, qui est le rapport de la vitesse transversale de la pointe de la pale à la vitesse du vent, à la valeur optimale pour obtenir une efficacité de conversion de puissance maximale à différentes vitesses de vent. Pour rendre la vitesse de la turbine réglable, le générateur est connecté au réseau via un système de transducteur [26]. Le convertisseur contrôle la vitesse du générateur, qui est couplé mécaniquement au rotor (pales) de l'éolienne. Comme le montre le tableau 2, les principaux avantages des turbines à vitesse variable comprennent une production accrue d'énergie éolienne, une meilleure qualité de l'énergie et une réduction des contraintes mécaniques [27]. L'augmentation des coûts de fabrication et les pertes d'énergie dues à l'utilisation de transducteurs sont les principaux obstacles. Mais les coûts supplémentaires et les pertes d'énergie sont compensés par une production d'énergie plus élevée. De plus, le fonctionnement plus doux fourni par l'alternateur réduit les contraintes mécaniques sur la turbine, la transmission et la structure de support. Cela a permis aux fabricants de développer des éoliennes plus grandes et plus rentables. Pour les raisons évoquées ci-dessus, les turbines à vitesse variable dominant le marché actuel.

Tableau 1.2 : Avantages et inconvénients des éoliennes à vitesse fixe et variable[17].

Mode vitesse	Avantages	Inconvénients
Vitesse fixe	<ul style="list-style-type: none"> • Simple, robuste, fiable. • Coût et maintenance faible. 	<ul style="list-style-type: none"> • Conversion énergétique relativement faible. • Haute contrainte mécanique. • Des fluctuations de puissance élevées sur le réseau.
Vitesse variable	<ul style="list-style-type: none"> • Efficacité de conversion à haute énergie. • Amélioration de la qualité d'énergie des convertisseurs. • Réduction du stress mécanique. 	<ul style="list-style-type: none"> • Coûts et pertes supplémentaires liés à l'utilisation de convertisseurs. • Système de contrôle plus complexe.

2.14 Conclusion :

Le coût de l'électricité éolienne est en baisse, actuellement des parcs éoliens sont installés à des taux record à travers le monde. Près de 633 projets avancés de stockage d'énergie sont actuellement en cours de développement ou pleinement opérationnels dans le monde. Il s'agit de remédier au problème majeur de l'énergie éolienne conventionnelle, à savoir qu'elle ne peut pas produire d'énergie à la demande. Cependant, le coût sera la principale pierre d'achoppement pour le stockage de l'énergie éolienne ; l'American Wind Energy Association (AWEA) a déclaré que la flexibilité sous la forme de centrales à gaz à croissance rapide et d'hydroélectricité existe déjà sur de nombreux réseaux, et que la construction de nouvelles installations de stockage d'énergie est presque toujours plus chère. Ce ne sera certainement pas toujours le cas ; à mesure que la technologie derrière le stockage d'énergie progresse, les coûts vont probablement baisser et les centrales à combustibles fossiles sont par nature limitées et ne peuvent donc pas compléter indéfiniment l'électricité produite par le vent.

CHAPITRE 3
GENERALITES SUR LE
GENERATRICE
SYNCHRONNE A
AIMENT PERMANENT

3.1 Introduction :

Les générateurs triphasés sont le pilier de la production d'électricité. Ces générateurs, qui sont alimentés par des turbines hydrauliques ou pneumatiques, sont considérés comme l'un des meilleurs transformateurs de puissance dans le domaine de l'électricité. Il convertit l'énergie cinétique en énergie électrique à des taux allant jusqu'à 1500 mégawatts [28].

Dans ce chapitre nous abordons une vision générale sur la génératrice synchrone à aimant permanent (utilisé dans un système éolien).

3.2 Présentation :

Un moteur électrique synchrone (Figure 3.1) est un moteur à courant alternatif dans lequel, en régime établi, la rotation de l'arbre est synchronisée avec la fréquence du courant d'alimentation ; la période de rotation est exactement égale à un nombre entier de cycles AC. Les moteurs synchrones contiennent des électro-aimants à courant alternatif multiphasés sur le stator du moteur qui créent un champ magnétique qui tourne dans le temps avec les oscillations du courant de ligne. Le rotor à aimants permanents ou électro-aimants tourne au même rythme que le champ du stator et, par conséquent, fournit le deuxième champ magnétique tournant synchronisé de tout moteur à courant alternatif. Un moteur synchrone est dit doublement alimenté s'il est alimenté par des électro-aimants alternatifs multiphasés à excitation indépendante à la fois sur le rotor et le stator.

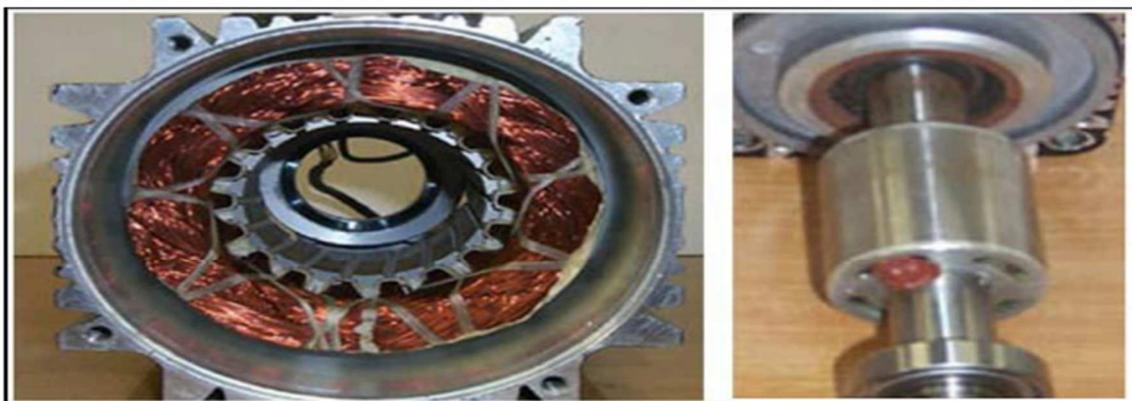
La machine synchrone se compose à la fois de moteurs synchrones et de générateurs synchrones. Un système à courant alternatif présente certains avantages par rapport à un système à courant continu. Par conséquent, le système AC est exclusivement utilisé pour la production, la transmission et la distribution d'énergie électrique. La machine qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique alternative est appelée générateur synchrone ou alternateur. Cependant, si la même machine peut fonctionner comme un moteur, on parle de moteur synchrone.



Figure 3.1 : Photographie d'un moteur à aimants permanent [29].

3.3 Constitution :

La machine synchrone à aimant permanent est un dispositif électromécanique dont l'alternateur synchrone consomme de l'énergie mécanique et fournit de l'énergie électrique. Il est constitué d'une partie fixe, le stator, et d'une partie tournante, le rotor (voir la figure 3.2). Quand on fait tourner le rotor, son champ magnétique (qui tourne avec le rotor) induit des tensions alternatives dans les trois bobines du stator. La vitesse de ce champ tournant produit par le rotor est appelée « vitesse de synchronisme » [30].



Stator

Rotor

Figure 3.2 : Stator et rotor de la machine à aimant permanent [30].

3.3.1 Stator (induit) :

Le stator comporte une carcasse en acier renfermant un empilage de tôles identiques qui constituent un cylindre vide ; ces tôles sont percées de trous à leur périphérie intérieure. L'alignement de ces trous forme des encoches dans lesquelles on loge un bobinage triphasé Figure 3.3.a. [30].

L'enroulement est toujours raccordé en étoile et le neutre est accessible pour permettre sa mise à la terre Figure 3.3.b [30].

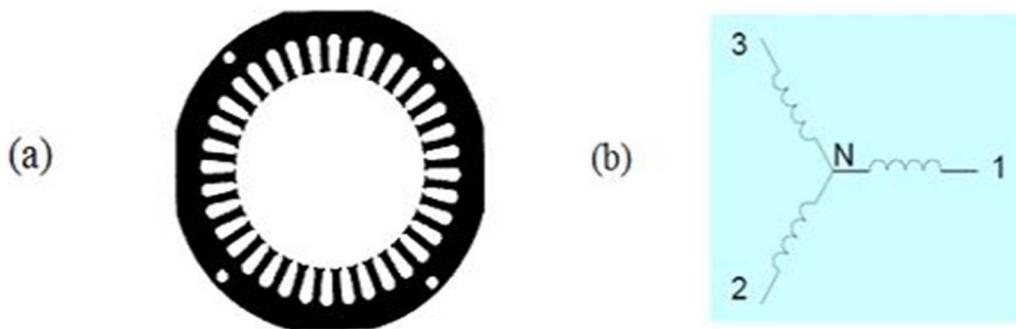


Figure 3.3 : a - Une tôle (feuille) de l'empilage du stator. b -Couplage étoile des enroulements du stator[31].

3.3.2 Rotor (inducteur) :

Le rotor comporte p pôles nord et p pôles sud intercalés. Ces pôles sont créés par des bobines alimentées en courant continu ou par des aimants permanents, le rotor soit à pôles saillants ou pôles lisses [30].

3.4 Classification du rotor de la MSAP :

Le rotor de la MSAP est généralement de deux types :

- Rotor possédant des pièces polaires.
- Rotor sans pièces polaires.

3.4.1. Le rotor avec pièces polaires :

Les machines de ce type comportent un rotor où les aimants sont associés avec des pièces polaires pour élever l'induction dans l'entrefer à une valeur supérieure à l'induction rémanente des aimants par effet de concentration du flux. Les structures les plus typiques sont

présentées sur la. On peut distinguer deux types de machine avec pièces polaires (voir la figure 3.4).

Les rotors dits à "concentration de flux" comportent des aimants à aimantation tangentielle encastrés entre 2 pièces polaires et dont la hauteur est supérieure à la largeur. On dit aussi d'un point de vue magnétique, que les pôles à aimantation permanente sont connectés en parallèle. Ce type de rotor, plus rigide mécaniquement que des structures sans pièce polaire, est capable de générer un flux dans l'entrefer plus élevé par rapport aux autres structures de rotor avec pièces polaires. Les rotors dits à "aimants enterrés" sont surmontés de pièces polaires. Ces aimants peuvent être de forme parallélépipédique à aimantation parallèle ou en forme de tuile à aimantation radiale. On dit aussi d'un point de vue magnétique, que les pôles à aimantation permanente sont connectés en série [43].

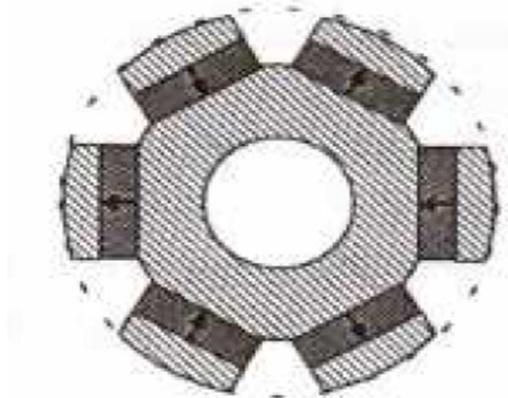


Figure 3.4 : Rotor avec pièces polaires[32].

3.4.2. Le rotor sans pièces polaires :

Les machines sans pôle ont un rotor dont les aimants sont montés en surface, à la périphérie du noyau magnétique du rotor et sont fixés par collage ou contraction. Si l'on veut éviter la circulation des courants provoqués par les harmoniques de l'alimentation, la bande doit être amagnétique et éventuellement non conductrice. Son épaisseur s'ajoute à l'entrefer mécanique pour que l'épaisseur de l'aimant soit suffisante pour assurer le niveau d'induction requis dans l'entrefer.

Ce type de structure se caractérise principalement par une réluctance constante le long de l'entrefer. L'inductance est donc constante et de faible valeur en raison de la perméabilité de l'aimant souvent proche de θ s'ajoutant à un entrefer assez large pour loger la frette sur les rotors intérieurs.

La simplicité de réalisation de ces structures les rend particulièrement avantageuses pour des actionneurs performants à faible coût (voir figure 3.5) [43].

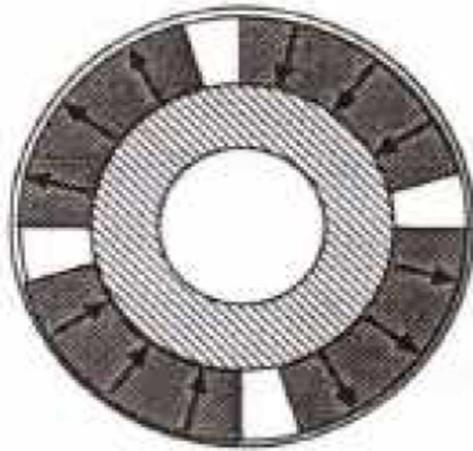


Figure 3.5 : Rotor sans pièces polaires [32].

3.5 Différentes structures de MSAP :

Selon la disposition des aimants sur le rotor, les structures des machines synchrones à aimants permanents sont classées. Les machines à flux radial et à flux axial incluent leurs différentes configurations. Une vue schématique de ces deux types de machines est donnée par la figure suivante :

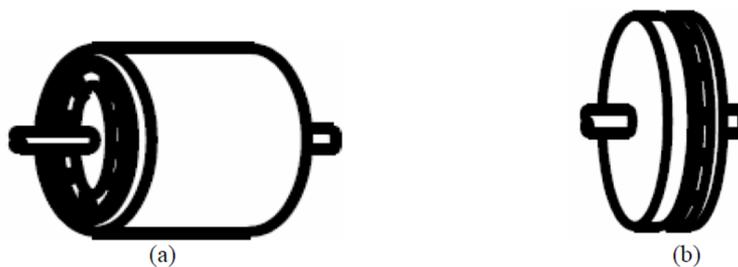
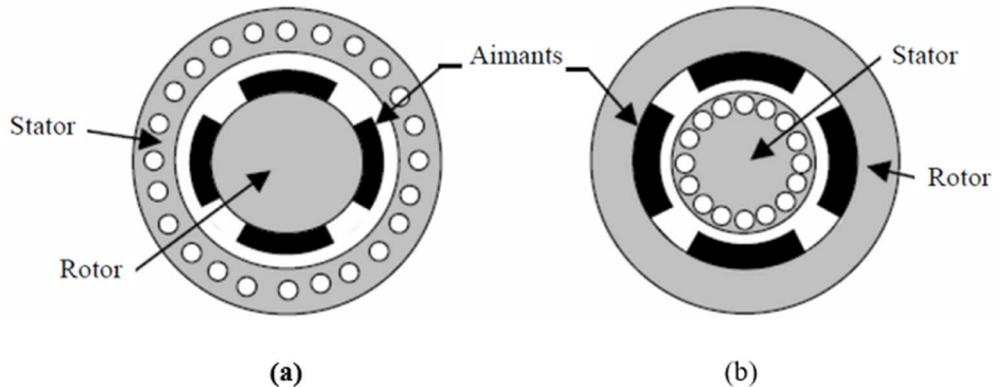


Figure 3.6 : Vue schématique des machines : (a) à flux radial, (b) à flux axial[29].

3.5.1 Structure à flux radial :

La machine à flux radial est la machine à aimants la plus simple et plus largement utilisée. Il est utilisé pour la conduite directe, le stator est associé à la machine à induction traditionnelle.

Ces structures peuvent se présenter, soit avec un rotor placé à l'intérieure ou à l'extérieure [34] comme suivant :



Les différents types de machines à flux radial sont des machines à aimants montés soit en surface, soit enterrés, soit insérés ou chapeautés.

3.5.1.1 Génératrices synchrones à aimants permanents montés en surface :

Cette structure est la plus simple à construire par ce que des aimants permanents à aimantation radiale sont disposés directement sur la périphérie du rotor (Figure 3.8). Les aimants ont généralement une forme de tuile et collés sur une culasse cylindrique. Cette structure de machine rentre dans la catégorie des machines à pôles lisses. La force mécanique de l'aimant est facilitée par la force centrifuge [35].

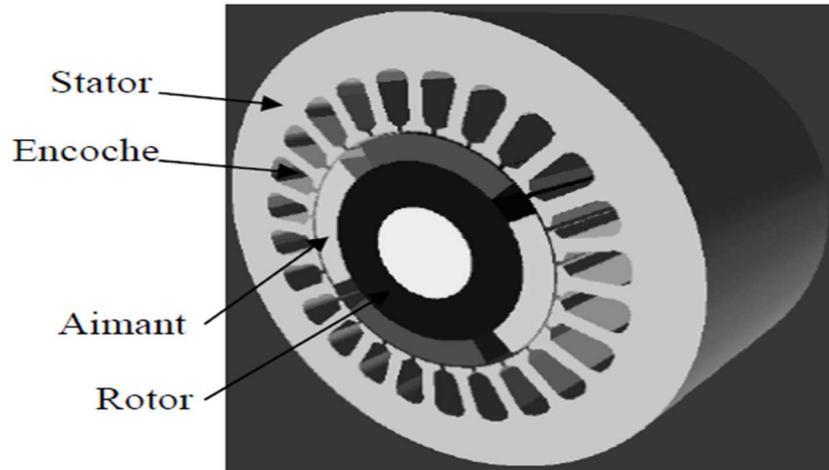


Figure 3.8 : Génératrice synchrone à aimants permanents montés en surface[29].

3.5.1.2 Génératrice synchrone à aimant permanent inséré :

A partir de la structure précédente, on entaille des logements pour insérer les aimants permanents dans le rotor afin de faciliter l'assemblage mécanique (Figure 3.9). Les parties de fer entre les aimants permanents sont des espaces inter polaires qui rajoutent de la saillance. Toutefois, les caractéristiques de cette structure restent fondamentalement proches de la GSAPS [35].

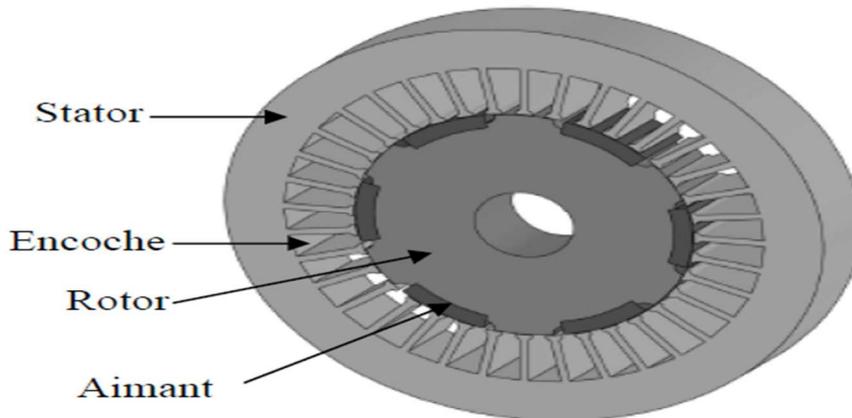


Figure 3.9 : Génératrice synchrone à aimant permanent inséré[29].

3.5.1.3 Génératrice synchrone à aimant permanent chapeauté :

Cette structure est déduite de celles avec des aimants permanents montés en surface. On place sur les aimants des pièces polaires généralement en acier doux. La combinaison des aimants et des pièces polaires crée une anisotropie du rotor et rajoute une saillance.

Les pièces polaires permettant de contrôler la forme de la f.é.m. au stator en agissant sur le profil de la pièce [35].

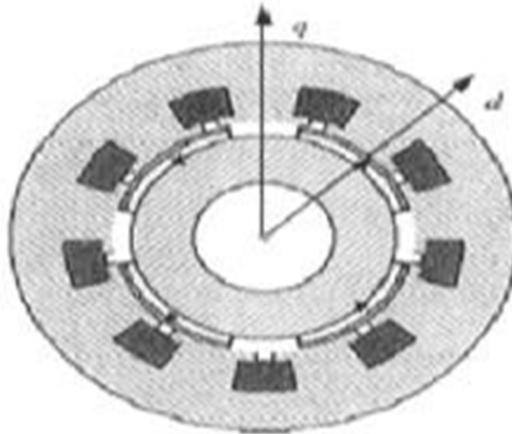


Figure 3.10 : Génératrice synchrone à aimant permanent chapeauté[29].

3.5.1.4 Génératrice synchrone à aimant permanent enterré :

Le principe de cette structure est d'augmenter l'induction magnétique dans l'entrefer par rapport à l'induction rémanente des aimants permanents (Figure 3.11). En fait, les pièces polaires canalisent le flux généré par les aimants permanents à aimantation tangentielle dont la surface latérale est supérieure à la demi-surface de la pièce polaire prise au niveau de l'entrefer [35].

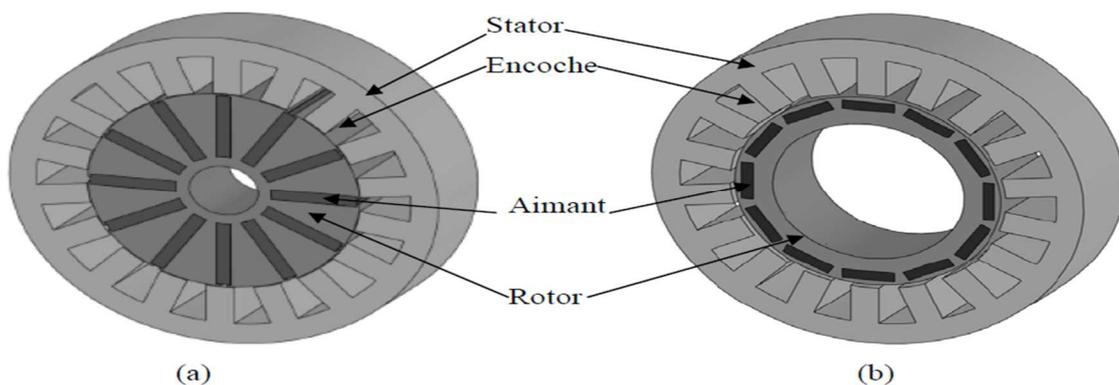


Figure 3.11 : Génératrice synchrone à aimant permanent enterré[29].

3.5.2 Structure à flux axial :

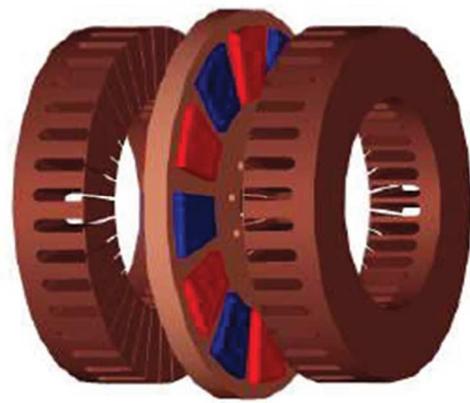
Afin de supporter les aimants permanents, ces machines « à disques » sont munies de disques fixes rotatifs et de disques mobiles. Il est préférable d'utiliser une structure de disque plutôt

qu'une structure cylindrique en raison de l'amélioration de la surface effective de génération de couple, ce qui se traduit par une densité de puissance élevée. L'augmentation de la polarité dans ce type de machine a le même effet sur les structures de champ radial et se traduit ici par une diminution de la longueur, et le volume est complètement occupé [36].

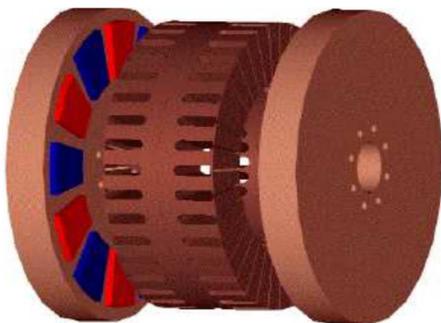
Les structures de disques offrent également une modularité naturelle remarquable grâce à des unités adjacentes, et la puissance est déterminée par le nombre de disques d'un diamètre donné. Cette structure est particulièrement intéressante (voir la figure 3.12) [37]. Malgré leur densité énergétique élevée, la présence de contraintes mécaniques liées à la poussée axiale et aux contraintes thermiques a été soulignée en raison de la difficulté d'évacuer les pertes statoriques.



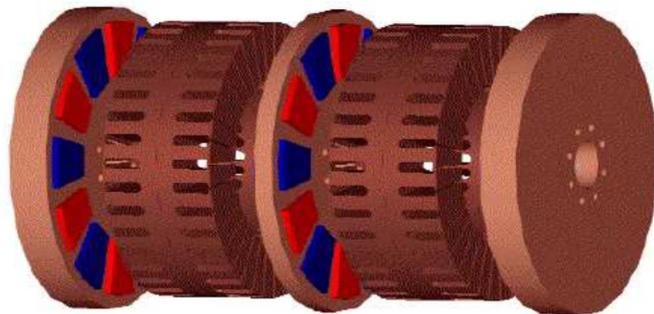
(a) Structure simple



(b) structure double stator



(c) Structure double rotor



(b) structure multi rotor multi stator

Figure 3.12: Structures des machines à flux axial[29].

3.6 Aimant permanents

3.6.1 Définition d'un aimant permanent :

Les objets à aimant permanent qui ont un très grand magnétisme Parmi ses fonctions la création d'un champ magnétique externe, c'est-à-dire que l'aimant a des pôles qui sont des régions où sa polarisation est une composante normale de la surface. Les aimants des machines synchrones sont fabriqués à partir de poudre de ferrite, de poudre de fer-cobalt ou de terre rares. Un bon aimant doit avoir une induction rémanente et un champ coercitif le plus grand possible [38].

3.6.2 Différents types d'aimants [39]:

- **Les Alnico** : Ce type est formé d'un alliage d'aluminium, de nickel, de cobalt et de fer, avec de bonnes propriétés magnétiques et un coût élevé du cobalt. Grâce à ses excellentes propriétés thermiques, il est utilisé pour certaines applications spéciales dans le domaine de la mesure à haute température
- **Les ferrites dures** : C'est un matériau céramique avec une propriété très stable, à un coût économique, il a une bonne propriété magnétique. C'est l'un des aimants les plus utilisés aujourd'hui, bien qu'il s'agisse d'une découverte ancienne et qui fait l'objet de nombreuses recherches afin de le développer.
- **Les samarium-cobalt** : Ce type est meilleur que les deux types mentionnés précédemment, bien que son coût soit l'un de ses inconvénients. Résistant à la corrosion et conserve ses propriétés à haute température, il est préférable d'utiliser ce type dans les domaines industriels et dans des conditions d'utilisation de très hautes températures.
- **Les néodyme-fer-bore** : Ce type d'aimant n'est pas résistant à la corrosion et n'est pas autorisé à être utilisé dans les champs d'énergie thermique, en raison du fait qu'il contient des couches de revêtement isolantes qui détruisent à haute température.

3.6.3 Performances magnétiques des aimants :

Les performances d'un aimant permanent sont déterminées par sa courbe d'aimantation $M = f(H)$ ou en induction $B = f(H)$, H Représente le champ magnétique influençant

l'utilisation des aimants. Ces performances sont plus particulièrement caractérisées sur le deuxième quadrant du cycle, qui correspond à la courbe de désaimantation.

Alors on obtient :

- L'induction rémanente B_r (induction magnétique en champ nul).
- Le champ coercitif de l'aimantation H_c (champ annulant l'aimantation M).
- Le champ coercitif de l'induction H_c (champ démagnétisant annulant l'induction B).
- Le produit d'énergie volumique BH dont on tire $(BH)_{max}$.

Ce tableau 3 présente les valeurs des principales grandeurs magnétiques pour les quatre types d'aimants. Pour certaines tailles, des zones de contraste caractérisent les différentes teintes disponibles chez le fabricant [38].

Tableau 3.1 : tableau récapitulatif des caractéristiques des aimants [38].

Matériaux	B_r en Tesla	H_c en kA/m	T^o de curie en C^o	Remarque diverses
Ferrites	0.2	200	300	Les moins chers
Alnico	1.2	50	750 à 850	Se démagnétisent trop facilement
Samarium cobalt	0.5	800	700 à 800	Prix élevé à cause du cobalt
Néodyme fer bore	1.3	1500	310	Prix en baisse (brevets) sujet à l'oxydation

Sur la figure 3.13 sont représentées les courbes de désaimantation, en aimantation et en induction pour les quatre familles d'aimants.

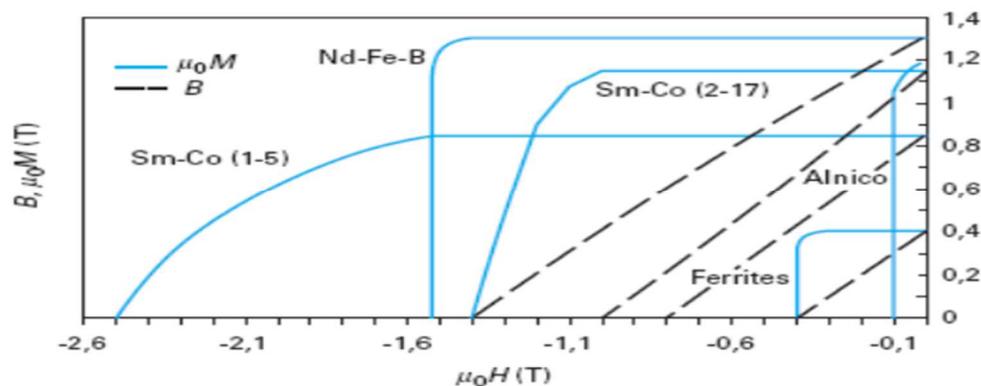


Figure 3.13 : Courbes de désaimantation de différents types d'aimants [38].

3.7 Les domaines d'application :

Il est utilisé pour les entraînements dont la vitesse doit être réglée à une vitesse de rotation constante, tels que les gros ventilateurs dans le domaine de la réfrigération et les compresseurs pour gaz liquéfiés et à usage industriel dans le domaine de l'alimentation du réseau d'eau grâce aux pompes centrifuges, et grâce au développement de l'électronique de puissance, la fixation de la machine sur l'aimant du transducteur trouve de nouvelles utilisations. Elle est également employée dans plusieurs domaines très divers tels que la robotique et les usages spatiaux et dans d'autres applications plus spécifiques telles que [30] :

- Les équipements domestiques (machine à laver le linge),
- Les automobiles,
- Matériel informatique et instruments de musique,
- Matériel électrique, jouets numériques, système de vision et de localisation et ses équipements,
- Domaine médical et soins de santé
- Les servomoteurs,
- La production d'électricité,
- Véhicules électriques et systèmes de propulsion sous-marins,
- Les machines outilles.

Elles sont utilisées pour des puissances allant de la gamme des microwatts à celle des mégawatts.

La figure 3.14 illustre quelques applications de ces machines.

Toutefois leur domaine d'utilisation privilégié reste les puissances à quelques dizaines de Kilowatts ou l'aimant permanent permet d'obtenir à taille égale, une induction dans l'entrefer plus élevée que les machines à rotor bobiné.

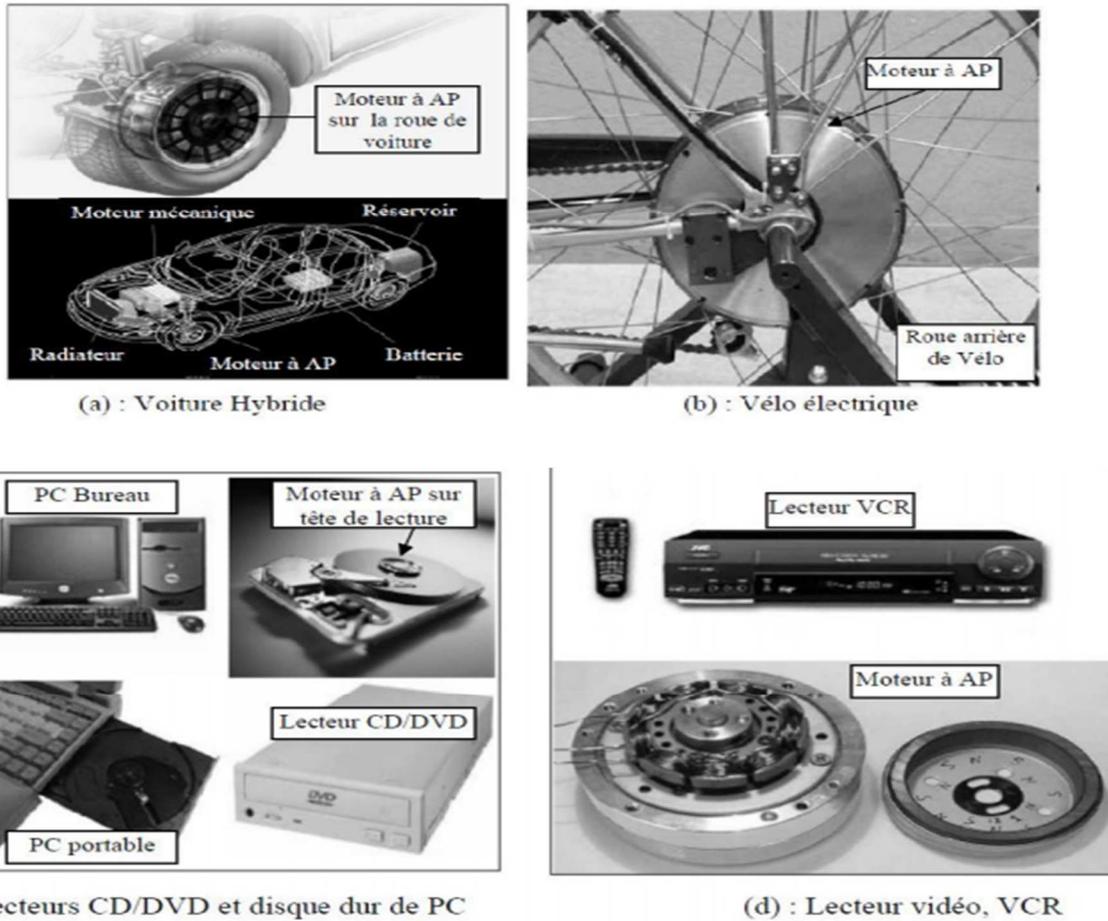


Figure 3.14 : Principales applications des machines synchrones à aimants permanents [30].

3.8 Alimentation et commande de la MSAP:

Le fonctionnement des machines synchrones est une référence de recherche pour de nombreux spécialistes dans le but d'améliorer et d'obtenir un couple uniforme et constant à un nombre variable de vitesses, et de développer le contrôle du processeur pour concurrencer les moteurs à courant continu. L'alimentation de la MSAP se fait généralement par deux éléments [40].

a. Le premier est une source électrique. Ce dernier est alimenté par des batteries, des générateurs, un réseau électrique (monophasé ou triphasé), etc.

b. Le deuxième élément est un ou plusieurs convertisseurs commandés. Il s'agit de dispositifs d'électronique de puissance incluant des interrupteurs de puissance (IGBTs, Thyristors, ...) qui sont commandés à travers des signaux de commande à l'ouverture/ou à la fermeture. Le rôle

d'un convertisseur commandé est de convertir l'énergie électrique fournie par la source électrique d'une forme à une autre à travers la commande d'interrupteurs de puissance.

La figure 3.15 présente un modèle d'alimentation et commande de MSAP.

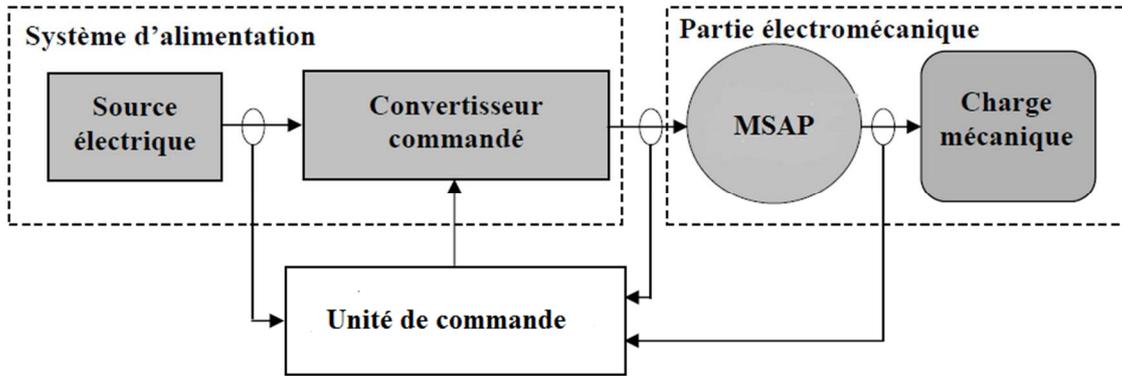


Figure 3.15 : Structure générale d'alimentation et commande de la MSAP[29].

3.9 Bilan de Puissance et rendement :

Le bilan de puissance la génératrice synchrone à aimant permanent triphasé est donné à la figure (3.16) [33].

- La puissance absorbée par l'alternateur = puissance mécanique reçue :

$$P_a = P_{méc} \quad (3.1)$$

- La puissance Electromagnétique de l'alternateur est : $P_{ém} = 3 E_0 I \sin \psi$ (3.2)
- Les pertes Joule = les pertes Joule dans le stator (induit).
- Les pertes Joule dans le rotor (inducteur) est égale zéros (= 0).

$$P_j = 3R_s I^2 \quad (3.3)$$

- Puissance utile = puissance électrique fournie à la charge triphasée :

$$P_U = 3 V I \sin \varphi \quad (3.4)$$

- Le rendement d'un alternateur synchrone triphasé est donné par :

$$\eta = \frac{P_U}{P_a} = \frac{P_U}{P_U + P_J + P_{rot}} \quad (3.5)$$

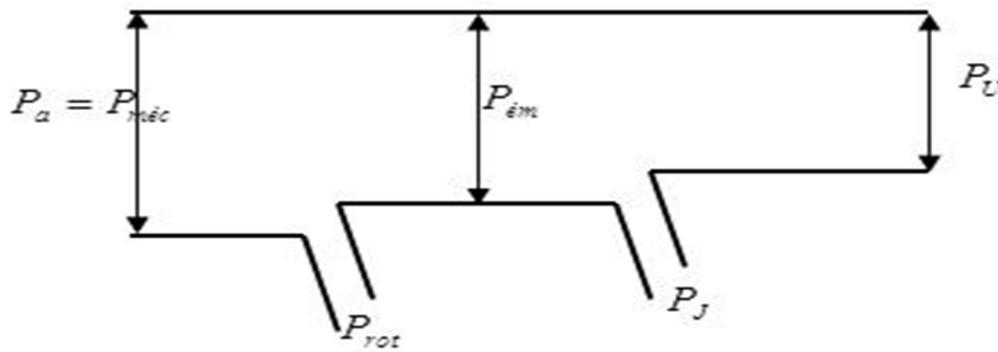


Figure 3.16 : Bilan de puissance d'une génératrice synchrone à aimant permanent triphasé(GSAP)[31].

3.10 Avantage de la machine synchrone à aimant permanent :

Par rapport à la machine asynchrone et à courant continu, la machine synchrone à aimant permanent présente les principaux avantages suivants :

- Construction solide incontestée par rapport à la machine à courant continu.
- Augmenter la stabilité de la constance de temps thermique et leur l'efficacité, et cela est dû au développement de l'installation, en éliminant les bagues et les brosses.
- Facteur de puissance et rendement plus élevés par rapport à la machine asynchrone.
- L'avantage de réduire les dimensions a cause de la structure de la machine et par conséquent un moindre moment d'inertie, ce qui augmente sa densité et sa fiabilité puissance par unité.
- Éliminer les pertes électriques dans le rotor a cause de l'utilisation d'aimants permanents.

3.11 L'inconvénient de la machine synchrone à aimant permanent

- Impact visuel sur les utilisateurs
- Impact sur les oiseaux : Des études confirment que les éoliennes affectent le chemin des oiseaux. D'autres études indiquent que les sites de construction d'éoliennes doivent être localisés pour éviter d'entraver la migration des oiseaux.
- La qualité de la puissance électrique L'énergie électrique produite par les éoliennes n'est pas statique car la source d'énergie éolienne est aléatoire donc la qualité de l'énergie produite n'est pas toujours très bonne. Le pourcentage de ce type de

production d'énergie dans le réseau est faible, mais avec l'amélioration de l'efficacité de l'énergie éolienne, en particulier dans les régions à haute efficacité éolienne et donc, la qualité de l'énergie produite par les éoliennes est améliorée.

- Le coût de l'énergie éolienne est élevé par rapport aux sources d'énergie traditionnelles. Bien qu'elle soit construite dans les meilleurs emplacements (là où il y a la plus grande quantité de vent), elle concurrence la plupart des sources d'énergie conventionnelles, mais son coût reste plus élevé. [41].
- Une réduction très importante du taux de bruit, en limitant le bruit généré par l'énergie mécanique, qui a été pratiquement réduit grâce aux progrès réalisés dans le multiplicateur. Le bruit aérodynamique est directement lié à la vitesse de rotation du rotor, il doit donc être réduit dans la mesure du possible [41].

3.12 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté des généralités sur la machine synchrone à aimant permanent en se basant sur les caractéristiques et les différents types des aimants permanents qui constituent un élément fondamental pour ce type de machine, les différentes structures des aimants sur le rotor, les avantages et les inconvénients ainsi que les domaines d'applications de la MSAP.

**CHAPITRE 4:
MODELISATION ET
SIMULATION DE LA
TURBINE EOLIENNE**

4.1 Introduction

La turbine éolienne est l'un des éléments de base dans la conversion de l'énergie cinétique en énergie électrique. Ses composants sont conçus avec précision afin d'augmenter l'efficacité de l'énergie produite. La conversion de l'énergie du vent à une énergie mécanique (voir la figure 4.1) se fait au niveau de la turbine, ainsi que la partie de la conversion de l'énergie mécanique à une énergie électrique est faite par le générateur. Dans cette partie, nous aborderons un ensemble de modèles, en commençant par la modélisation du vent, puis la modélisation de l'éolienne, qui régule sa vitesse de rotation, ce qui va conduire à une augmentation du rendement de l'énergie résultante, afin d'améliorer l'énergie extraite et ainsi augmenter l'efficacité de la production indépendamment des changements de vitesse du vent.



Figure 4.1 : La chaîne de conversion d'énergie au niveau de l'aérogénérateur[32].

4.2 Le vent :

Le vent est le transfert ou le mouvement des masses d'air d'une région à une autre horizontalement dans l'atmosphère, en fonction des différentes valeurs de pression atmosphérique d'une région à l'autre. De sorte que le vent se déplace toujours dans un mouvement accéléré des zones de haute pression atmosphérique vers les zones de basse pression atmosphérique. Le vent a plusieurs caractéristiques dont les plus importantes sont : la vitesse, la force et la direction. La vitesse du vent est mesurée en mètres par seconde, et sa direction est déterminée en fonction de sa source.

4.3 La turbine éolienne :

La pale de vent est un élément tridimensionnel qui est un élément essentiel de la conversion de l'énergie éolienne. Il se déplace selon la direction du vent, par la collision des courants d'air dans son corps.

Le rôle de la pale de vent est de convertir la force des courants d'air en mouvement et de fournir une force mécanique caractérisée par une rotation rapide et un couple mécanique.

4.4 Modélisation de la partie mécanique de l'éolienne :

4.4.1 Modélisation de vent :

Le vent est hautement variable, à la fois géographiquement et dans le temps. Il varie d'un endroit à l'autre, d'une journée à l'autre, d'une seconde à l'autre. Des différentes approches utilisées dans la littérature pour la génération d'une série synthétique de vent, dans notre cas, la vitesse de vent sera modélisée par une somme de plusieurs harmoniques.

$$V_{vent}(t) = A + \sum_{k=1}^i a_k \sin(\omega_k \cdot t) \quad (4.1)$$

Avec

a_k : Amplitude des harmoniques.

ω_k : Fréquence des harmoniques.

La vitesse du vent est représentée par la fonction :

$$v(t) = 10 + 0.2 \sin(0.1047t) + 2 \sin(0.2665t) + 0.2 \sin(1.2930t) + 0.2 \sin(3.6645t) \quad (4.2)$$

4.4.2 Modélisation d'une turbine éolienne :

Le système de conversion de l'énergie éolienne est l'un des systèmes complexes dans le domaine de la physique. Ce système repose sur plusieurs domaines, à savoir l'aérodynamique, la mécanique et l'électricité. De plus, l'énergie mécanique est liée à plusieurs facteurs, dont la vitesse du vent, la forme et la taille de l'éolienne.

Un modèle dynamique prenant en compte tous ces paramètres est nécessaire pour comprendre le comportement de la turbine. Afin de contrôler les performances et satisfaire les caractéristiques opérationnelles voulues, le recours à la modélisation est une nécessité.

4.4.3 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine :

Les modèles les plus fréquemment rencontrés dans le cadre d'étude électromécanique sont relativement simples et obéissent aux hypothèses simplificatrices suivantes :

- Toutes les aubes de turbine sont de conception identique et ont les mêmes paramètres d'inertie, d'élasticité et de frottement.
- Les coefficients de frottements des pales par rapport à l'air et par rapport au support sont très faibles et peuvent être ignorés.
- On peut considérer que la vitesse du vent est uniformément répartie sur toutes les pales, ce qui permet de modéliser facilement toutes les pales avec un seul système mécanique et le même système mécanique est caractérisé par la somme de tous les systèmes mécaniques.

On obtient alors un modèle mécanique simple (voir Figure 4.2) :

4.5 Modèle de la partie mécanique :

La partie mécanique de la turbine comprend trois pales orientables et de longueur R . Elles sont fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse de rotation Ω_t , relié à un multiplicateur de gain G . Ce multiplicateur entraîne la génératrice électrique à une vitesse Ω_g .

Sur la base des hypothèses simplificatrices mentionnées on obtient alors un modèle mécanique constitué de deux masses comme l'illustre la figure 4.2, [42], [43].

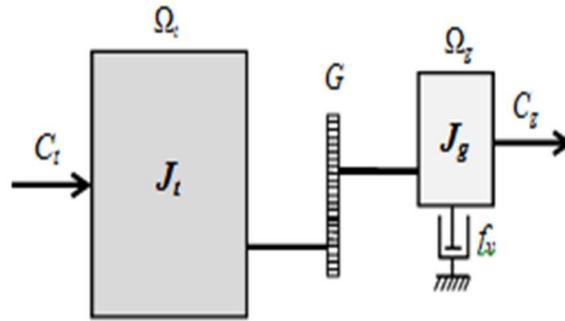


Figure 4.2 : Modèle mécanique simplifié de la turbine.[42]

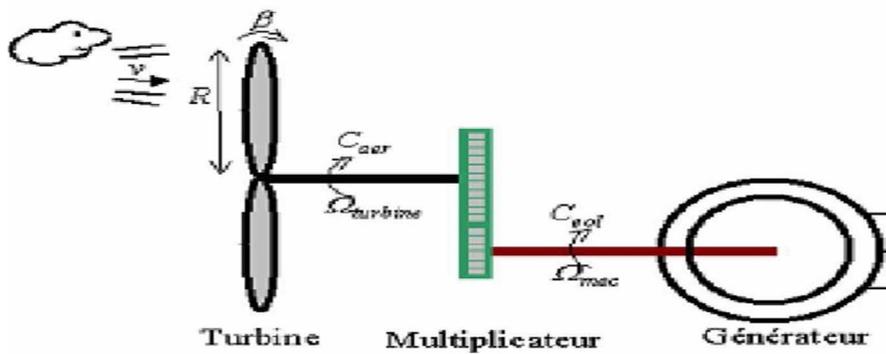


Figure 4.3 : Modèle mécanique de la turbine éolienne[32].

Avec :

J_t : Le moment d'inertie de la turbine équivalent aux inerties des 3 pales de l'éolienne,

J_g : Le moment d'inertie de la génératrice,

f_v : Le coefficient dû aux frottements visqueux de la génératrice,

C_g : Le couple mécanique sur l'arbre de la génératrice après multiplicateur,

Ω_g : La vitesse de rotation de la génératrice.

G : Le gain du multiplicateur de vitesse.

4.5.1 Modèle du multiplicateur :

Le multiplicateur adapte la vitesse de rotation de la turbine (arbre lent) à la vitesse de rotation de la GSAP (arbre rapide). Il est supposé rigide et modélisé par un simple gain G . L'élasticité et les frottements du multiplicateur sont négligés ; ainsi les pertes énergétiques dans celui-ci sont considérées comme étant nulles. Le couple aérodynamique de la turbine éolienne est divisé par le rapport du multiplicateur pour obtenir le couple mécanique sur l'arbre du générateur.

Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les deux relations suivantes :

$$C_g = \frac{C_t}{G} \quad (4.3)$$

$$\Omega_t = \frac{\Omega_g}{G} \quad (4.4)$$

4.5.2 Modèle de l'arbre mécanique

La liaison entre la turbine et la partie électrique de l'éolienne est représentée ici par l'intermédiaire de l'équation du mouvement. Plusieurs modèles du comportement mécanique de l'arbre de l'éolienne, sont proposés dans la littérature [42], [44], [45]. La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie J_t et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale J constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice J_g :

$$J = \frac{J_t}{G^2} + J_g \quad (4.5)$$

Il est à noter que l'inertie du rotor de la génératrice est très faible par rapport à l'inertie de la turbine reportée par cet axe. A titre illustratif, pour une éolienne General Electric de 1.5MW, le poids du rotor de la turbine pèse 23 tonnes [46].

D'après la figure 4.2 , nous pouvons écrire l'équation fondamentale de la dynamique du système mécanique sur l'arbre mécanique de la génératrice par :

$$J \frac{d\Omega_g}{dt} = C_{méc} = C_g - C_{em} - C_f \quad (4.6)$$

Donc, l'évolution de la vitesse mécanique Ω_g dépend du couple mécanique appliqué au rotor de la génératrice $C_{méc}$ qui est la résultante du couple de la turbine après multiplicateur, le couple électromagnétique produit par la génératrice C_{em} , et le couple de frottement visqueux C_f donné par la relation :

$$C_f = f_v \Omega_g \quad (4.7)$$

$$P_t^{opt} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 C_p^{max} (\lambda_{opt}, \beta_{opt}) \quad (4.8)$$

Le schéma bloc de la figure 4.4 correspond aux modélisations aérodynamique et mécanique de la turbine éolienne. Ce schéma bloc montre que la vitesse de rotation Ω_g de la génératrice, donc de la turbine, peut être contrôlée par action soit sur l'angle de calage des pales β , soit sur le couple électromagnétique C_{em} de la GSAP. La vitesse du vent v est considérée comme une entrée perturbatrice au système.

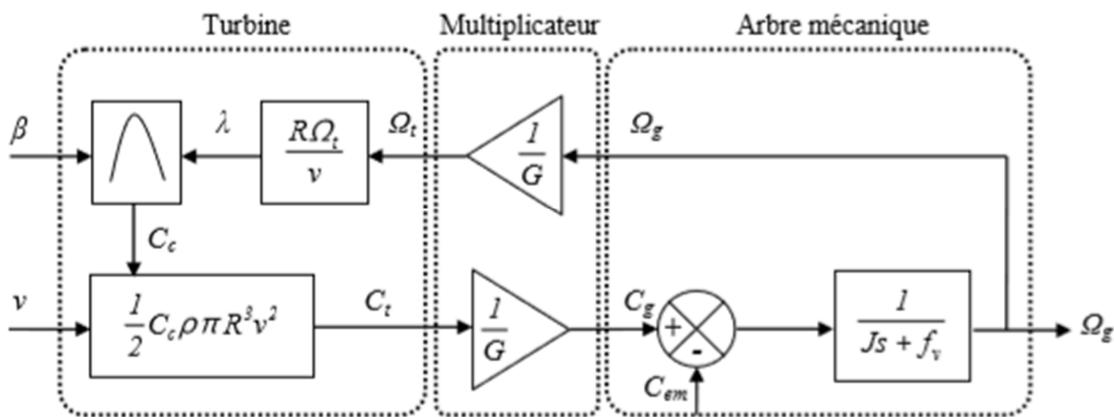


Figure 4.4: Schéma bloc du modèle de la turbine.[42]

4.6 Stratégie de maximisation de puissance "MPPT" :

Les éoliennes utilisées pour la production d'électricité doivent permettre de produire un maximum de puissance en exploitant au mieux l'énergie disponible dans le vent. C'est pour cela que de nombreux systèmes de commande de l'éolienne, agissant au niveau de la partie mécanique par l'intermédiaire de l'angle de calage des pales ou électrique par la commande

de la machine électrique via l'électronique de puissance, sont développés pour maximiser la conversion d'énergie [43], [47].

4.6.1 Bilan des puissances :

L'équation (4.4) quantifie la puissance aérodynamique extraite par la turbine éolienne. Cette puissance peut être essentiellement maximisée en ramenant le coefficient C_p à sa valeur maximale. Ce coefficient étant dépendant de la vitesse relative λ_{opt} (ou encore de la vitesse du générateur), par conséquent, l'utilisation d'une éolienne à vitesse variable permet de maximiser cette puissance. Il est donc nécessaire de concevoir des stratégies de commande permettant de maximiser la puissance électrique générée (à travers le couple électromagnétique) en ajustant la vitesse relative à sa valeur optimale λ_{opt} , et cela en régulant la vitesse de rotation de la génératrice à une valeur de référence quel que soit la vitesse du vent considérée comme grandeur perturbatrice [48], [49].

En régime permanent, la puissance aérodynamique de la turbine P_t diminuée des pertes (représentées par les frottements visqueux) est convertie directement en puissance électrique P_g (figure 4.5) [50].

$$P_g = P_t - P_{pertes} \quad (4.9)$$

La puissance mécanique stockée dans l'inertie totale J et apparaissant sur l'arbre de la génératrice P_g est exprimée comme étant le produit entre le couple mécanique C_g et la vitesse mécanique Ω_g :

$$P_g = C_g \Omega_g \quad (4.10)$$

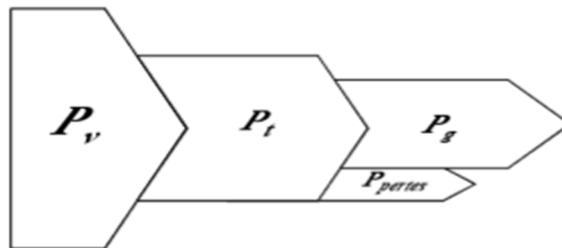


Figure 4.5 : Diagramme de conversion de puissance.[42]

Actuellement, les stratégies adoptées visent à extraire le maximum de puissance du vent [47]. Cette puissance est extraire lorsque la turbine fonctionne au coefficient de puissance maximale. La recherche du maximum se fait en permanence et l'éolienne s'adapte donc à chaque variation de vent pour être dans une configuration d'extraction maximale de puissance [43]. Dans notre travail, nous représentons deux stratégies de maximisation de la puissance :

- 1) Stratégie de maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse ;
- 2) Stratégie de maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse.

Pour l'étude de ces deux modes de contrôle, on supposera que la génératrice (GSAP) et ces convertisseurs sont idéaux, i.e., quelle que soit la puissance mécanique transmise par la turbine, le couple électromagnétique C_g développé par la génératrice est donc à tout instant égal à sa valeur de référence imposée par la commande ($C_g=C_t^*$). Ainsi, le générateur et ces convertisseurs seront modélisés par un gain unitaire.

4.6.2 Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique :

Cette première stratégie de contrôle consiste à régler le couple électromagnétique de la génératrice de manière à fixer la vitesse de rotation mécanique à une vitesse de référence permettant d'extraire le maximum de puissance de la turbine. Ainsi, un asservissement de la vitesse de rotation de la GSAP doit être effectué. Pour un point de fonctionnement donné (vitesse du vent fixe), la puissance mécanique est maximale si la valeur maximale du coefficient C_p est atteinte. Celle-ci est obtenue si la vitesse relative λ est égale à sa valeur optimale λ_{opt} . Par conséquent, la vitesse de rotation de référence de la GSAP Ω_g^* est obtenue à partir de l'équation (4.4) comme suit :

$$\Omega_g^* = G \Omega_t^* \quad (4.11)$$

$$\Omega_t^* = \frac{\lambda_{opt} v}{R} \quad (4.12)$$

Le couple électromagnétique de référence C_g permettant d'avoir une vitesse de rotation Ω_g égale à sa valeur de référence Ω_g^* obtenue en sortie du régulateur de vitesse. Un régulateur de type proportionnel-intégral (PI) permet ainsi d'asservir la vitesse de rotation et d'atténuer l'effet du couple de la GSAP C_g considéré comme une perturbation. Le schéma de principe du contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique de rotation est montré à la figure 4.6 [42, 43].

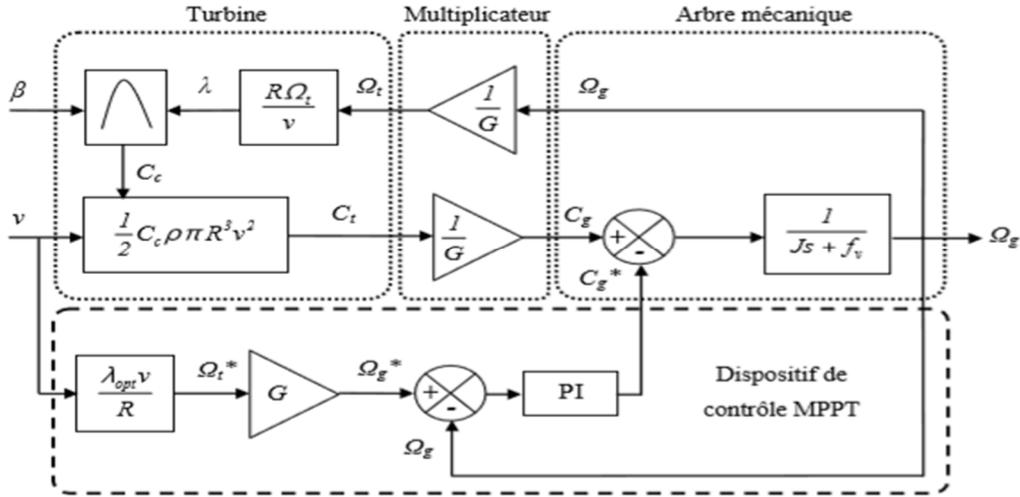


Figure 4.6: Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique.[42]

Cependant en pratique, une mesure précise de la vitesse du vent est difficile à réaliser. Ceci pour deux raisons. Premièrement, l’anémomètre est situé derrière le rotor de la turbine, ce qui donne une lecture erronée de la vitesse du vent. Deuxièmes, le diamètre de la surface balayée par les pales étant important (typiquement 70m pour une éolienne de 1.5MW), une variation sensible du vent apparaît selon la hauteur où se trouve l’anémomètre. L’utilisation d’un seul anémomètre conduit donc à n’utiliser qu’une mesure locale de la vitesse du vent qui n’est donc pas suffisamment représentative de sa valeur moyenne apparaissant sur l’ensemble des pales [50]. Une mesure erronée de la vitesse conduit donc forcément à une dégradation de la puissance captée selon la technique d’extraction précédente. C’est pourquoi la plupart des turbines éoliennes sont contrôlées sans asservissement de la vitesse.

4.6.3 Contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse mécanique :

Cette seconde structure de contrôle repose sur l’hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent devant les constantes de temps électriques du système éolien, ce qui implique que le couple d’accélération de la turbine peut être considéré comme nul. Dans ce cas, à partir de l’équation (4.6), nous pouvons écrire :

$$J \frac{d\Omega_g}{dt} = C_{méc} = C_g - C_{em} - C_f = 0 \quad (4.13)$$

De plus, si l’on néglige l’effet du couple dû aux frottements visqueux ($C_f = f_v \Omega_g = 0$)

Par rapport au couple mécanique C_{em} , on peut alors écrire :

$$C_g = C_{em} \quad (4.14)$$

Une estimation de la vitesse de rotation de la turbine, notée Ω_t est obtenue à partir de la mesure de la vitesse de rotation de la GSAP :

$$\widehat{\Omega}_t = \frac{\Omega_g}{G} \quad (4.15)$$

Une mesure précise de la vitesse du vent étant difficile, une estimation de celle-ci, notée v , est obtenue à partir de l'estimation de la vitesse de rotation de la turbine :

$$\widehat{v} = \frac{\widehat{\Omega}_t R}{\lambda_{opt}} \quad (4.16)$$

Le couple de la turbine éolienne peut ensuite être obtenu à partir des estimations de la vitesse du vent et de la vitesse de rotation de la turbine. Il peut s'exprimer par :

$$\widehat{C}_t = \frac{1}{2} C_c^{max} \rho \pi R^3 \widehat{v}^2 \quad (4.17)$$

Remplaçant maintenant (4.16) dans (4.17) le couple de la turbine de référence s'exprime donc par :

$$\widehat{C}_t^* = \frac{1}{2 \lambda_{opt}^2} C_c^{max} \rho \pi R^5 \widehat{v}^2 \quad (4.18)$$

Le couple électromagnétique de référence est alors obtenu à partir de l'estimation du couple de la turbine éolienne :

$$\widehat{C}_g^* = \frac{\widehat{C}_t^*}{G} \quad (4.19)$$

Le schéma bloc de la figure 4.7 résume le principe de la stratégie du contrôle MPPT de la turbine éolienne sans asservissement de la vitesse de rotation [42], [43].

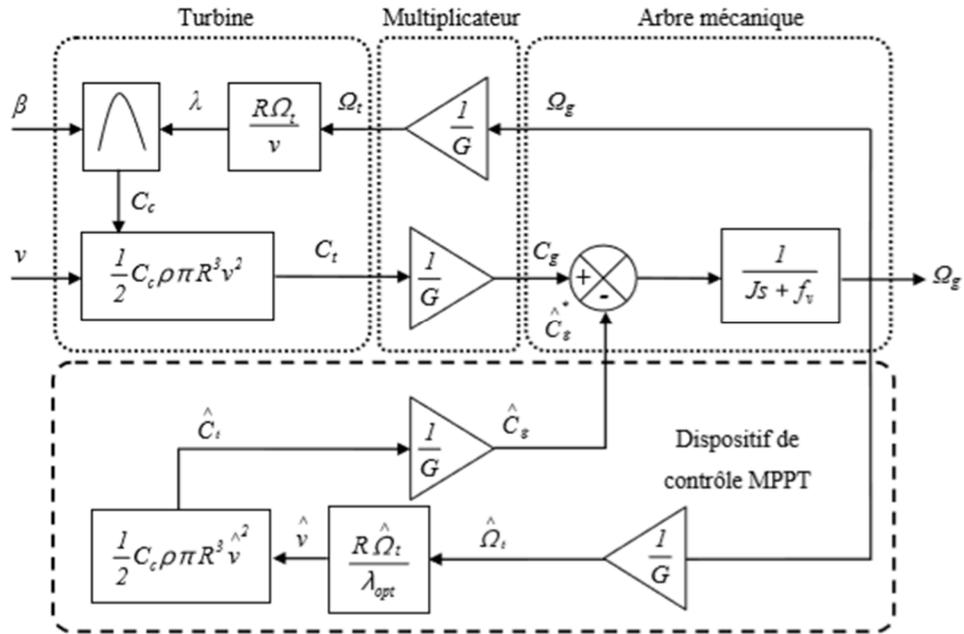


Figure 4.7 : Contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse mécanique.[42]

4.7 Résultats obtenus par simulation :

Nous présenterons dans cette section les résultats de commande du système éolien avec les deux stratégies de contrôles MPPT étudiées précédemment. L'ensemble du système éolien et sa commande ont été simulés en utilisant le logiciel MATLAB/SIMULINK.

4.7.1 MPPT avec asservissement de vitesse :

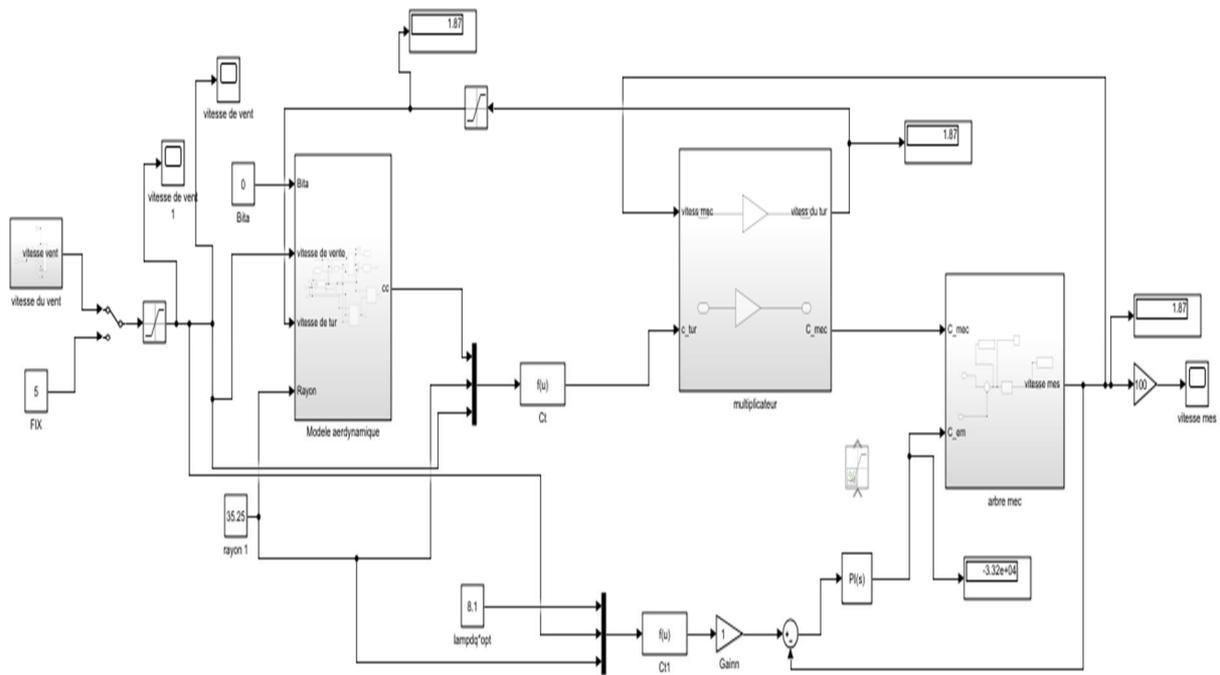


Figure 4.8 : Schéma block simulés en utilisant le logiciel *MATLAB/SIMULINK*

Résultats obtenu par la simulation :

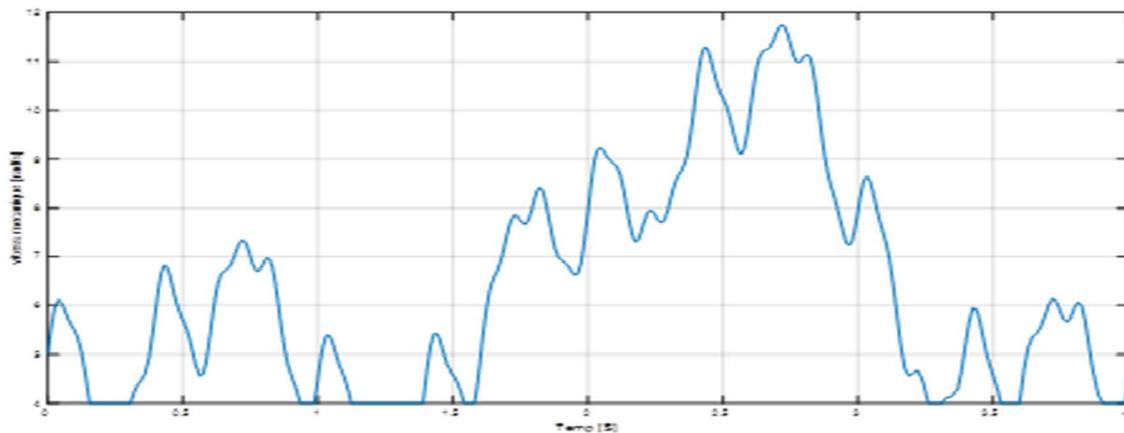


Figure 4.9: la vitesse de vent avec asservissement

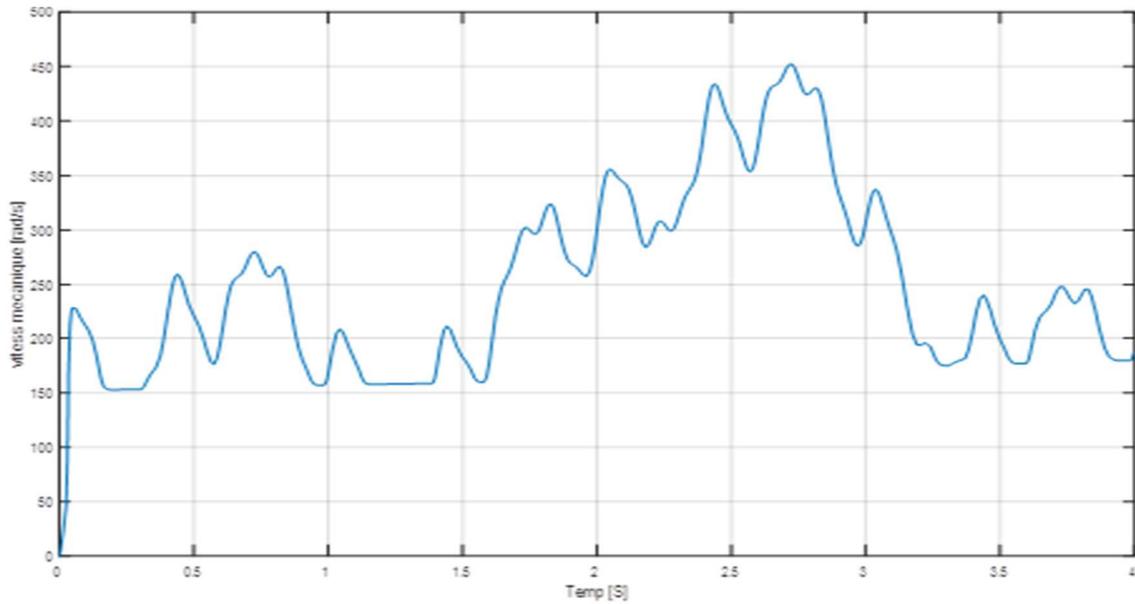


Figure 4.10 : la vitesse transmit à la génératrice avec asservissement

Avec une source de vent fixe :

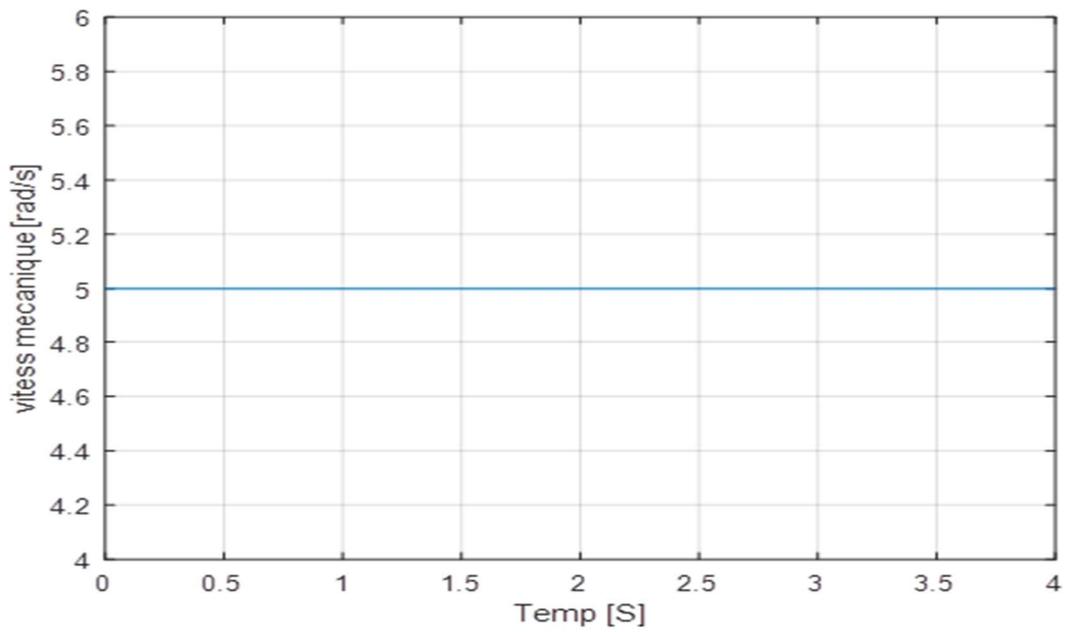


Figure 4.11: vitesse de vent fixe

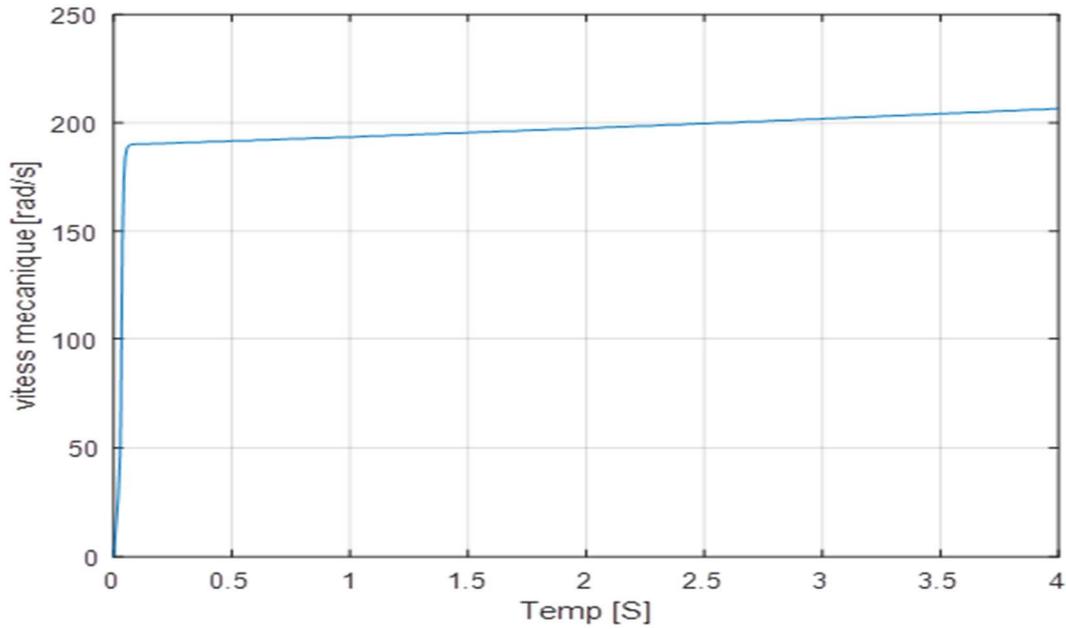


Figure 4.12 : la vitesse transmit a la génératrice avec vitesse de vent constant

4.7.2 MPPT sans asservissement de vitesse :

Schéma block simulés en utilisant le logiciel MATLAB/SIMULINK :

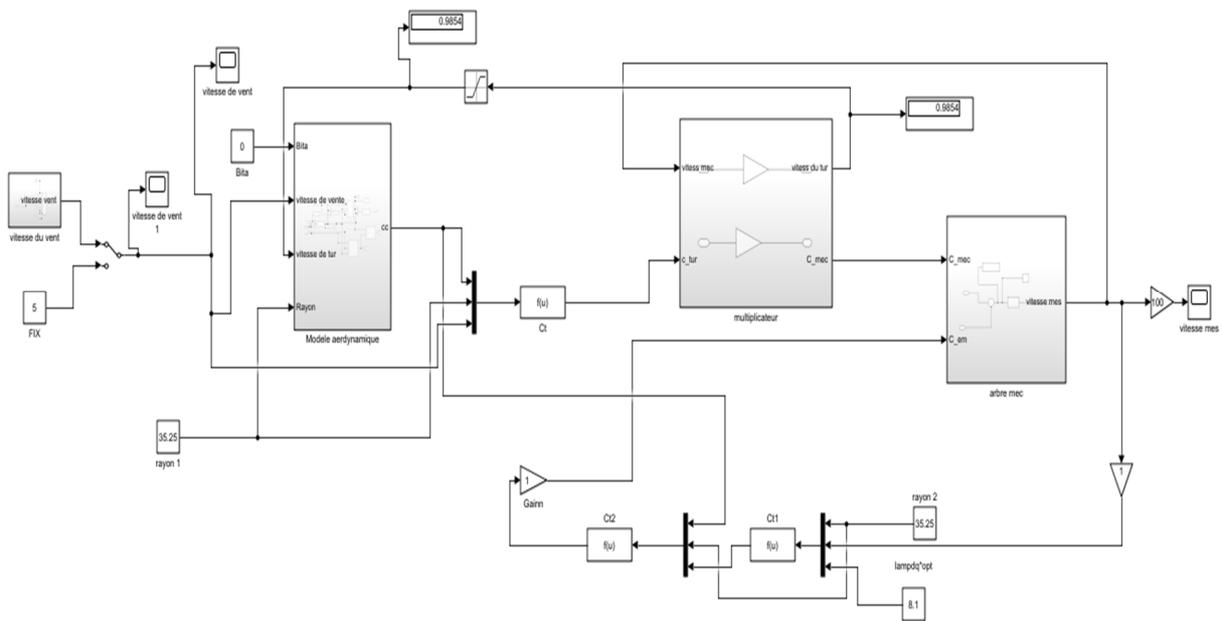


Figure 4.13: Schéma block simulés en utilisant le logiciel MATLAB/SIMULINK

Résultats obtenu par la simulation :

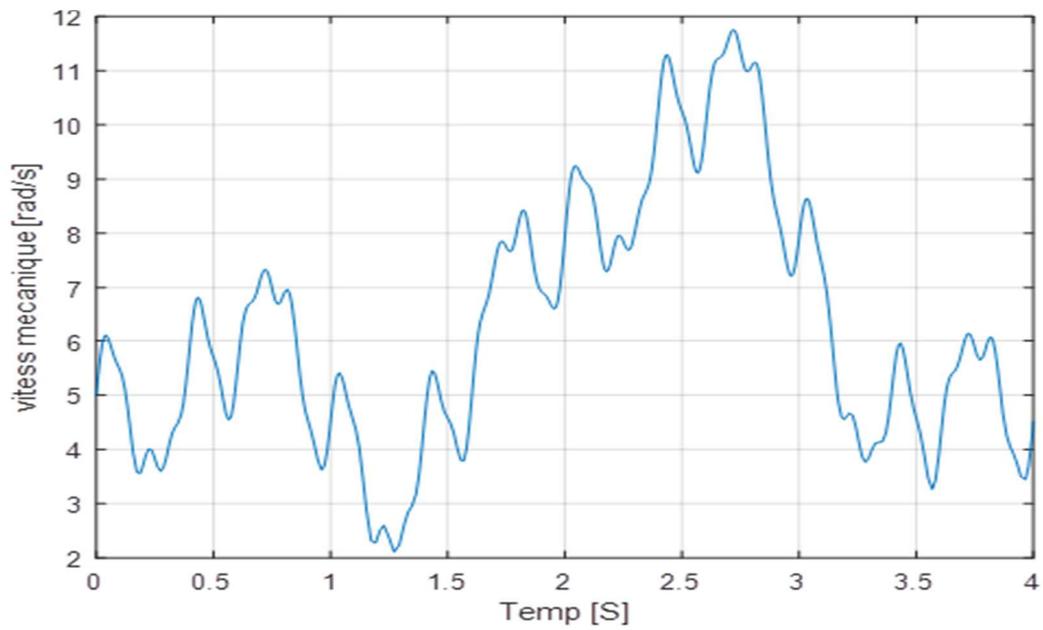


Figure 4.14 : la vitesse de vent sans asservissement

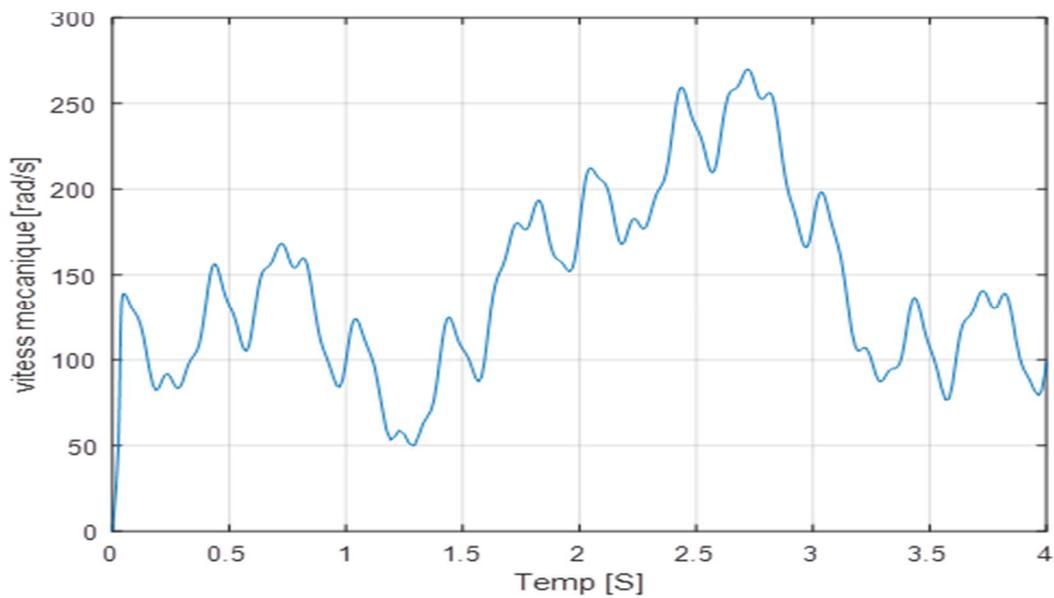


Figure 4.15 : la vitesse transmit à la génératrice avec asservissement

Avec une source de vent fixe :

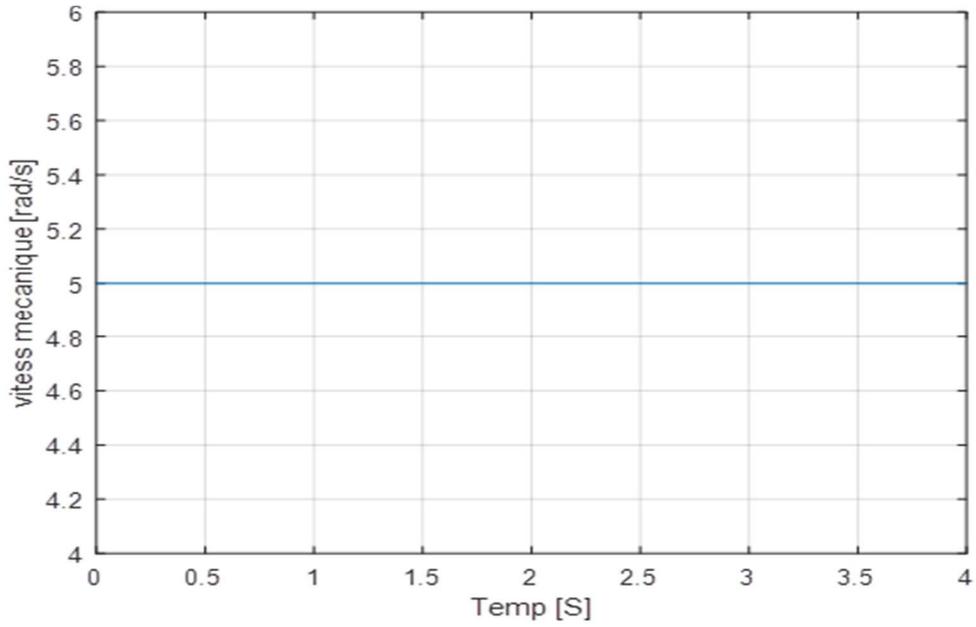


Figure 4.16 : vitesse de vent fixe

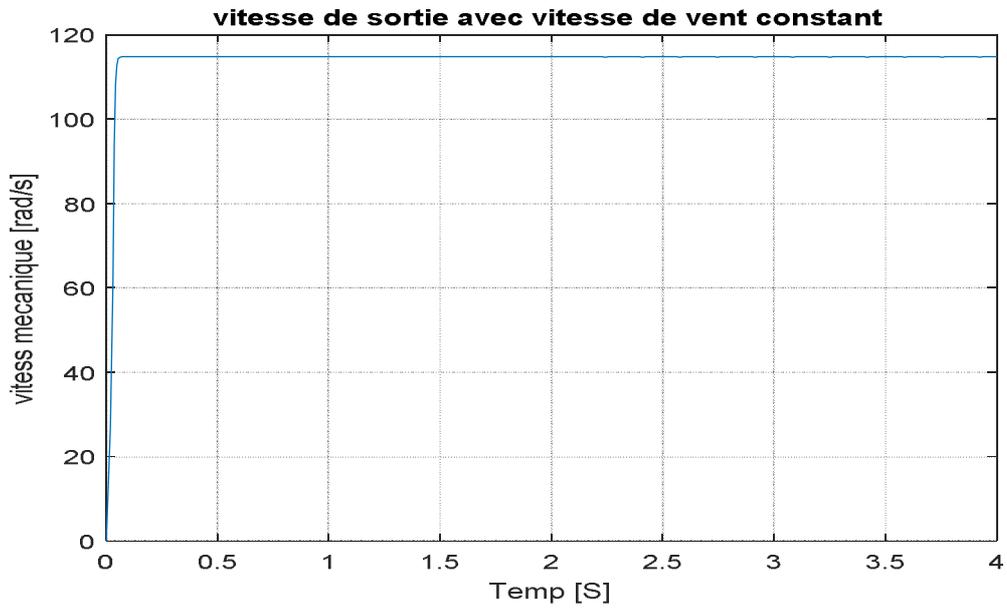


Figure 4.17 : La vitesse transmit a la génératrice avec vitesse de vent constant

4.8 Résultats obtenus par simulation

Nous présenterons dans cette section les résultats de commande du système éolien avec les deux stratégies de contrôles MPPT étudiées précédemment. L'ensemble du système éolien et sa commande ont été simulés en utilisant le logiciel *MATLAB/SIMULINK*. L'éolienne a été soumise au vent dont son profil temporel est donné par les figures précédent.

MPPT avec asservissement de vitesse :

- La stratégie de commande de la turbine éolienne basée sur l'asservissement de la vitesse est mise en œuvre, un correcteur de type Proportionnel-Intégrateur PI.
- La vitesse de rotation du générateur ainsi que sa référence, la puissance aérodynamique de la turbine et la vitesse relative sont montrés sur les figures (Figure 4.12 Figure 4.14).
- Les résultats obtenus montrent les meilleures performances statiques et dynamiques, meilleurs poursuite de la consigne contrôlée (vitesse) et un temps de réponse souhaitable offertes par le régulateur PI.

MPPT sans asservissement de vitesse :

- Les figures (Figure 4.16 Figure 4.17) présente les résultats de simulation du système éolien commandé par la stratégie MPPT sans asservissement de la vitesse de rotation du générateur. Les figures (Figure 4.12 , Figure 4.14) montrent la vitesse de rotation mécanique de la turbine.
- Les résultats de simulation correspondant à cet algorithme de commande montrent que les variations de la vitesse transmirent au génératrice sont adaptées à la variation de la vitesse du vent.
- Finalement, les résultats obtenus pour les deux stratégies de contrôle MPPT (avec et sans- asservissement de vitesse) montrent des bonnes performances statiques et dynamiques, un temps de réponse souhaitable offertes par les deux techniques ; ce qui justifie le choix de la méthode MPPT pour le contrôle de la turbine.

4.9. Conclusion

Ce chapitre traite de la modélisation des éléments constituant la chaîne de conversion éolienne qui est couplée d'une machine synchrone à aimants permanents GSAP associée à la turbine. Puis, les modèles aérodynamique et mécanique de la turbine. La turbine utilisée est celle à axe vertical de type Savonius.

Ensuite, nous nous sommes intéressés à la modélisation des différents constituants du système éolien. En effet, les modèles analytiques des différents constituants du système éolien ont été établis à savoir le profil du vent appliqué, ainsi que les modèles aérodynamique et mécanique de la turbine ont été développés

A la fin, nous avons présenté les résultats de simulation de la chaîne complète de production d'énergie éolienne.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

La production d'électricité par les systèmes éoliens est importé des nouvelles solutions durables. Cette solution efficace est surtout visible dans le domaine du grand éolien grâce au développement de nouvelles technologies telles que les matériaux de construction, l'électronique de puissance et les techniques de commande. L'Algérie amorce une dynamique d'énergie verte en lançant un programme ambitieux de développement des énergies renouvelables (EnR) d'efficacité énergétique et développement durable.

Dans ce travail, nous avons présenté la modélisation et simulation d'une chaîne éolienne basé sur une machine synchrone a aimant permanent, exactement la différentielle électronique.

L'objectif de ce travail est d'apporter une commande à un système de éolien à base d'un génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP) et un turbine à axe verticale. Ce travail est subdivisé en quatre chapitres.

Dans le premier chapitre de ce mémoire nous avons présenté une généralité sur l'énergie éolienne, les différents types des éoliennes et la composition de chaque type, ainsi que quelque chiffre d'éolienne en Algérie enfin les avantages et les inconvénients de ce types d'énergie renouvelable.

Dans le deuxième chapitre on à faire un état de l'art de l'énergie éolienne, on a faire un historique qui parle sur l'évolution et le développement de cette énergie renouvelable.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté une description théorique de la machine synchrone a aimant permanent, en a illustré les types des aimant et leur principale caractéristique intégré dans MSAP.

Le quatrième chapitre nous avons base sure la modélisation d'une turbine éolienne avec ses composants. Nous avons établi un modèle global de la chaine de conversion éolienne qui est constituée d'une machine synchrone à aimants permanents GSAP associé à une turbine éolienne, puis nous avons présenté les modèles mathématiques des composantes du système

de conversion d'énergie éolienne et nous avons décrit la commande de la liaison entre une GSAP,

Enfin on a réalisé le schéma de simulation et la représentation de fonctionnement de la turbine éolienne. En suite, nous avons présenté les résultats de simulation et l'interprétation de toutes les courbes obtenus.

Comme perspective de ce travail, on proposera d'améliorer la production décentralisée et ceci, par l'étude des points suivants :

- ✓ Étude et contrôle des systèmes de production hybride tels que les systèmes (éolienne - photovoltaïque), (éolienne-diesel), (éolienne - photovoltaïque –diesel)...etc.
- ✓ Commande et gestion des systèmes, optimisations des critères de minimisation du coût et structure.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- [1] Guerida Siham et Otman Abdelwafi (2019), 'Modélisation et control d'un système de pompage d'eau connecté à l'éolienne,' Mémoire de master Commande électrique, Université Ahmed Draia, Adrar.
- [2] P. D. Fleming and S. D. Proben (1984), "The Evolution of Wind-Turbines: An Historical Review". Applied Energy 18, pp: 163-177, School of Mechanical Engineering, Cranfield Institute of Technology, Bedford.
- [3] 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.
- [4] Site internet: www.azocleantech.com
- [5] Site internet: www.sciencedirect.com/topics/engineering/vertical-axis-wind-turbine
- [6] Akrabou Omar, Aichaoui Belkhire. (2017), 'Etude des paramétrés météorologiques intervenant dans la simulation d'un parc éolien-cas de site d'Adrar', Mémoire de master Physique énérgitique, Université Ahmed Draia, Adrar.
- [7] www.consoglobe.com/wp-content/uploads/2014/09/Eolienne-axe-vertical.jpg
- [8] Site internet: <https://image.made-in-china.com/44f3j00NRiEHPrIVfoV/500W-Horizontal-Axis-Wind-Turbine-Generator-for-Sale.webp>
- [9] Site internet: <https://electricalacademia.com/renewable-energy/vertical-axis-wind-turbine-vawt-working-types-advantages-disadvantages>
- [10] <http://www.journal-eolien.org/tout-sur-l-eolien/wp-content/uploads/2018/01/Credit-M-A-Guichard-ObservER.jpg>
- [11] <https://electricalacademia.com/renewable-energy/wind-turbine-parts-functions/>
- [12] B. Belabes, A. Youcefi, O. Guerri, M. Djamai, A. Kaabeche. (2015), « Evaluation of wind energy potential and estimation of cost using wind energy turbines for electricity generation in north of Algeria », Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 51, Pages : 1245-1255.

- [13] https://scihub.se/https://www.researchgate.net/publication/235635627_Review_and_use_of_the_Algerian_renewable_energy_for_sustainable_development
- [14] Kateb Baha Eddine (2020), « Amélioration des performances d'un system de pompage éolienne ». mémoire de master Automatique et informatique industrielle, Université de Biskra.
- [15] A. Harrouz, A. Benatiallah, O. Harrouz. (2021), “ Modélisation d'une Eolienne autonome couplée avec Génératrice Synchrone à Aimant Permanent”, la conférence nationale sur les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique "CNEREE'2021", Université Adrar, Algérie.
- [16] Boudia, S. M., Benmansour, A., & Hellal, M. A. T. (2016). Wind resource assessment in Algeria. *Sustainable cities and society*, 22, 171-183.
- [17] A. Harrouz, Meriem Abbes, Ilhami Colak, Korhan Kayisli. (2019), “Information Systems and Renewable Energy in Algeria”, Conférence Algérienne des Grands Réseaux Electriques CAGRE19, Algeria.
- [18] Boudia .S. M (2013). 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.
- [19] Dlimi Faiza et Djelaili Zohour. (2020), « Etude et contrôle d'une turbine éolienne a axe verticale couple a un générateur éolien ». Mémoire de master université Ahmed Draïa ADRAR.
- [20] Boudia .S. M.,A. Benmansour, and M.A.T.Hellal (2016). Wind resource assessment in Algeria. *Sustainable Cities and Society*, 22:171-183.
- [21] Boudia, S. M., & Santos, J. A. (2019). Assessment of large-scale wind resource features in Algeria. *Energy*, 189, 116299.
- [22] Daaou Nedjari, H., Kheder Haddouche, S., Balehouane, A., Guerri, O (2017). Optimal windy sites in Algeria: Potential and perspectives. *Energy*. In press.
- [23] <https://www.energy.gov.dz/?rubrique=energies-nouvelles-renouvelables-et-maitrise-de-lrenergie>

- [24] Hau.E (2005). Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics, 2nd edition, Springer.
- [25] <https://machronique.com/wp-content/uploads/2014/05/eolienne-axe-vertical1.jpg>.
- [26] Frede Blaabjerg, Marco Liserre, Ke Ma (2011). « Power electronics converters for wind turbine systems », IEEE Transactions on industry applications, Vol. 48, N 2, Pages :708-719.
- [27] Ackermann. T (2005). Wind Power in Power System, Wiley, Ltd.
- [28] Site internet: <http://www.sonelgaz.dz/?Page=article&ida=364>
- [29] EL Barka , Reggad Moustapha (2018) « Modélisation et Simulation d'un Système Eolien pour la Production de L'électricité », Mémoire de master ETT (Commande électrique), Université Ahmed Draia, Adrar.
- [30] Boufenar Samir ,Latreche Zakaria. (2019), « Dimensionnement et Modélisation de la machine synchrone à aimant permanent ». Mémoire de fin d'étude de Master en Électrotechnique Département d'Electrotechnique Université Mohamed Seddik Ben Yahia Jijel.
- [31] Kaddouri Abdelkader, Lahreche Boualem. (2018), « Commande de la génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP) dans un système éolien ». Mémoire de Fin D'Etudes de Master en électrotechnique Département de Technologie, Université Tahri Mohamed – Bechar.
- [32] Abdelkader Harrouz, « Application of Renewable Energy in Algeria and Challengers», 1st Algerian Multi-Conference on Computer, Electrical and Electronic Engineering (AMCEE'17), 24 - 28 Avril 2017, USTHB Alger, Algeria.
- [33] T. WILDI (2000), «Electrotechnique », 3ème édition, ISBN :13978-2-8041-3171
- [34] L. Hamane (2003) « les ressources éoliennes de l'Algérie » Bul. Ene. Ren, CDER, N°3, pp : 10-11
- [35] Boussad seddik, (2012) "Contribution à la Modélisation des Systèmes Couple Machine Convertisseur : Application aux Machines à Aimant Permanent (BDCM-MSAP)". Thèse Doctorat d'Université Mouloud Mammeri de Tizi- Ouzou.

- [36] Nicolas Laverdure (2005), «l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires» Thèse de Doctorat d'institut national polytechnique de Grenoble.
- [37] Site internet: www.suisse-eole.ch/fr/energie-eolienne/statistiques/
- [38] Khelfaoui Saida, (2014), «Commande du moteur à aimants permanents avec alimentation non-sinusoïdale», Magister en electrotechnique option : Commande des machines electriques, Universite Larbi ben M'hidi Oum el Bouaghi.
- [39] H. Abdellaoui, (2011), « Etude expérimentale de la position rotorique d'un moteur synchrone à aimant permanents par variables électriques», Mémoire de magister, université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- [40] A. Harrouz, Boussaid Ibrahim, Tahiri Fadila, Bekraoui Fatih et Ouledali Omar, (2019) « Modélisation et Commande du Redresseur Triphasé utilisé dans la Chaîne de Conversion Eolien », Conférence Internationale sur les Matériaux, le Patrimoine et l'Environnement en Zones Arides, Université Ahmed DRAIA, Adrar, Algérie.
- [41] Haritza Camblong (2003) «Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable » , thèse de Doctorat de l'école nationale supérieure d'arts et métiers, Paris, France.
- [42] Hihat Idir (2020) « Amélioration des performances de la commande de puissance d'une centrale éolienne à base d'une MADA» Master Filière : Electrotechnique Option : Commande électrique et Electrotechnique industrielle, Université A. MIRA – Bejaia.
- [43] T. Ghennam (2011), « Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation »; Thèse de Doctorat de l'Ecole Militaire Polytechnique d'Alger, Algérie.
- [44] S. Heier, (1998) « Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems»; Publications John Wiley & Sons, ISBN 0-471-97143-X.
- [45] D. Marin, (2009) « Intégration des éoliennes dans les réseaux électriques insulaires »; Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lille, France.

- [46] S. El Aimani, « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension »; Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lille, France, Décembre 2004.
- [47] 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, Université de Bretagne Occidentale, Juin 2011.
- [48] A. Bechouche, (2013) « Utilisation des techniques avancées pour l'observation et la commande d'une machine asynchrone : application à une éolienne »; Thèse de Doctorat en Electrotechnique, Université de Tizi-Ouzou, Algérie.
- [49] A. Moualdia, « Stratégies de Commande DTC-SVM et DPC appliquées à une MADA utilisée pour la production d'énergie éolienne »; Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Algérie, Juin 2014.
- [50] J. D. Langlois, (2006), "Modélisation et étude des performances des systèmes éoliens hors réseau", L'école de Technologie Supérieurs, Montréal. 2006.