



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Automatique
Automatique et informatique industrielle

Réf. :

Présenté et soutenu par :
KATEB Baha Eddine

Le : septembre 2020

Amélioration des performances d'un system de pompage éolienne

Jury :

Dr.	MESSAOUDI Abdel Hamid	MCA	Université de Biskra	Président
Dr.	GUETTAF Abderrazak	MCA	Université de Biskra	Encadreur
Dr.	ARIF Ali	MCA	Université de Biskra	Examineur

Année universitaire : 2019 - 2020

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Automatique
Option : Automatique et informatique industrielle

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:

MASTER

Thème

**Amélioration des performances d'un système
de pompage éolienne**

Présenté par :

KATEB Baha Eddine

Avis favorable de l'encadreur :

GUETTAF Abdrrazak

Avis favorable du Président du Jury

MESSAOUDI Abdel Hamid

Cachet et signature

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Automatique
Option : Automatique et informatique industrielle

Thème :

**Amélioration des performances d'un système
de pompage éolienne**

Proposé par : **KATEB Baha Eddine**

Dirigé par : **GUETTAF ABDERRAZAK**

RESUMES (Arabe et Anglais et Francais)

الملخص

في هذه المذكرة، قمنا بدراسة النمذجة والتحكم في مولد غير متزامن مرتبط بسلسلة تحويل طاقة الرياح. يربط النظام المقترح من خلال مقوم PWM ويتم التحكم فيه عند الإخراج بواسطة خوارزمية MPPT. النتائج المختلفة المتحصل عليها والتي طبقناها بخوارزميات على برنامج MATLAB / SIMULINK، أدت إلى تحسين أداء النظام المقترح.

Abstract

In this thesis, we study the modeling and the control of an asynchronous generator associated with a wind energy conversion chain. The proposed system delivers through a PWM rectifier controlled at the output by an MPPT algorithm. The results of the various simulations of any the conversion chain, carried out under MATLAB/SIMULINK environment, allowed improvements in the performance of the proposed system.

Résumé

Dans cet mémoire, nous étudions la modélisation et la commande d'une génératrice asynchrone associée à une chaîne de conversion d'énergie éolienne .Le système proposé débite à travers un redresseur MLI commandé en sortie par un algorithme MPPT .Les résultats des différentes simulations de toute la chaîne de conversion, réalisées sous environnement MATLAB/Simulink, ont permis améliorations les performances du système proposé

À mes parents

À toute ma famille

À tous ceux qui me sont chers

Baha Eddine

Remerciements

Avant toute chose, je remercie Dieu le tout puissant de

M'avoir donnée courage, patience et force durant toutes ces années d'étude.

Je remercie vivement Mr A. Guettaf l'Encadreur de ce mémoire qui m'a accordé sa confiance, son aide et sa compréhension.

Je remercie président du jury et les membres de jury examinateurs d'avoir accepté d'évaluer ce travail.

Kateb Baha Eddine

Résumé

Dans cet mémoire, nous étudions la modélisation et la commande d'une génératrice asynchrone associée à une chaîne de conversion d'énergie éolienne .Le système proposé débite à travers un redresseur MLI commandé en sortie par un algorithme MPPT .Les résultats des différentes simulations de toute la chaîne de conversion, réalisées sous environnement MATLAB/Simulink, ont permis améliorations les performances du système proposé.

Mots clés : énergie éolienne, génératrice asynchrone, MPPT, algorithme, redresseur MLI

Abstract

In this thesis, we study the modeling and the control of an asynchronous generator associated with a wind energy conversion chain. The proposed system delivers through a PWM rectifier controlled at the output by an MPPT algorithm. The results of the various simulations of any the conversion chain, carried out under MATLAB/SIMULINK environment, allowed improvements in the performance of the proposed system.

Keywords : wind energy, asynchronous generator, MPPT, algorithm, PWM rectifier

الملخص

في هذه المذكرة، قمنا بدراسة النمذجة والتحكم في مولد غير متزامن مرتبط بسلسلة تحويل طاقة الرياح. يربط النظام المقترح من خلال مقوم PWM ويتم التحكم فيه عند الإخراج بواسطة خوارزمية MPPT. النتائج المختلفة المتحصل عليها والتي طبقناها بخوارزميات على برنامج MATLAB / SIMULINK، أدت إلى تحسين أداء النظام المقترح.

الكلمات المفتاحية: طاقة الرياح، المولد غير المتزامن، MPPT، الخوارزمية، مقوم PWM

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE 1

Chapitre I : Généralité sur les systèmes éoliens

I.1. INTRODUCTION 4

 I.1.1. HISTORIQUE..... 5

I.2. LES SYSTEMES DE CONVERSION D'ENERGIES EOLIENNE 5

 I.2.1. EVALUATION DE L'ENERGIE RENOUVELABLE EN ALGERIE 7

I.3. CAPACITE DES EOLIENNES EN L'AFRIQUE 10

I.4. ENERGIE EOLIENNE EN ALGERIE 11

 I.4.1. CARTE DES VENTS EN ALGERIE 11

 I.4.2. PROGRAMME DES ENERGIES RENOUVELABLES EN ALGERIE 14

I.5. TURBINES EOLIENNES A AXE HORIZONTAL ET VERTICAL..... 16

I.6. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'ENERGIE EOLIENNE 18

 I.6.1. AVANTAGES 18

 I.6.2. INCONVENIENTS..... 18

I.7. MACHINE ASYNCHRONE A CAGE (MAS)..... 19

I.8. MACHINES ASYNCHRONES A DOUBLE ALIMENTATION (MADA)..... 21

I.9. CONCLUSION..... 21

Chapitre II : Modélisation des éléments du système éolien

II.1. INTRODUCTION 23

II.2. MODELE DU VENT 23

II.3. MODELE DE LA TURBINE 23

II.4. MODELE DU MULTIPLICATEUR DE VITESSE..... 26

II.5. MODELISATION DE L'ARBRE DE LA MACHINE	26
II.6. MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE	26
II.6.1. HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES.....	26
II.6.2. MISE EN EQUATIONS DU MODELE DE LA MACHINE ASYNCHRONE	27
II.6.3. ÉQUATIONS GENERALES D'UNE MACHINE ASYNCHRONE	27
II.6.4. TRANSFORMATION DE PARK	30
II.6.5. APPLICATION DE LA TRANSFORMATION DE PARK A LA MACHINE ASYNCHRONE	31
II.6.6. EXPRESSION DU COUPLE ELECTROMAGNETIQUE	31
II.7. MODELES DES CONVERTISSEURS DE PUISSANCE	31
II.7.1. MODELISATION DE L'ONDULEUR.....	31
II.7.2. MODELISATION DE REDRESSEUR	33
II.8. MODELISATION DU BUS CONTINU	34
II.9. MODELE MATHEMATIQUE DU DISPOSITIF D'AUTO-AMORÇAGE.....	35
II.10. CONCLUSION.....	36

Chapitre III : Résultats de simulation

III.1. INTRODUCTION :.....	37
III.2. RESULTATS DE SIMULATION :.....	37
III.2.1. RESULTATS DE SIMULATION DE L'AEROGENERATEUR	38
III.3. CONCLUSION	43
CONCLUSION GENERALE.....	44
BIBLIOGRAPHIQUES	45
ANNEXE	51

Notations et symboles

S	La section de la surface active de la voilure [m ²]
P_{eol}	puissance éolienne [kW]
C_p	Coefficient de puissance de l'éolienne
λ	Vitesse linéaire de la turbine [m/s]
V_v	Vitesse du vent [m/s]
ρ	La masse volumique de l'air [kg/m ³]
s, r	Indices stator et rotor, respectivement
d, q respectivement	Indices pour les composantes de Park directe et quadrature, respectivement
t	Temps [s]
u	Tension [V]
I, i	Courant [A]
i_m	Courant de magnétisation [A]
ψ, ϕ	Flux [Wb]
Ω	Vitesse de rotation mécanique [rd / s]
ω	Vitesse de rotation électrique ($\omega = p\Omega$) [rd / s]
ω_s	Pulsation statorique [rd / s]
ω_r	Pulsation rotorique ou de glissement [rd / s]
S	Opérateur de Laplace.
C_{em}	Couple électromagnétique [Nm]
C_r	Couple mécanique résistant [Nm]
$L_s = L_{aa} - M_{ab}$	inductance propre cyclique statorique [H]

Notations et symboles

$L_r = L_{AA} - M_{AB}$	inductance propre cyclique rotorique [H]
$L_m = \frac{3}{2}M_0$	inductance mutuelle cyclique entre le stator et le rotor [H]
R_r	Résistance rotorique [Ω]
R_s	Résistance statorique [Ω]
f	Coefficient de frottement visqueux [SI] où [Nm.s/rd]
J	Moment d'inertie de l'entraînement [kg.m ²]
P	Nombre de paire de pôles
T_r	Constante de temps rotorique
T_s	Constante de temps statorique
T_e	Période d'échantillonnage [s]
[T]	Matrice de transformation de Park
U_{bus}	Tension de l'étage continu de l'onduleur [V]
U_p	Amplitude de la porteuse [V]
GAS	Générateur Asynchrone auto-excité
MAS	Moteur Asynchrone ou Machine Asynchrone
MLI	Modulation de largeur d'impulsion
PI(D)	Proportionnel Intégral (Dérivée)
IP	Intégral Proportionnel
H_g	hauteur géométrique
λ_1	Coefficient de pertes de charges linéaires.
d	Diamètre de la canalisation.
ξ	Le coefficient des pertes de charges locales dont la valeur change suivant la nature de l'accessoire (vanne, coude ...).
m	le nombre de règle intervenant.

Introduction générale

L'intense industrialisation des dernières décennies est les multiplications des appareils domestiques électrique ont conduit à des besoins planétaire en énergie électrique considérable. Face à cette demande toujours croissante de nos jours, les pays industrialisés ont massivement fait appel aux centrales nucléaires. Cette source d'énergie présente l'avantage indéniable de ne pas engendrer de pollution atmosphérique contrairement au centrale thermique mais le risque d'accident nucléaire le traitement et le fouissement des déchets sont des problèmes bien réels qui rendent cette énergie peu attractive pour la génération de la future [37] .

L'exploitation des énergies renouvelables génère théoriquement peu de polluants : notamment, l'électricité d'origine renouvelable émet très peu de CO₂ notamment lorsqu'on la compare aux énergies fossiles comme le charbon. Pour cette raison, ces énergies sont notamment un vecteur privilégié de la lutte contre le réchauffement climatique. Elles sont aussi considérées comme un facteur de résilience car elles permettent des productions décarbonnées et décentralisées [32].

L'énergie éolienne est une source d'énergie qui dépend du vent. Le soleil chauffe inégalement la Terre, ce qui crée des zones de températures et de pression atmosphérique différentes tout autour du globe. De ces différences de pression naissent des mouvements d'air, appelés vent. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité dans des éoliennes, appelées aussi aérogénérateurs, grâce à la force du vent.

L'énergie éolienne est l'une des sources de production d'électricité permettant de parvenir à moindre coût à la réalisation des objectifs que s'est fixée l'Union Européenne pour 2020 : 20% d'énergies renouvelables (éolienne et autres) dans la consommation globale d'énergie. L'électricité éolienne garantit une sécurité d'approvisionnement face à la variabilité des prix du baril de pétrole. L'énergie éolienne offre la possibilité de réduire les factures d'électricité et peut vous permettre de vous mettre à l'abri des ruptures de courant [26].

Le but de ce travail est de faire une étude d'amélioration d'une génératrice asynchrone à cage dédié à un système éolien. Cette option est justifiée par l'intérêt des chercheurs et des fabricants pour ce type de structure d'éoliennes en raison de son

importance économique et de la dépendance mondiale à l'égard de ce type de sources d'énergie non polluantes et du projet de notre pays, l'Algérie de 2030.

Ce mémoire est organisée en quatre chapitres, comme suit :

- Dans le premier chapitre, une généralité sur le système de conversion d'énergie éolienne est discutée. Puis, les différents types d'éoliennes existant avec leur différentes structures à savoir à axe vertical et à axe horizontal en citant leurs avantages et inconvénients. Ensuite, les statistiques de l'énergie éolienne dans le monde, dans l'Afrique plus précisément dans l'Algérie sont également présentés. Enfin, rappels sur les différents types de génératrices utilisées dans la conversion éolienne.
- Le seconde chapitre est consacré à la modélisation de la génératrice asynchrone dans la référentiel biphasé de Park afin d'obtenir un modèle d'état et de mettre en évidence la structure multivariable et la nature non linéaire de ce type de générateur, Ainsi, la modélisation de redresseur MLI commandé.
- Dans le troisième chapitre consiste les résultats de simulation du système éolien proposé obtenus sous l'environnement MATLAB/SIMULINK. Les performances et stratégie de commande du système.

Enfin, nous clôturons ce travail par une conclusion générale qui portera des perspectives pour la continuité de ce travail dans le futur.

Chapitre I

Généralité sur les

systemes éoliens

I.1. Introduction

La puissance du vent est utilisée depuis 3000 ans. En fait, il a d'abord été utilisé par l'homme comme moyen mécanique pour effectuer des tâches simples, telles que le broyage du grain, pompage de l'eau et coupe du bois [37,38]. Bien plus tard, la nécessité de faire correspondre la puissance de l'éolienne avec la capacité de stockage du réservoir d'eau et les statistiques éoliennes disponibles a entraîné un pompage mécanique à vitesse variable au début des années 1800. À propos, la technologie industrielle naissante utilisait des assiettes plates ou des lattes de bois pour le 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 régions éloignées qui ne peuvent pas être connectées à l'alimentation électrique. En effet, en 1937, l'association américaine en charge de l'électrification des zones rurales ou isolées (la Rural Electrification Association) a réalisé la suppression progressive de ces turbines pour faire place à la génération de courant alternatif à fréquence constante de 60 Hz. La découverte des énergies fossiles a conduit au développement de la technologie des moteurs à carburant au détriment de l'éolien. En fait, cette nouvelle technologie est plus fiable et fournit une puissance constante. Cependant, la crise pétrolière du début des années 70 a ravivé l'intérêt pour la technologie éolienne. Ensuite, diverses méthodes ont été développées pour améliorer les caractéristiques de sortie de l'éolienne. Par conséquent, la tension de sortie et la fréquence de l'éolienne sont devenues constantes.

Ce faisant, le développement d'éoliennes autonomes a non seulement permis de produire de l'énergie domestique individuelle, mais a également impliqué consommateur dans la production d'énergie pour la communauté en injectant l'énergie excédentaire produite par des éoliennes individuelles dans le réseau national. Dans un autre disque, La technologie éolienne s'est considérablement améliorée depuis le début des années 70. En 1989, une éolienne de 300 kW avec un diamètre de rotor de 30 m était déjà développée. Après 10 ans, Une éolienne de 1 500 kW avec un diamètre de rotor de 70 m a été développée [38]. À la fin des années 1990, l'énergie éolienne s'est imposée comme l'une des ressources énergétiques les plus durables importantes. Depuis, le développement de l'éolienne s'est considérablement accru. Actuellement, les éoliennes sont disponibles dans les gammes de capacité 4 et 5 MW. Le concept de la technologie des éoliennes a mûri, mais le défi est de produire une unité qui fonctionne comme une centrale électrique

autonome qui fonctionne sur des turbines qui répondent aux spécifications tels que la fréquence, les tensions, le contenu harmonique, etc. ils peuvent être injectés directement dans le réseau électrique standard. Un autre aspect des éoliennes a été considérablement amélioré. Ce sont les problèmes de vibration. En fait, les premières éoliennes étaient bruyantes aérodynamiquement et mécaniquement. 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.

I.1.1. Historique

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 [20].

Ensuite, des siècles avant les Européens l'homme servait des moulins à vent pour moudre le blé (environ 200000 moulins à vent en Europe vers le milieu du 19ème 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 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 après le décollage 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 [7].

I.2. Les systèmes de conversion d'énergies éolienne

Aujourd'hui, le domaine énergétique est confronté à un triple défi : Comment atténuer l'impact négatif du profil industriel sur l'environnement (climat, éco-équilibre) ?, 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. 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 moulinier le grain et de pomper l'eau [39, 40].

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. L'industrialisation a ensuite entraîné une baisse progressive des éoliennes. Cependant en 1904, l'énergie éolienne fournissait encore 11% de 'énergie industrielle néerlandaise et l'Allemagne disposait de plus de 18000 unités installées [41,42].

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 [42].

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 [39]. 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 [43]. Cette réduction du coût de l'électricité est le résultat de progrès importants de la technologie utilisée par cette industrie [44,45].

Actuellement, l'énergie éolienne est bien implantée parmi les autres sources d'énergie avec une croissance très forte.

I.2.1. Evaluation de l'énergie renouvelable en Algérie

L'année 2015 a été exceptionnelle pour les énergies renouvelables. L'énergie éolienne a connu une autre année record en 2015, avec plus de 63 GW ajoutés – une augmentation de 22% par rapport au marché de 2014 - pour un total mondial d'environ 433 GW. Des difficultés persistent toutefois, en particulier au-delà du secteur électrique. L'année 2015 a également été marquée par plusieurs faits qui ont eu une incidence sur les énergies renouvelables. Il y a notamment eu une baisse spectaculaire des cours mondiaux des combustibles fossiles, une attention très croissante portée au stockage de l'énergie et un accord historique à Paris sur le climat qui a réuni la communauté mondiale.

Les énergies renouvelables sont maintenant reconnues comme des sources d'énergie ordinaires à travers le monde. Leur croissance rapide, en particulier dans le secteur électrique, est le fruit de plusieurs facteurs. Il y a notamment la compétitivité grandissante des technologies d'énergies renouvelables du point de vue des coûts, diverses initiatives politiques ciblées, l'amélioration de l'accès aux financements, l'attention portée à la sécurité énergétique et aux solutions environnementales, la demande croissante en énergie dans les pays à économies en développement et émergentes et la nécessité de disposer de services énergétiques modernes. De nouveaux marchés apparaissent ainsi dans toutes les économies autour des énergies renouvelables centralisées et décentralisées.

L'énergie éolienne a été la première source de production électrique en Europe et aux États-Unis en 2015, et la deuxième en Chine. L'augmentation mondiale de la capacité éolienne de 63 GW constitue un record, la production totale étant d'environ 433 GW (Voir Figure 1.2). Les pays non-OCDE (l'Organisation de Coopération et de Développement Economiques OCDE regroupe principalement les pays européens et américains industrialisés) ont construit la majorité des installations, la Chine occupant la première place.

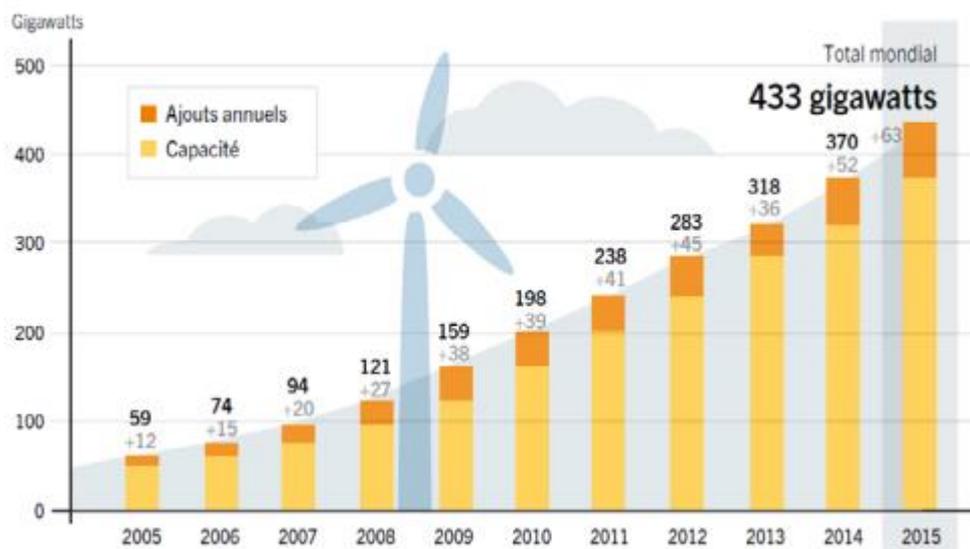


Figure I.1 : Capacité et ajouts annuels mondiaux d'énergie éolienne, 2005–2015.

La plupart des plus grands fabricants de turbines ont battu leurs propres records en termes d'installations annuelles. De nouvelles entreprises ont vu le jour, ou sont en cours d'établissement, à travers le monde pour faire face à la demande croissante. Les difficultés rencontrées incluent l'insuffisance des infrastructures de transmission et la limitation de la production éolienne (en particulier en Chine).

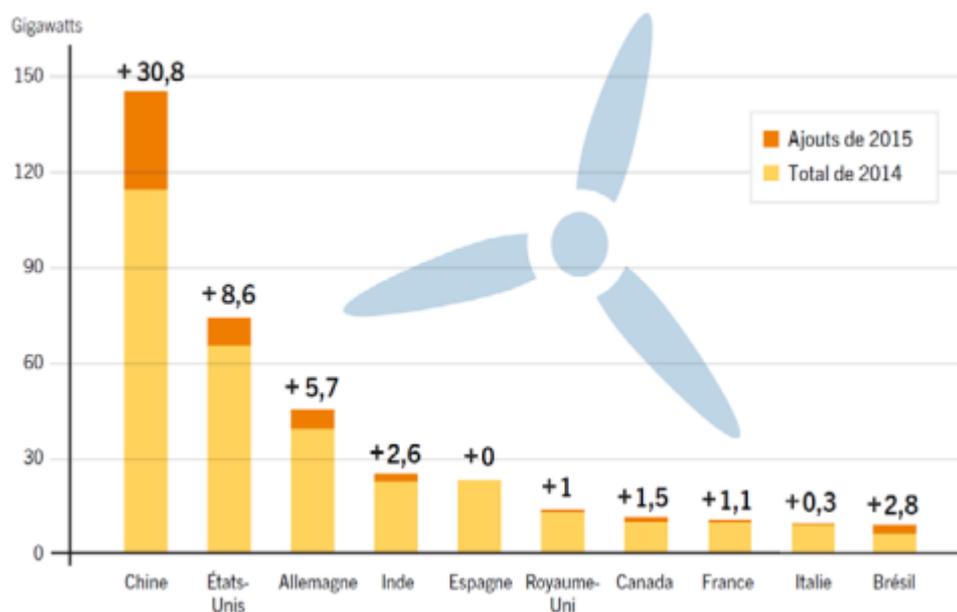


Figure I.2 : Capacité et ajouts d'énergie éolienne des 10 premiers pays, 2015.

Près de 55 GW de capacité éolienne ont été ajoutés en 2016, augmentant ainsi la production totale mondiale d'environ 12% à près de 487 GW (Voir Figure.1.3). À la fin de 2016, plus de 90 pays avaient connu une activité d'énergie éolienne commerciale et 29 pays représentant toutes les régions du monde avaient plus de 1 GW en fonctionnement [9].



Figure 1.3 : Capacité et ajouts annuels mondiaux d'énergie éolienne, 2006–2016.

La Chine a conservé son avance sur le plan de nouvelles installations, suivie par les États-Unis et l'Allemagne, l'Inde passant devant le Brésil pour se classer au quatrième rang. Les autres tops 10 pays pour les ajouts étaient l'Espagne, le Royaume-Uni, la France, le Canada, le Brésil et l'Italie (Voir Figure.1.4). De nouveaux marchés ont continué à s'ouvrir ailleurs en Asie et en Afrique et le Moyen-Orient. En 2016, la Bolivie et la Géorgie ont installé leurs premières éoliennes. A la fin de l'année, les principaux pays qui affichent la meilleure capacité totale d'énergie éolienne par habitant étaient le Danemark, la Suède, l'Allemagne, l'Irlande et le Portugal.

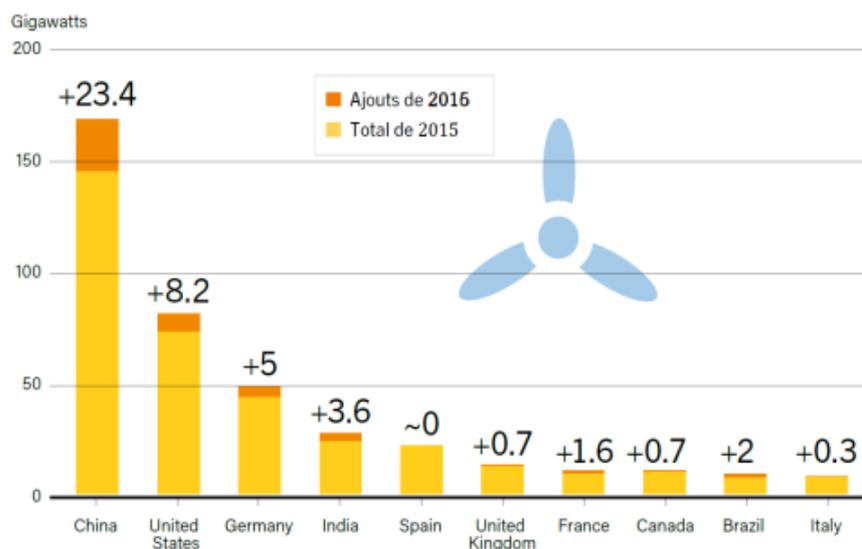


Figure I.4 : Capacité et ajouts d'énergie éolienne des 10 premiers pays, 2016.

I.3. Capacité des éoliennes en l'Afrique

La puissance éolienne installée en Afrique a atteint 4.4 GW à la fin 2015, plus d'un tiers est produit en Afrique du Sud suivie du Maroc avec une capacité de 884.95 MW, le parc éolien de Tarfaya avec 301 MW [46], marque un tournant décisif dans la stratégie énergétique du Maroc. L'Égypte se place au troisième rang en Afrique avec 744.82 MW fin 2015 suivie de Kenya et de l'Éthiopie (Voir le tableau 1.1).

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

Pays	Capacités (MW)
Afrique de sud	1694.45
Maroc	884.93
Egypte	744.80
Kenya	342.51
Ethiopie	324.15
Tunisie	242.30
Tanzanie	50.00
Mauritanie	34.36
Cap Vert	30.20
Libye	20.00
Maurice	10.40
Algérie	10.20

I.4. Energie 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, [47].

I.4.1. Carte des vents en Algérie

L'estimation de l'énergie éolienne disponible dans une région donnée reste l'une des étapes les plus importantes avant une éventuelle implantation d'un parc éolien. Pour cela, il faut d'abord quantifier le gisement énergétique disponible par l'établissement de l'atlas éolien de la région. Le travail le plus récent pour l'établissement des cartes des vents (Atlas des vents) en Algérie est celui de Boudai [47] où il a introduit des vitesses moyennes annuelles données de 24 stations météorologiques situées près des frontières algériennes. La carte annuelle du vent d'Algérie, mise à jour, à une hauteur de 10 m, est présentée à la Figure.1.5.

La carte du vent montre que la vitesse moyenne annuelle du vent varie de 1,2 à 6,3 m/s. La région d'Adrar maintient sa suprématie en termes de vitesse maximale du vent à 6,3 m/s. Suivi par la région de Hassi R'mel avec 6,1 m/s. Le site de Tindouf à l'extrême ouest du pays prend la troisième place avec une vitesse moyenne annuelle ≈ 6 m/s.

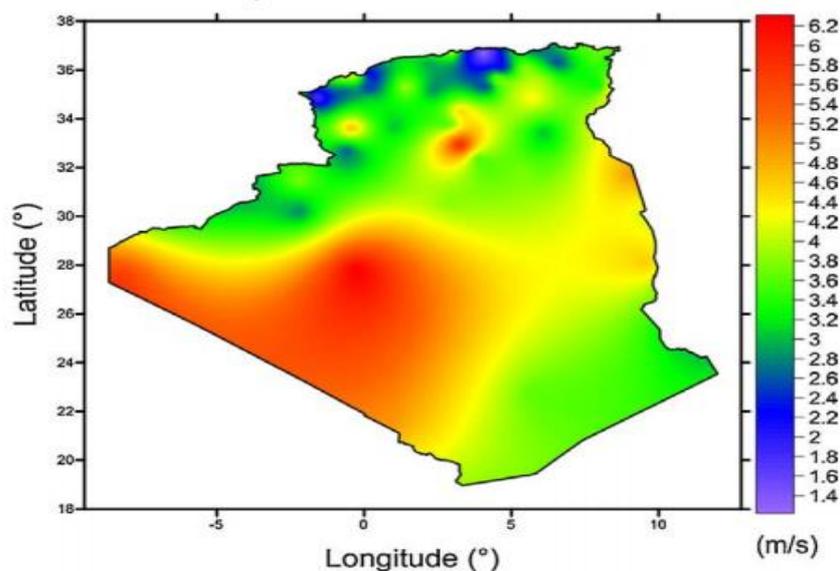


Figure I.5 : Distribution de la vitesse moyenne annuelle du vent en Algérie à 10 m de hauteur (m/s) [48].

En incorporant de nouvelles stations météorologiques dans la carte établie par Boudia [48], la carte actuelle présente la mise à jour des études précédentes (Fig.1.6), 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 4 m/s.
 - • Côte extrême occidentale, avec des frontières marocaines où la vitesse moyenne

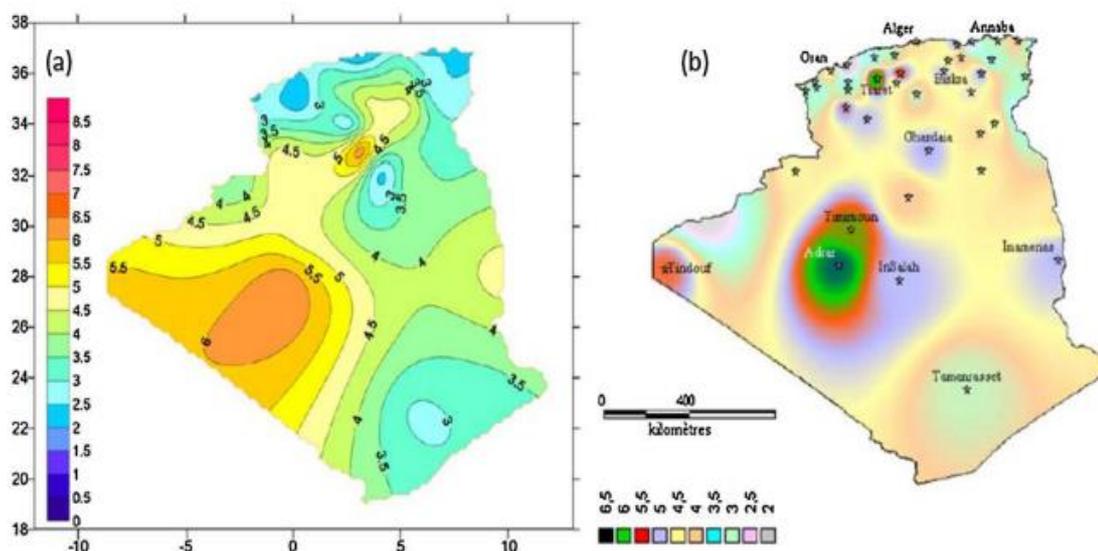


Figure I.6 : Cartes annuelles de la vitesse du vent en Algérie à 10 m de hauteur [49] [50].

Alors que le potentiel du vent dans d'autres régions a été révisé vers le bas, comme suit :

- Tizi-Ouzou et Maghnia au Nord où la vitesse moyenne annuelle du vent est égale

à 1,2 et 1,4 m/s respectivement.

En 2017, Le Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER) a publié un nouvel Atlas éolien de l'Algérie réalisé sur la base de données de vitesse de vent horaires et tri-horaires enregistrées sur 10 années consécutives de 2004 à 2014 dans 74 stations météorologiques de l'Office National de la Météorologie (ONM) et 21 stations supplémentaire des pays limitrophes (Figure.1.7) [51].

Grace à une répartition géographique plus ou moins uniforme entre le Sud et le Nord, le nouvel Atlas Vent à 10 m du sol reflète des changements dans l'estimation de la ressource éolienne comparée aux atlas précédents, particulièrement au Sahara. Ainsi, le site d'In Salah affiche une vitesse moyenne de 6,4m/s ; à côté d'Adrar qui enregistre 6,3 m/s. La wilaya d'Illizi, dotée d'une dizaine de stations, montre des vitesses dépassant les 5 m/s. Le site de Hassi R'Mel affiche des vitesses moyennes assez importantes atteignant 6,5 m/s.

Au Nord, plusieurs microclimats sont aussi détectés d'Ouest en Est. Dans les Hauts-Plateaux à l'extrême Ouest, la région de Mecheria affiche une vitesse moyenne très intéressante de 5,6 m/s.

Un peu plus à l'est, Tiaret et Djelfa présentent des vitesses de 5,6 m/s et 5,1 m/s respectivement. M'Sila apparaît comme une région très intéressante avec une vitesse moyenne annuelle de 5,3 m/s.

Il est à noter que certains sites tels que Ksar-Chellala, Bou Saada et Tébessa affichent un taux considérable de valeurs nulles (> 50 %) ce qui peut considérablement sous-estimer leurs potentiels.

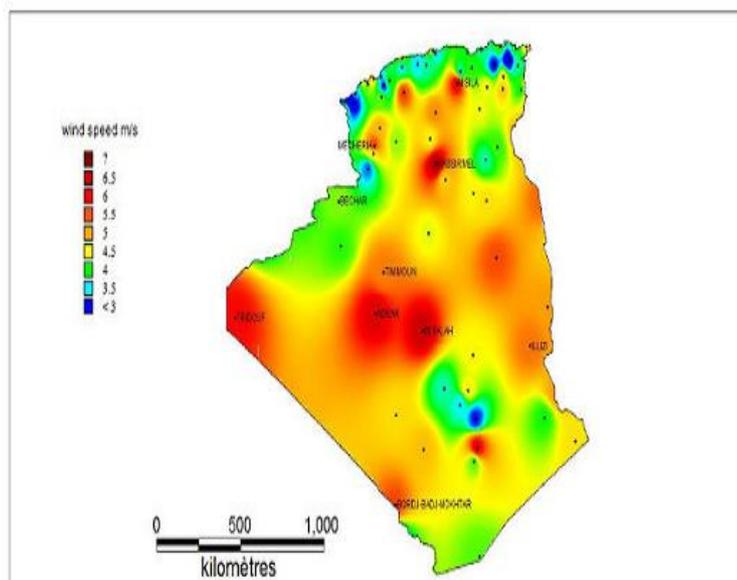


Figure I.7 : Cartes annuelles de la vitesse du vent en Algérie à 10 m de hauteur [49] [50].

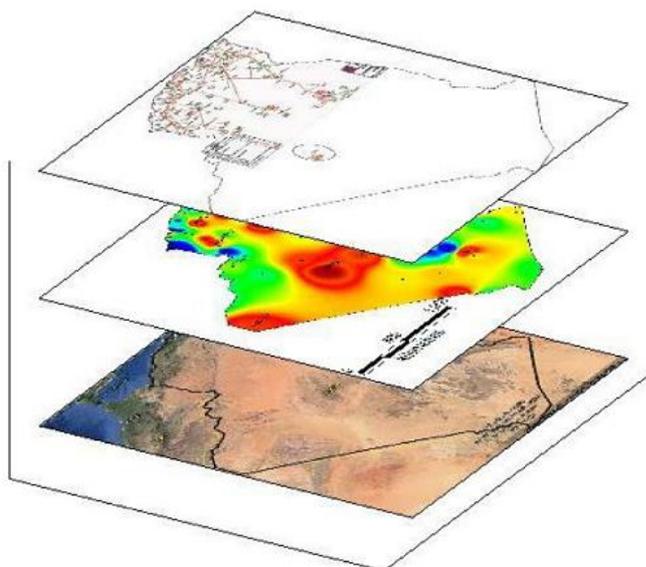


Figure I.8 : Superposition des cartes de vitesse de vent, de la topographie et du réseau électrique pour une optimisation multicritères par la méthode (GIS) [52]

I.4.2. Programme des énergies renouvelables en Algérie

L'énergie éolienne est considérée aujourd'hui comme une source énergétique rentable, les progrès technologiques enregistrés permettent de la rendre concurrentielle vis-à-vis de la production de l'énergie conventionnelle. C'est une source d'énergie non polluante et ayant en outre l'avantage d'être produite au voisinage des agglomérations éliminant par voie de conséquence les pertes de transmission.

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 [13]. 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 [14]. 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.

La production nationale d'électricité a considérablement augmenté. Elle est passée de 63% en 1980 à 97% en 2007. Les indicateurs de base et leur évolution sur la période 1962 à 1999 et de 2000 à 2007 montrent l'énorme effort déployé par le gouvernement dans ce domaine. En effet, au cours de la période 2000-2007, la production d'électricité a connu une forte croissance. Elle est passée de 25 TWh en 2000 à 37 TWh en 2007, ce qui correspond à une augmentation annuelle moyenne de 6%. Cette production n'a été que de 2 TWh au cours des années soixante. En ce qui concerne le coût de l'électricité approuvé en Algérie, l'État algérien pratique les mêmes coûts (coût politique) pour vendre l'énergie électrique et ce, quel que soit le type des systèmes de production (diesel ou gaz) [53].

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 [54].

Le gouvernement algérien garantit le développement des énergies renouvelables pour conserver les réserves de l'énergie fossile qui s'épuise. Ce choix stratégique est motivé par l'énorme potentiel de l'énergie solaire. Cette énergie est l'axe principal du programme dédié au solaire thermique et au photovoltaïque solaire comme partie essentielle. L'énergie solaire devrait atteindre d'ici 2030 plus de 37% de la production nationale d'électricité. Malgré un potentiel relativement faible, ce programme énergétique n'exclut pas le vent, qui représente le deuxième secteur énergétique à développer et dont la part devrait atteindre environ 3% de la production d'électricité en 2030. L'Algérie prévoit également l'installation de certaines unités expérimentales pour tester d'autres formes de technologies d'énergies renouvelables telles que la biomasse, la géothermie et

le dessalement de l'eau saumâtre.

La Figure I.9 représente les différentes phases du programme d'énergie renouvelable et d'énergie fossile en Algérie, défini en 2010, et qui est échelonné comme suit [55] :

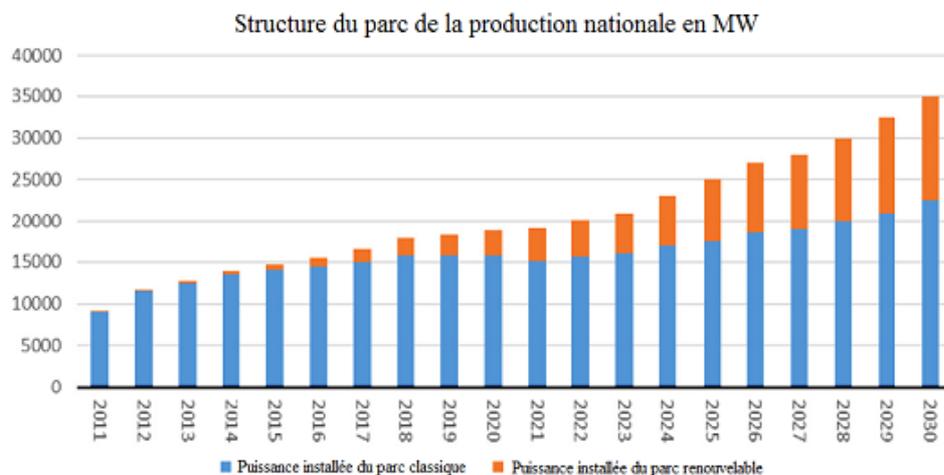


Figure I.9 : Structure du parc de la production nationale en MW [50].

I.5. Turbines éoliennes à axe horizontal et vertical

Les turbines éoliennes peuvent être catégorisées en fonction de l'orientation de leur axe de rotation en "éoliennes à axe horizontal" et "éoliennes à axe vertical" [56] (Figure 1.10). Dans les éoliennes à axe horizontal, l'orientation de l'axe de rotation est parallèle au sol, comme le montre la Figure.1.10.a. 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. Cependant, les "configurations en aval" avec les pales à l'arrière peuvent également être trouvées dans des applications pratiques. Les turbines avec une, deux ou plus de trois pales peuvent également être vues dans les parcs éoliens.

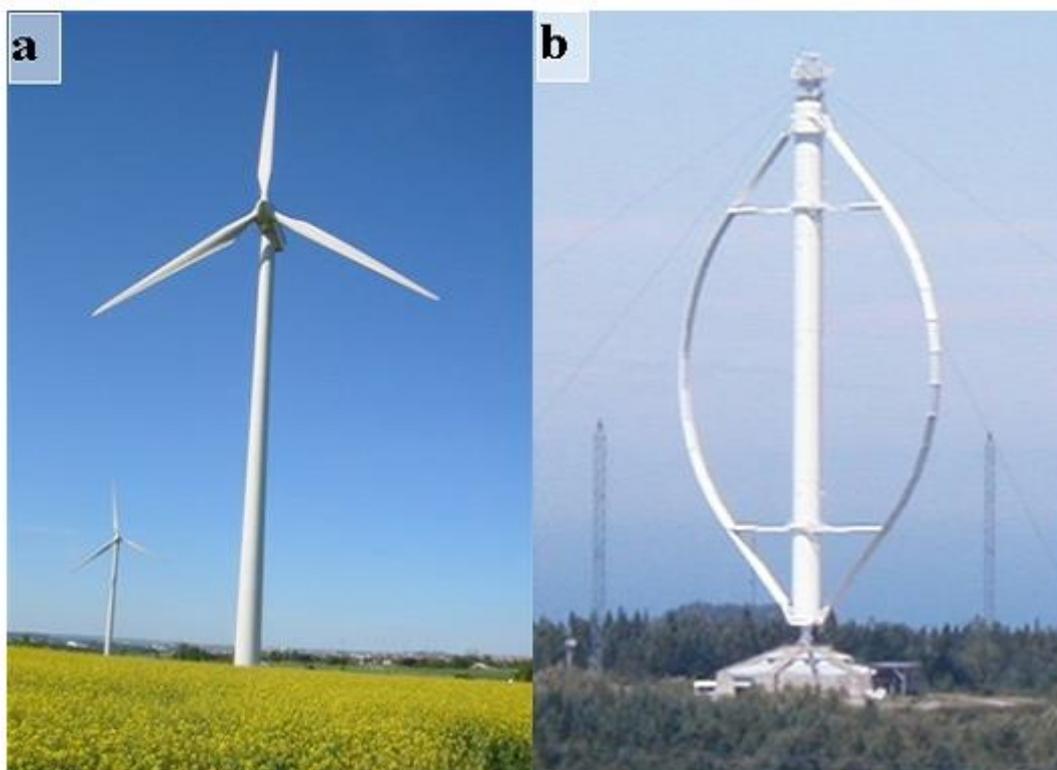


Figure 1.10 : Éoliennes à axe horizontal et vertical. [50].

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, comme le montre la Figure 1.10.b. 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.

Au contraire, l'éolienne à axe horizontal a l'avantage de réduire les coûts d'installation et de faciliter l'entretien grâce à l'installation du générateur et la boîte de vitesses qui se trouve au niveau du sol. Toutefois, son efficacité de conversion de l'énergie éolienne est plus faible en raison des performances aérodynamiques limitées des pales et de la force plus faible du vent exercée sur la partie inférieure des pales. En outre, l'arbre du rotor est long, ce qui le rend propice aux vibrations mécaniques. Tous ces inconvénients entravent l'utilisation pratique à grande échelle des turbines à axe vertical pour la conversion de l'énergie éolienne. En conséquence, les turbines à axe horizontal dominent aujourd'hui le marché éolien, en particulier dans les grands parcs éoliens commerciaux.

I.6. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

Tous systèmes de production d'énergie à ses avantages et ses inconvénients, les avantages et les inconvénients de la conversion éolienne sont :

I.6.1. Avantages

- L'énergie éolienne est une énergie propre et renouvelable qui ne produit ni pollution, ni déchets. De plus, elle rembourse sa dette énergétique, c'est-à-dire l'énergie nécessaire à sa fabrication, en quelques mois.
- Elle ne crée pas de gaz à effet de serre (sauf si l'on considère que ce type d'énergie est intermittent et nécessite l'utilisation de centrales thermiques constamment au ralenti afin d'réguler les variations imprévisibles de la production éolienne).
- Chaque mégawattheure d'électricité produit par l'énergie éolienne aide à réduire de 0.8 à 0.9 tonne les émissions de CO₂ rejetées chaque année par la production d'électricité d'origine thermique.
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs.
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires. Ceux-ci fournissent de l'énergie même lorsque que l'on n'en a pas besoin, entraînant ainsi d'importantes pertes et par conséquent un mauvais rendement énergétique.

I.6.2. Inconvénients

- 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.
- 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.
- Des flashes très puissants doivent être émis toutes les cinq secondes en haut des mats éoliens à la demande de l'aviation civile. Plus le parc éolien est dense plus le risque de collision devient important. Des systèmes lumineux montés sur les pales

peuvent réduire ce danger. Cependant, ces flashes intermittents perturbent la quiétude nocturne de la campagne et sont une pollution lumineuse supplémentaire.

- L'impact sur les oiseaux : certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs. Le nombre d'oiseaux tués par les éoliennes est négligeable par rapport au nombre qui meurt en raison d'autres activités humaines. D'autres études disent que les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux afin que ceux-ci ne se fassent pas attraper par les aéro-turbines.
- 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.

I.7. Machine asynchrone à cage (MAS)

Les génératrices asynchrones sont le premier type utilisable pour la production de l'électricité avec des éoliennes en grande puissance [20]. Elles ont l'avantage d'être standardisées, fabriquées en grande quantité, dans une très grande échelle des puissances et sa fabrication peu coûteuse. Aussi en termes d'entretien, elles sont les moins exigeantes. La connexion directe au réseau de ce type de machine est bien plus douce grâce à la variation du glissement se produisant entre le flux du stator et la vitesse de rotation du rotor.

Un multiplicateur mécanique de vitesse. Le changement de la configuration de bobinage du stator (nombres de pôles) et donc l'utilisation des machines de type Dahlander est une solution parfois utilisée (Figure I.11), mais là encore le rendement est loin d'être optimal sur toute la plage de vent. Une autre possibilité consiste à utiliser un variateur de fréquence, mais cette solution est globalement coûteuse (variation de fréquence et multiplicateur de vitesse) et donc rarement exploitée (Figure I.12). La majorité des applications en éolien (environ 85%) sont donc à vitesse de rotation constante (Figure I.13). Le maintien de cette vitesse fixe, permet de contrôler l'énergie réactive des condensateurs d'auto-amorçage, et ce au détriment du rendement de conversion, contrairement an systèmes fonctionnant à vitesse variable. Ces machines peuvent être

facilement utilisables dans le petit éolien car la vitesse de rotation de pales est importante et l'entraînement direct possible

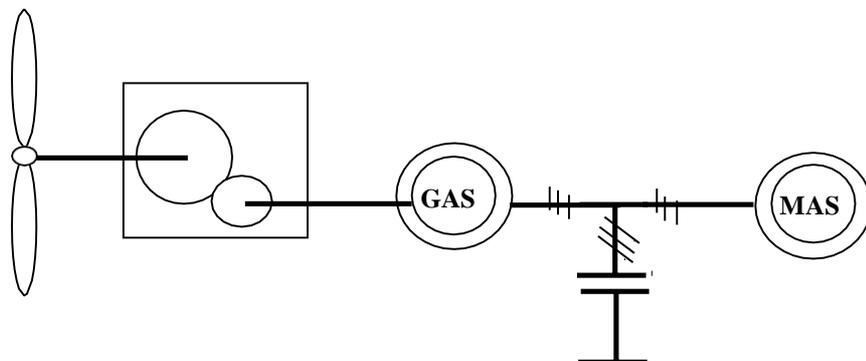


Figure I.11 : Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage (vitesse de rotation fixe).

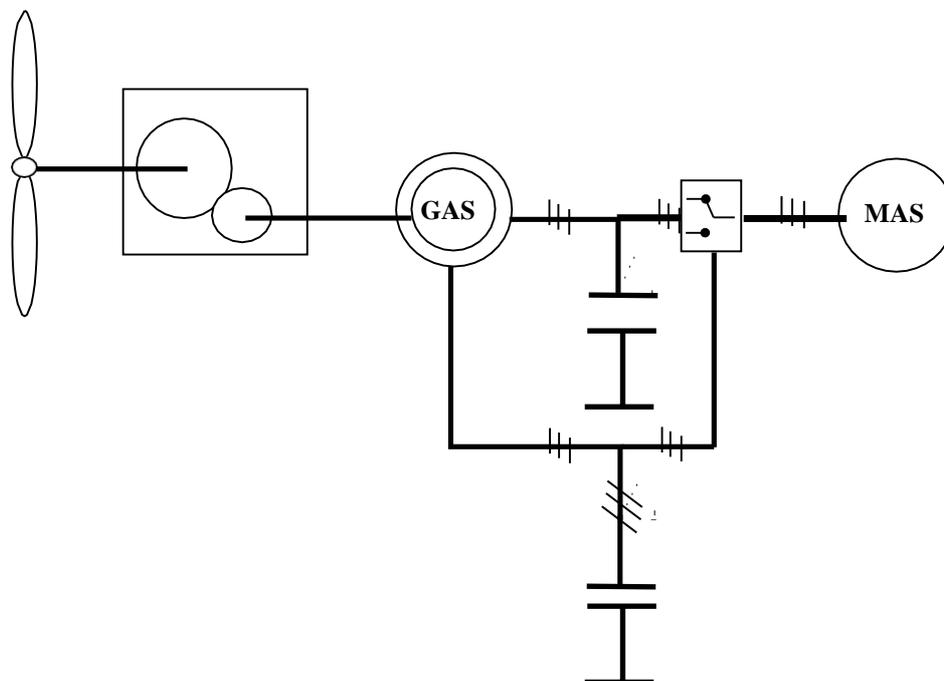


Figure I.12 : Système éolien basée sur la machine asynchrone de type Dahlander à deux vitesses de rotation.

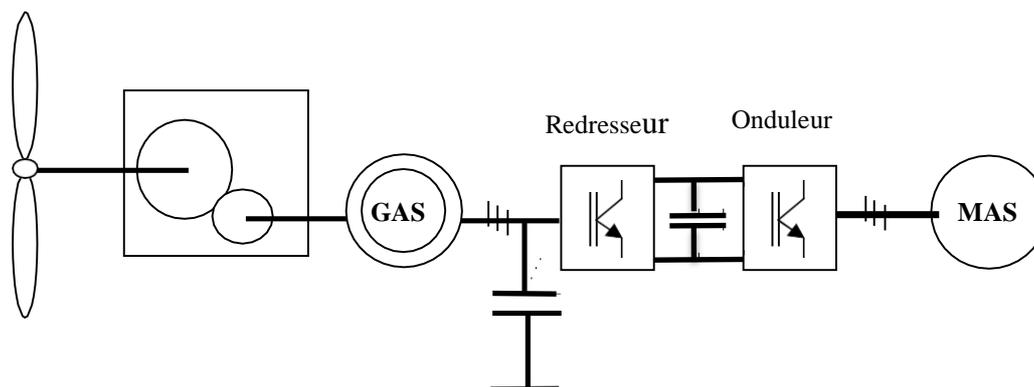


Figure I.13 : Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable

I.8. Machines asynchrones à double alimentation (MADA)

La machine asynchrone à rotor bobiné à double alimentation présente un atout considérable. Son principe est issu de celui de la cascade hypo synchrone : le stator est connecté au réseau possédant une tension et une fréquence fixes, alors que le rotor est relié au réseau à travers un convertisseur de fréquence. Ces machines sont un peu plus complexes que les machines asynchrones à cage avec lesquelles elles ont en commun la nécessité d'un multiplicateur de vitesse, et leur robustesse est légèrement diminuée par la présence du système à bagues et balais, mais le bénéfice du fonctionnement à vitesse variable est un grand avantage. Etant donné que la puissance rotorique transitée est moindre, le coût des convertisseurs s'en trouve réduit en comparaison avec une éolienne à vitesse variable alimentée au stator par des convertisseurs de puissance. C'est la raison principale pour laquelle on trouve cette génératrice pour la production en forte puissance. Une seconde raison est la possibilité de régler la tension au point de connexion où est injectée cette génératrice.

I.9. Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté quelques généralités sur l'énergie éolienne, son historique et son évolution, puis, quelques notions principales au sujet de la technologie éolienne ont été données comme les méthodes de description du gisement éolien, des exemples d'architectures, que sa commence par les différents capteur éolienne (à axe horizontal, vertical) en suite les caractéristiques technologiques des éoliennes à axe horizontal.

Les machines électriques utilisées dans la conversion aérodynamique sont aussi présentées avec quelques spécifications propres liées aux structures d'alimentation

différentes.

Puis on a cité quelques avantages liés à la croissance de l'énergie éolienne et quelques inconvénients liés à l'empêchement de son avancement.



Chapitre II

Modélisation des

éléments du système

éolien

II.1. Introduction

La modélisation des éléments de la structure est une phase primordiale pour l'élaboration des lois de commande. En effet aborder la commande des machines électriques nécessite l'emploi des méthodes de modélisation adaptées à la commande. Aussi, l'établissement des diverses relations qui constituent le système est en vue de la commande de ce dernier, car la conception d'un système de commande en temps réel passe nécessairement par une étape de modélisation. Dans ce chapitre nous ferons la modélisation de la turbine, du multiplicateur, de l'onduleur, du redresseur, du bus continu, ainsi que de MAS [35] [16].

II.2. Modèle du vent

Le vent est la variable d'entrée du système éolien. Sa mesure exacte à la hauteur du moyeu est assez complexe. Cependant, le vent peut être représenté par une grandeur stochastique définie par des paramètres statistiques. La vitesse du vent est généralement représentée par une fonction scalaire qui évolue dans le temps $V = f(t)$.

Elle est modélisée par la somme d'une composante lente et une composante oscillante:

$$V = A + \sum_{n=1}^i a_n \cdot \sin(b_n \cdot \omega_n \cdot t) \quad (\text{II.1})$$

a_n, b_n : Coefficients de fourrier.

II.3. Modèle de la turbine

Considérons une turbine éolienne munie de pales de longueur R entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain G (Figure.II.1)

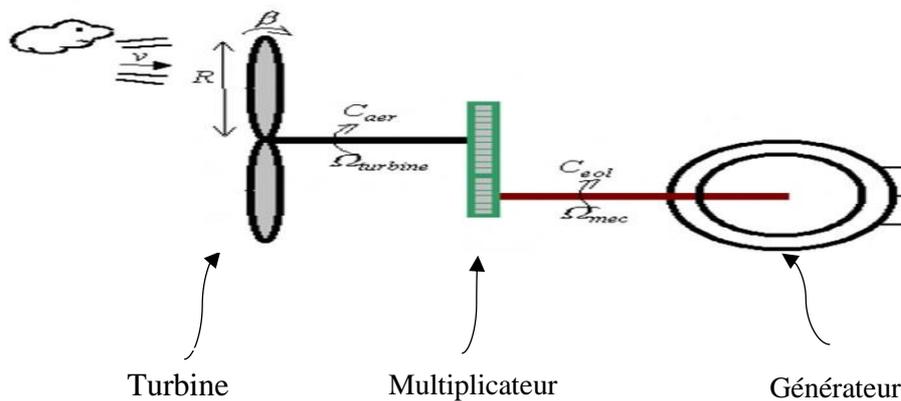


Figure II.1: schéma de la turbine éolienne.

La puissance cinétique du vent est donnée par :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S v^3 \quad (\text{II.2})$$

La puissance P_{aero} captée par la turbine éolienne est alors liée à la puissance P_v par un coefficient, appelé coefficient de puissance, dont l'expression est donnée sous la forme suivante :

$$C_p = \frac{P_{éol}}{\frac{1}{2} \rho S v^3} \quad (\text{II.3})$$

La turbine permet de convertir l'énergie aérodynamique du vent en énergie mécanique.

Son couple aérodynamique C_{aero} est donné par l'expression suivante :

$$C_{éol} = \frac{1}{2 \Omega_t} C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \quad (\text{II.4})$$

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

$$P_{éol} = C_p(\lambda) \cdot P_v = C_p(\lambda) \frac{\rho S v^3}{2} \quad (\text{II.5})$$

- Ω_t Est la vitesse de la turbine.
- ρ est la densité de l'air, $\rho = 1.22 \text{ kg/m}^3$.
- S est l'aire balayée par la turbine, $S = \pi R^2$.
- v est la vitesse du vent.
- C_p est le coefficient qui caractérise le rendement aérodynamique de la turbine.

L'équation analytique de C_p en fonction de λ résultant de l'interpolation est :

$$C_p(\lambda) = -0.2121\lambda^3 + 0.0856\lambda^2 + 0.2539\lambda$$

La figure (II.2) représente le tracé de la caractéristique $C_p(\lambda)$ où apparaît un maximum de 0.15 pour une vitesse réduite de 0,78. Afin d'optimiser la conversion de puissance, il faut donc essayer de conserver cette vitesse réduite, c'est-à-dire modifier la vitesse de rotation lorsque la vitesse du vent varie.

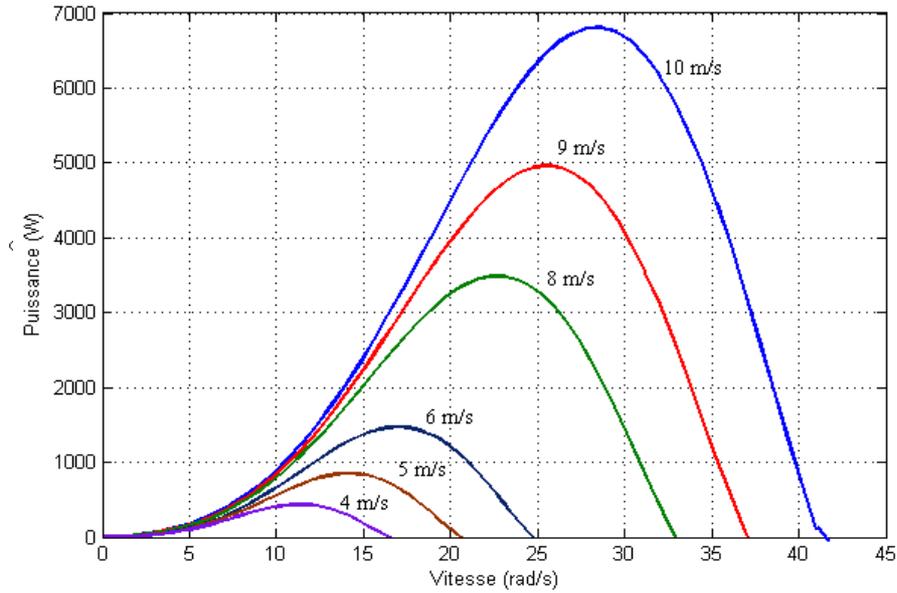


Figure II.4 : Caractéristiques de la puissance aérodynamique $P_{eol}(\Omega)$.

A partir de cette puissance, le couple éolien est donc donné par :

$$C_{eol} = P_{eol} / \Omega$$

En remplaçant la valeur de la puissance par le produit (couple \times vitesse) et en utilisant:

$$C_{eol} = \frac{C_p(\lambda) \times \rho \times R^2 \times H \times V_V^2}{\lambda}$$

Les figures 3 et 4 représentent un réseau de caractéristiques respectivement de la puissance et du couple éoliens en fonction de la vitesse de rotation, le paramètre étant la vitesse du vent.

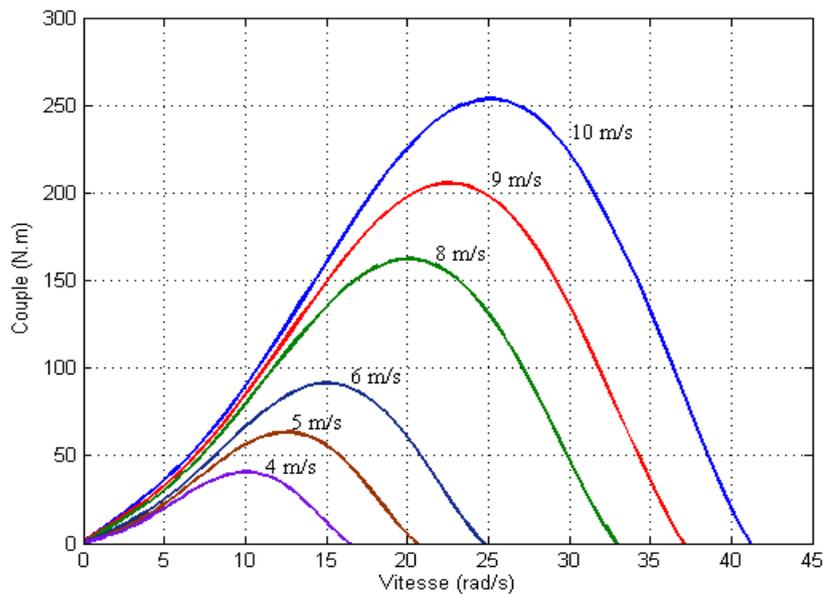


Figure II.3 : Caractéristiques de la couple aérodynamique $C_{eol}(\Omega)$.

II.4. Modèle du multiplicateur de vitesse

Le multiplicateur est la liaison entre la turbine et le générateur. Il est supposé rigide et modélisé par un simple gain. L'élasticité et le frottement sont négligés. Les pertes énergétiques dans cet organe sont considérées nulles. Le multiplicateur adapte la vitesse lente de la turbine à la vitesse de la génératrice. Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par l'équation suivante :

$$\Omega_{Turbine} = \frac{\Omega_{génératrice}}{G} \quad (II.6)$$

Le couple mécanique de la turbine éolienne est divisé par le rapport du multiplicateur pour obtenir le couple mécanique sur l'arbre du générateur.

$$C_{Génératrice} = \frac{C_{Turbine}}{G} \quad (II.7)$$

II.5. Modélisation de l'arbre de la machine

Plusieurs modèles mécaniques pour modéliser l'arbre sont proposés dans la littérature. Nous avons adopté un modèle simplifié qui caractérise le comportement mécanique de la chaîne dans son ensemble [26] [37] [38]. L'équation différentielle qui caractérise le comportement mécanique de l'ensemble turbine - génératrice est donnée par :

$$(J_t + J_m) \cdot \frac{d\Omega_t}{dt} = C_{eol} - C_{em} - (f_m + f_t) \cdot \Omega_t \quad (II.8)$$

II.6. Modélisation de la machine asynchrone

Toute étude concernant la commande d'un processus doit être précédée par une étape de modélisation visant à l'établissement de son modèle. Cette modélisation est une aide intéressante pour élaborer certaines commandes [37] [30]. Le modèle généralement retenu pour la machine asynchrone triphasée repose sur plusieurs hypothèses.

II.6.1. Hypothèses simplificatrices

- Entrefer constant et effet des encoches négligeables,
- Distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer,
- Circuit magnétique non saturé et parfaitement feuilleté,
- Pertes ferromagnétiques négligeables,
- Influence de l'effet de peau et de l'échauffement sur les caractéristiques n'est pas pris en compte.

II.6.2. Mise en équations du modèle de la machine asynchrone

Les enroulements statoriques et rotoriques sont représentés dans le schéma ci-dessous, où les trois bobines rotoriques sont court-circuitées et déphasées de 120°.

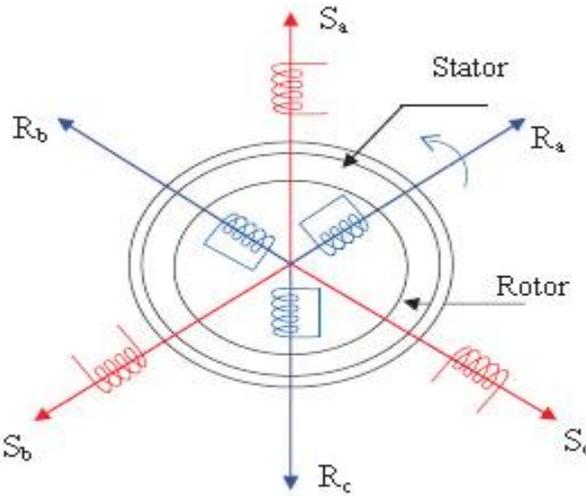


Figure II.3 : Présentation des axes de la machine

II.6.3. Équations générales d'une machine asynchrone

On considère que la machine est alimentée par un système de tensions sinusoïdales triphasés équilibrées (V_{as} , V_{bs} , V_{cs}) de pulsation ($\omega_s = 2\pi f$).

Dans le cadre des hypothèses précédentes et pour une machine équilibrée et montée en étoile on distingue trois types d'équations qui définissent entièrement son comportement à savoir :

- Les équations électriques.
- Les équations magnétiques.
- Les équations mécaniques

• Equations électriques

Les tensions des trois phases statorique et rotorique s'écrivent :

A- Les équations liées au stator

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{as} = R_s i_{as} + \frac{d}{dt} \Phi_{as} \\ V_{bs} = R_s i_{bs} + \frac{d}{dt} \Phi_{bs} \\ V_{cs} = R_s i_{cs} + \frac{d}{dt} \Phi_{cs} \end{array} \right. \quad (\text{II.9})$$

Et sous forme matricielle, on obtient :

$$[V_{abc}]_s = [R_s][i_{abc}]_s + \frac{d}{dt} [\phi_{abc}]_s \quad (\text{II.10})$$

Avec:

$$[V_{abc}]_s = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} \quad [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$$

$$[I_{abc}]_s = \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} \quad [\phi_{abc}]_s = \begin{bmatrix} \phi_{as} \\ \phi_{bs} \\ \phi_{cs} \end{bmatrix}$$

B- Les équations liées au rotor

$$\begin{cases} V_{ar} = R_r i_{ar} + \frac{d}{dt} \phi_{ar} = 0 \\ V_{br} = R_r i_{br} + \frac{d}{dt} \phi_{br} = 0 \\ V_{cr} = R_r i_{cr} + \frac{d}{dt} \phi_{cr} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.11})$$

$$[V_{abc}]_r = [R_r][i_{abc}]_r + \frac{d}{dt} [\phi_{abc}]_r = [0] \quad (\text{II.12})$$

Avec:

$$[V_{abc}]_r = \begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

$$[I_{abc}]_r = \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} \quad [\phi_{abc}]_r = \begin{bmatrix} \phi_{ar} \\ \phi_{br} \\ \phi_{cr} \end{bmatrix}$$

Tel que :

$$R_{as} = R_{bs} = R_{cs} = R_s$$

$$R_{ar} = R_{br} = R_{cr} = R_r$$

R_s : Résistance propre d'une phase statorique.

R_r : Résistance propre d'une phase rotorique.

• Equations magnétiques

L'entrefer étant constant, le stator et le rotor étant triphasés et de construction symétrique, les inductances propres et mutuelles ente phases d'un même enroulement sont constantes et égaux Les équations magnétiques s'écrivent alors de la même manière

Suivante :

$$\begin{bmatrix} \phi_s \\ \phi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

Tel que : $[M_{sr}] = [M_{rs}]^t$

$$[\phi_s] = \begin{bmatrix} \phi_{as} \\ \phi_{bs} \\ \phi_{cs} \end{bmatrix} \quad [\phi_r] = \begin{bmatrix} \phi_{ar} \\ \phi_{br} \\ \phi_{cr} \end{bmatrix}$$

$$[I_s] = \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} \quad [I_r] = \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix}$$

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix}$$

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t = \begin{bmatrix} \cos \theta_{sr} & \cos \langle \theta_{sr} + \frac{2\pi}{3} \rangle & \cos \langle \theta_{sr} - \frac{2\pi}{3} \rangle \\ \cos \langle \theta_{sr} - \frac{2\pi}{3} \rangle & \cos \theta_{sr} & \cos \langle \theta_{sr} + \frac{2\pi}{3} \rangle \\ \cos \langle \theta_{sr} + \frac{2\pi}{3} \rangle & \cos \langle \theta_{sr} - \frac{2\pi}{3} \rangle & \cos \theta_{sr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

La dernière matrice est nommée inductance mutuelle entre le rotor et le stator.

M_{sr} : représente la valeur maximale de l'inductance mutuelle ente une bobine statorique et une bobine rotorique lorsque celles-ci sont en retard l'une de l'autre.

Finalement :

$$[V_{abc}]_s = [R_s][i_{abc}] + \frac{d}{dt} ([L_s][i_{abc}]_s + [M_{sr}][i_{abc}]_r) \quad (\text{II.15})$$

$$[V_{abc}]_r = [R_r][i_{abc}] + \frac{d}{dt} ([L_r][i_{abc}]_r + [M_{rs}][i_{abc}]_s) \quad (\text{II.16})$$

L_s : Inductance propre d'une phase statorique.

L_r : Inductance propre d'une phase rotorique.

M_s : Inductance mutuelle entre deux phases de stator.

M_r : Inductance mutuelle entre deux phases de rotor.

θ_{sr} : Écart angulaire ente une phase statorique et la phase rotorique correspondante.

• Equation mécanique

L'étude des caractéristiques de la machine asynchrone fait introduire des variations non seulement des paramètres électriques (tension, courant, flux) mais aussi des paramètres mécaniques (couple, vitesse) :

$$\frac{d\Omega_r}{dt} = \frac{1}{J_m} (C_{em} - C_r - f_m \Omega_r) \quad (\text{II.17})$$

J_m : moment d'inertie du rotor et des parties tournantes de la machine.

f_m : coefficient du frottement visqueux.

C_{em} : couple électromagnétique.

C_r : couple de charge.

Ω_r : vitesse rotorique du moteur.

II.6.4. Transformation de Park

L'objectif primordial de la transformée de Park est rendre le système (modèle de la machine) linéaire. On utilise alors cette transformation mathématique qui permet de décrire le comportement de la machine à l'aide d'équations différentielles à coefficients constants. Elle consiste à faire des projections sur deux axes orthogonaux de toutes les grandeurs du système. La condition qui permet de remplacer la machine triphasée par son modèle biphasé est sa symétrie [38] [31].

La transformée de Park est définie comme la substitution de trois enroulements immobiles, dont les axes magnétiques (OA OB OC) sont décalés dans l'espace de 120° et alimentés par un système de courant triphasé, par deux enroulements orthogonaux ($O_d O_q$), mobiles et alimentés par des courants constants. Dans les deux cas de figure on aura un champ magnétique tournant [37] [32].

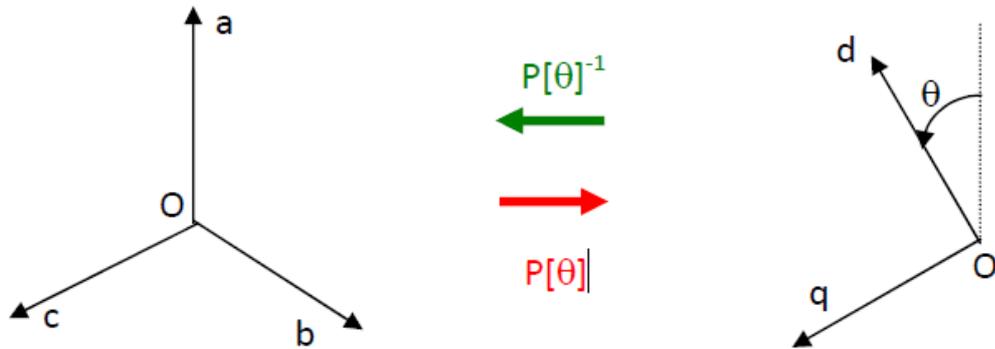


Figure II.4 : Passage du système ABC au système dqo

Les matrices de Park et son inverse sont les suivantes :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

II.6.5. Application de la transformation de Park à la machine asynchrone

Dans ces conditions les différentes équations deviennent comme suit :

- **Equations électriques**

Le modèle mathématique exprimé dans le référentiel (d, q) tournant à la vitesse de synchronisme ω_s est :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d}{dt} \phi_{ds} - \omega_s \cdot \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d}{dt} \phi_{qs} + \omega_s \cdot \phi_{ds} \\ 0 = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d}{dt} \phi_{dr} - \omega_r \cdot \phi_{qs} \\ 0 = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d}{dt} \phi_{qr} + \omega_s \cdot \phi_{qs} \end{array} \right. \quad (\text{II.20})$$

$$\left. \begin{array}{l} V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d}{dt} \phi_{qs} + \omega_s \cdot \phi_{ds} \\ 0 = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d}{dt} \phi_{dr} - \omega_r \cdot \phi_{qs} \end{array} \right\} \quad (\text{II.21})$$

$$\left. \begin{array}{l} 0 = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d}{dt} \phi_{dr} - \omega_r \cdot \phi_{qs} \\ 0 = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d}{dt} \phi_{qr} + \omega_s \cdot \phi_{qs} \end{array} \right\} \quad (\text{II.22})$$

$$\left. \begin{array}{l} 0 = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d}{dt} \phi_{qr} + \omega_s \cdot \phi_{qs} \end{array} \right\} \quad (\text{II.23})$$

- **Equations magnétiques**

Les flux couplés d'axe (d, q) sont donnés par :

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + M_{sr} \cdot i_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + M_{sr} \cdot i_{qr} \\ \phi_{dr} = L_r \cdot i_{dr} + M_{sr} \cdot i_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r \cdot i_{qr} + M_{sr} \cdot i_{qs} \end{array} \right. \quad (\text{II.24})$$

$$\left. \begin{array}{l} \phi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + M_{sr} \cdot i_{qr} \\ \phi_{dr} = L_r \cdot i_{dr} + M_{sr} \cdot i_{ds} \end{array} \right\} \quad (\text{II.25})$$

$$\left. \begin{array}{l} \phi_{dr} = L_r \cdot i_{dr} + M_{sr} \cdot i_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r \cdot i_{qr} + M_{sr} \cdot i_{qs} \end{array} \right\} \quad (\text{II.26})$$

$$\left. \begin{array}{l} \phi_{qr} = L_r \cdot i_{qr} + M_{sr} \cdot i_{qs} \end{array} \right\} \quad (\text{II.27})$$

II.6.6. Expression du couple électromagnétique

L'expression scalaire du couple électromagnétique est la suivante :

$$C_{em} = p^* (\phi_{ds} \cdot i_{qs} - \phi_{qs} \cdot i_{ds}) \quad (\text{II.28})$$

II.7. Modèles des convertisseurs de puissance

II.7.1. Modélisation de l'onduleur

Dans cette étude on considère le cas idéal d'un onduleur triphasé à deux niveaux de tension qui est représenté par des interrupteurs parfaits à commutation instantanée.

L'onduleur considéré comme une source de tension parfaite présente une impédance interne négligeable. A partir du schéma de l'onduleur triphasé présenté sur la figure (II.5), on développera les différentes équations qui modélisent le fonctionnement de ce dernier

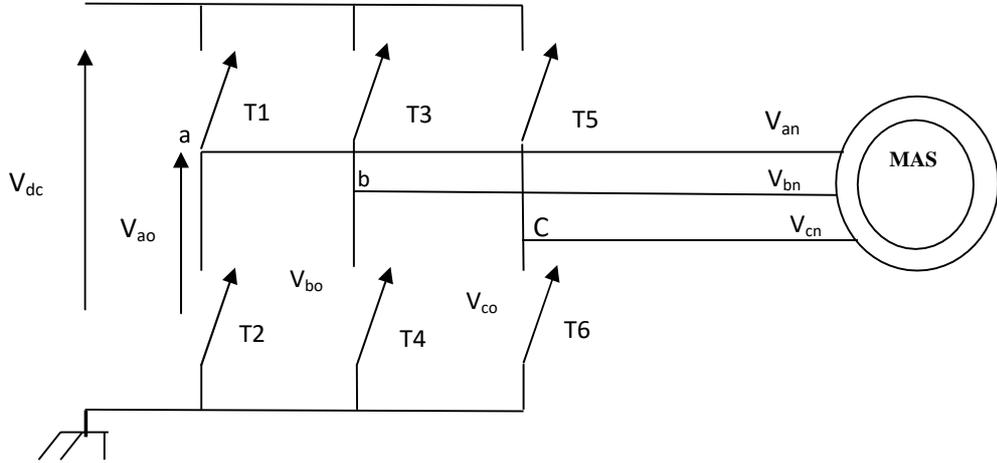


Figure II.5 : Circuit de l'onduleur relié à la machine.

Nous supposons que les interrupteurs sont idéaux et la charge triphasée est équilibrée couplée en étoile avec neutre isolé :

V_{ao} , V_{bo} , V_{co} sont à l'entrée de l'onduleur (continues). On a pris le point « o » comme référence pour ces dernières tensions.

V_{an} , V_{bn} , V_{cn} sont les tensions de phase de la charge, ou de sortie de l'onduleur. Donc les tensions à la sortie de l'onduleur sont :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.29})$$

Si est l'état de l'interrupteur T_i tel que :

$$\begin{cases} S_i = 1 & T_i \text{ fermé} \\ S_i = 0 & T_i \text{ ouvert} \end{cases}$$

Le courant modulé par l'onduleur est donné par :

$$i_{dc} = S_1 \cdot i_{ach} + S_2 \cdot i_{bch} + S_3 \cdot i_{cch} \quad (\text{II.30})$$

II.7.2. Modélisation de redresseur

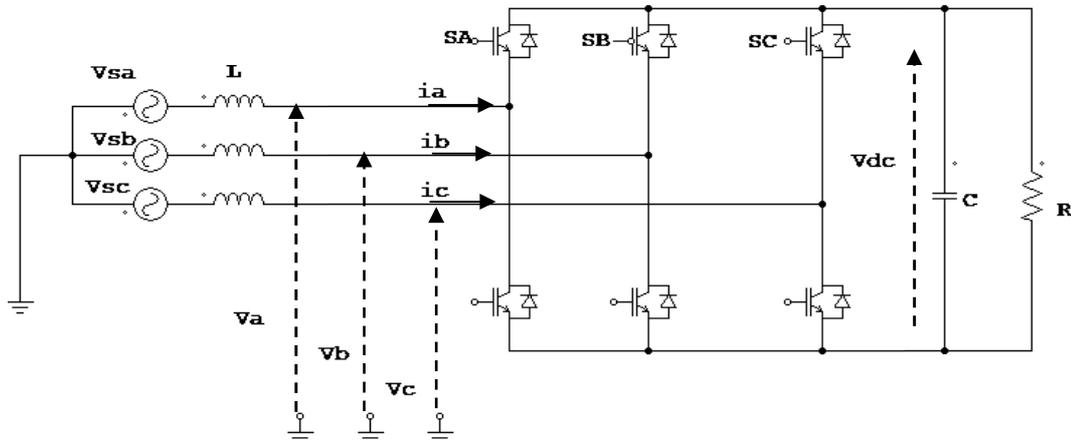


Figure II.6 : Circuit du redresseur MLI.

La réversibilité de l'onduleur de tension à deux niveaux lui permet de fonctionner en redresseur de courant.

Le pont redresseur est constitué de trois bras avec deux transistors bipolaires antiparallèles avec des diodes (figure II.5). Ces bras sont présentés comme des interrupteurs pouvant être commandés en ouverture '1' et en fermeture '0' la tension redressée U_{dc} est en fonction des états de ces interrupteurs.

Pour l'étude de l'ensemble (génératrice-redresseur- charge et onduleur), on s'intéressera uniquement au comportement dynamique des variables électriques et mécaniques de la machine. Afin de faciliter la modélisation et réduire le temps de simulation, on modélise le redresseur par un ensemble d'interrupteurs idéaux : c'est-à-dire résistance nulle à l'état passant, résistance infinie à l'état bloqué, réaction instantanée aux signaux de commande [38] [37].

Pour le modèle dynamique du système, on va diviser l'étude du convertisseur en trois parties : le coté alternatif, la partie discontinue composée par les interrupteurs et le coté continu. Dans ce contexte, la fonction des interrupteurs est d'établir une liaison entre le coté alternatif et le bus continu.

La figure (II.5) donne le schéma de principe du redresseur de tension triphasé alimentant le bus continu. Ce bus est entièrement géré par le redresseur, la valeur de la capacité de filtrage doit être suffisante afin d'avoir une tension stable et fixe quel que soit le fonctionnement de la génératrice asynchrone [3] [33] [34].

Les équations décrivant le coté alternatif sont données par :

$$\begin{bmatrix} V_{SA} \\ V_{SB} \\ V_{SC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.31})$$

A l'entrée du redresseur, les tensions composées sont données par :

$$\begin{cases} U_{AB} = V_A - V_B \\ U_{BC} = V_A - V_C \\ U_{CA} = V_C - V_A \end{cases} \quad (\text{II.32})$$

La matrice de connexion du redresseur est donnée par l'équation matricielle suivante:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} V_{dc} \begin{bmatrix} -2 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.33})$$

$$i_{dc} = S_A i_a + S_B i_b + S_C i_c \quad (\text{II.34})$$

Avec :

V_{dc} : Tension redressée.

i_{dc} : Courant redressée.

S_A, S_B, S_C : Fonctions logiques correspondant à l'état de l'interrupteur.

II.8. Modélisation du bus continu

Le bus continu étant la partie continue entre le redresseur et l'onduleur permettant le découplage de la fréquence de la source et celle de la charge (Figure II.7).

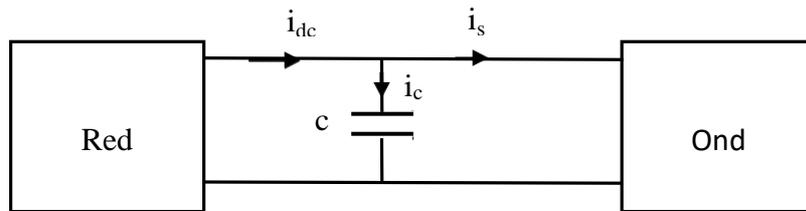


Figure II.7 : Schéma simple du circuit du bus continu.

L'évolution temporelle de la tension du bus continu est obtenue à partir de l'intégration du courant capacitif i_c :

$$\frac{du_{dc}(t)}{dt} = \frac{1}{c} \cdot i_c(t) \quad (\text{II.35})$$

Le courant du condensateur est issu d'un nœud où circulent deux courants modulés par chaque convertisseur :

$$i_c = i_{dc} - i_s \quad (\text{II.36})$$

On a également :

$$V_{dc} = \int \frac{du_{dc}}{dt} + u_{dc}(t_0) \quad (\text{II.37})$$

Où $u_{dc}(t_0)$ est la valeur de la tension à l'instant initial t_0 .

II.9. Modèle mathématique du dispositif d'auto-amorçage

Le système ne peut s'amorcer seul puisqu'à l'instant de la mise sous tension, aucune énergie réactive n'est disponible. On utilise alors la réversibilité du convertisseur en connectant une batterie du côté continu qui fournit le réactif durant la phase d'amorçage. Une diode découple la batterie du redresseur dès que la tension générée en sortie du redresseur est supérieure à celle côté batterie [5] [10] [35].

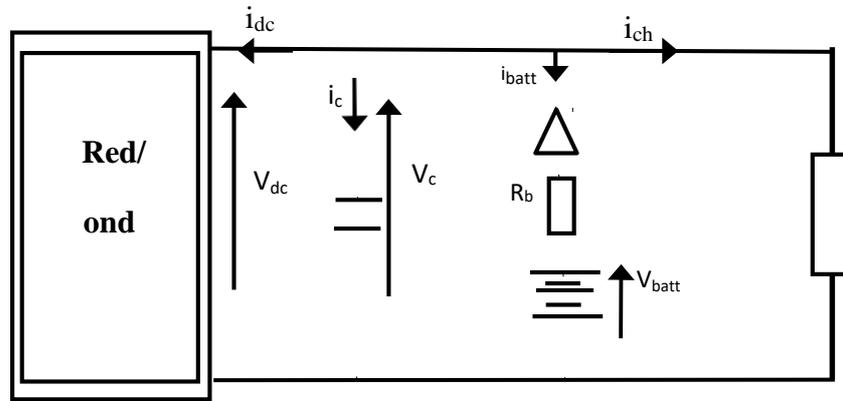


Figure II.7 : Auto-amorçage par un convertisseur à MLI.

Outre le modèle de la machine et celui du redresseur à MLI supposé composé d'interrupteurs parfaits, il faut introduire les équations du circuit électrique à la sortie du redresseur. Deux cas de figure sont à considérer :

-Lorsque $V_{dc} < V_{batt}$ la diode est passante, on peut écrire les équations suivantes :

$$i_{dc} = i_c + i_{batt} + i_{ch} \quad (\text{II.38})$$

$$\implies i_{dc} = \frac{V_{batt} - V_{dc}}{R_b} - C \frac{dV_{dc}}{dt} - \frac{V_{dc}}{R_{ch}} \quad (\text{II.39})$$

$$\implies \frac{dV_{dc}}{dt} = -\frac{1}{C} \left[i_{dc} + V_{dc} \left(\frac{1}{R_{ch}} + \frac{1}{R_b} \right) - \frac{V_{batt}}{R_b} \right] \quad (\text{II.40})$$

Par conséquent, la tension redressée V_{dc} est donnée par la relation suivante :

$$V_{dc} = \int -\frac{1}{C} \left[i_{dc} + V_{dc} \left(\frac{1}{R_{ch}} + \frac{1}{R_b} \right) - \frac{V_{batt}}{R_b} \right] dt \quad (\text{II.41})$$

-Lorsque $V_{dc} > V_{batt}$ la diode se bloque :

$$i_{dc} = -i_c - i_{ch} \quad (\text{II.42})$$

$$\implies i_{dc} = -C \frac{dV_{dc}}{dt} - \frac{V_{dc}}{R_{ch}} \quad (\text{II.43})$$

$$\implies \frac{dV_{dc}}{dt} = -\frac{1}{C} \left[i_{dc} + \frac{V_{dc}}{R_{ch}} \right] \quad (\text{II.44})$$

Dans ce cas, la tension redressée V_{dc} est donnée par la relation suivante :

$$V_{dc} = \int -\frac{1}{C} \left[i_{dc} + \frac{V_{dc}}{R_{ch}} \right] \quad (\text{II.45})$$

Avec :

R_{ch} : Représente la résistance vue du côté continu.

R_b : La résistance interne de la batterie.

V_{batt} : Tension aux bornes de la batterie.

V_{dc} : Tension redressée.

i_{dc} : Courant redressé.

i_c : Courant dans la capacité.

i_{ch} : Courant dans la charge résistive.

II.10. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents composants du système d'éolien, aussi leur modélisation, afin de faciliter l'accès à la simulation du système qui se fera dans les chapitres suivants. Finalement nous avons simulé la MAS alimentée par une source (220/380 v).

Chapitre III
Résultats de
simulation

III.1. Introduction :

Le fonctionnement optimal du système éolien proposé, faisait l'objet du chapitre précédent. Ce système a été simulé sous l'environnement MATLAB/SIMULINK, et les stratégies de commande introduites précédemment ont été testées sous un profil de vent bien choisi.

III.2. Résultats de simulation :

Afin d'assurer un fonctionnement optimal du générateur éolien, il est indispensable d'imposer au système un fonctionnement qui permet de fonctionner en maximum de puissance que peut offrir la vitesse du vent disponible. En raison de la variation de la vitesse du vent, la courbe de puissance de l'éolienne change, cela entraîne le changement du point de fonctionnement du générateur. Ce point se trouvera décalé du point correspondant au point de puissance maximale. Si le générateur continue à fonctionner à vitesse fixe, cela entraînera une dégradation du rendement du système de conversion. Pour garder un fonctionnement optimal du système, une stratégie de commande est utilisée pour poursuivre le point de fonctionnement de la puissance maximale dite MPPT basée sur un fonctionnement à vitesse variable (figure III.1).

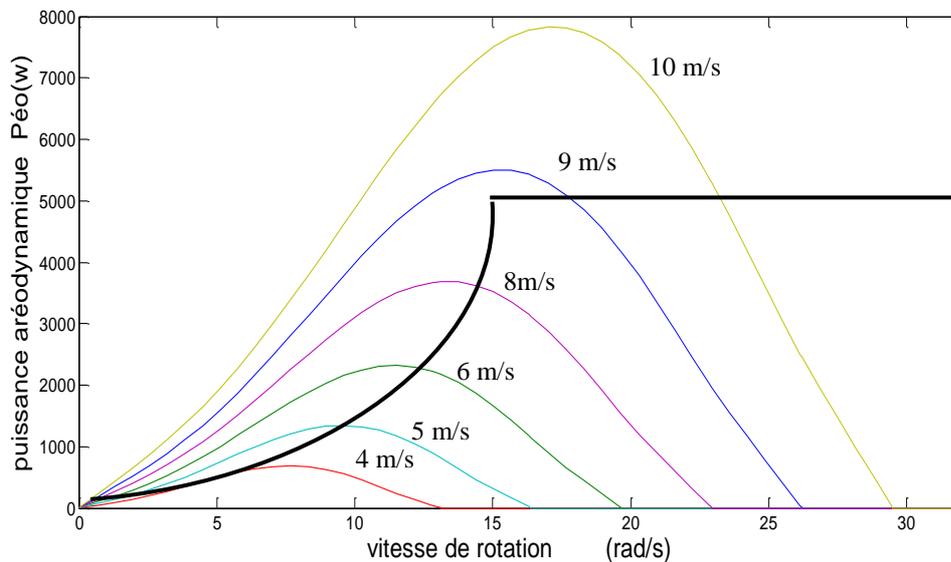


Figure III.1 Courbe puissance-vitesse de la turbine éolienne

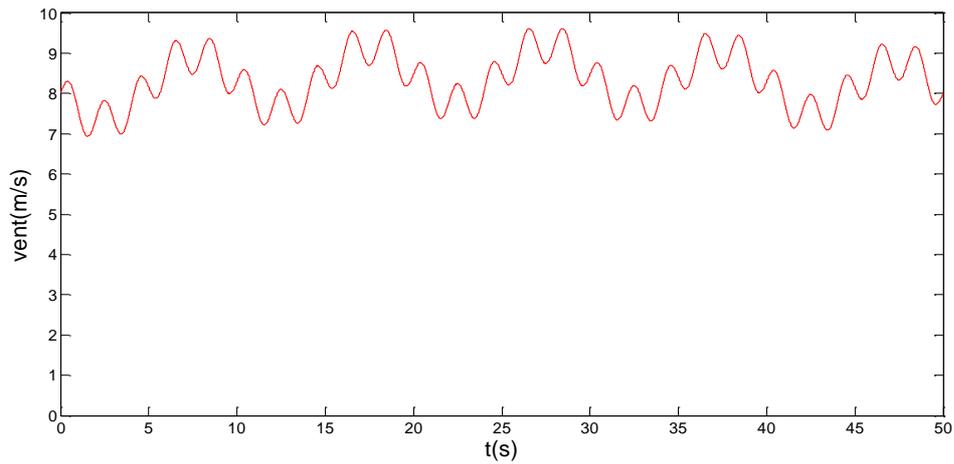


Figure III.2 : Profile de vent

III.2.1. Résultats de simulation de l'aérogénérateur

Le fonctionnement de l'ensemble turbine-GAS est commandé vectoriellement en couple. Le courant d'axe d (i_{sd-ref}) est déterminé à partir de la régulation floue du flux rotorique. Le courant d'axe q (i_{sq-ref}) est déterminé à partir du couple de référence issu de l'algorithme MPPT. La figure III.3 donne la vitesse de rotation de la turbine éolienne optimisée par le dispositif MPPT,

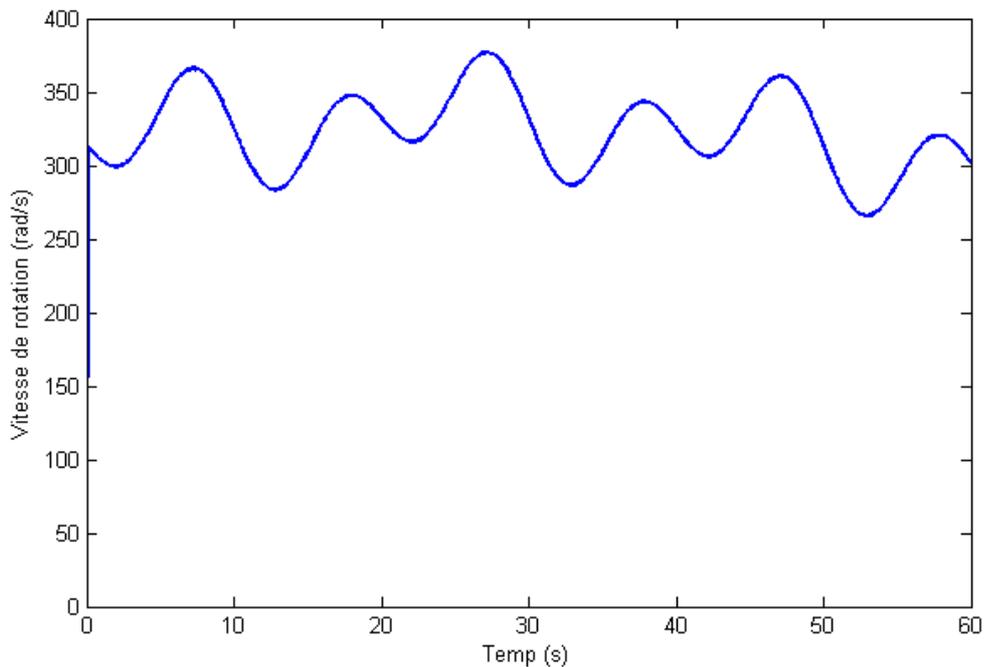


Figure III.2 : Vitesse de rotation issue de l'MPPT

La vitesse de rotation de la turbine éolienne détermine le point de fonctionnement par rapport au point de puissance maximale. La vitesse issue de l'MPPT se traduit alors par une perte en puissance présentée sur la figure III.3. Et on peut être améliorée à l'augmentation de sa taille. La courbe de puissance optimale calculée à l'aide de l'expression (IV.1) et la courbe de puissance maximisée correspondant à la vitesse issue de l'MPPT.

Cette dernière montre clairement fonctionnement de l'aérogénérateur. L'allure de puissance suit parfaitement l'allure du vent, où l'algorithme MPPT permet une extraction presque maximale de la puissance aérodynamique ($C_p = C_{pmax}$). La figure III.4 illustre l'évolution du couple électromagnétique de la génératrice asynchrone. On peut clairement remarquer que le couple électromagnétique varie autour de sa référence issue du régulateur IP. La figure III.5 montre l'évolution du coefficient de puissance C_p . L'algorithme de commande proposé à permis une permutation souple le coefficient de puissance C_p est maintenue à sa valeur maximale (0.49) et décroissance de la valeur C_p , issu du contrôle du courant en quadrature I_{qs} de la GAS.

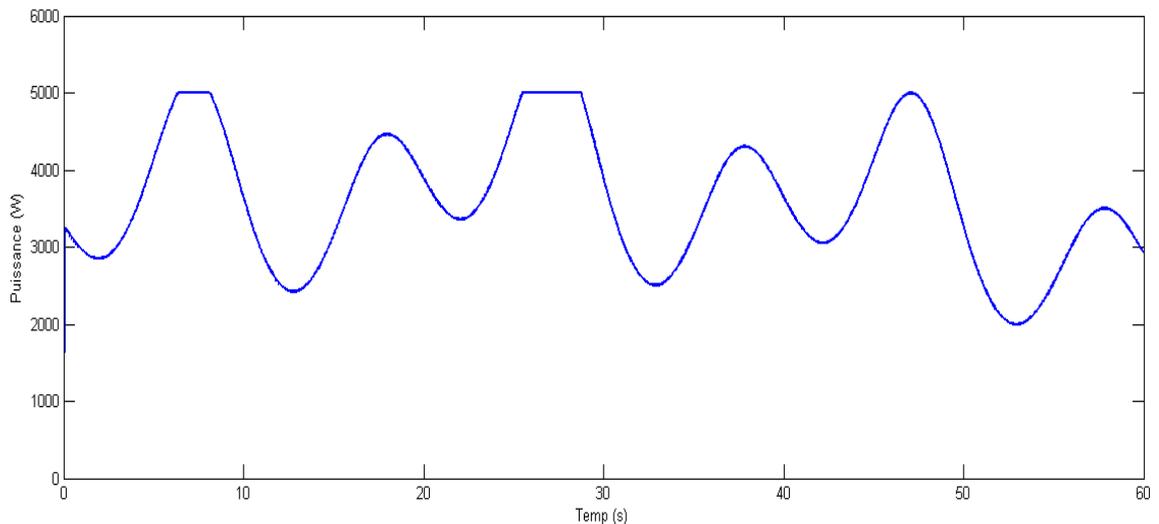


Figure III.3 : Puissance issue de l'MPPT

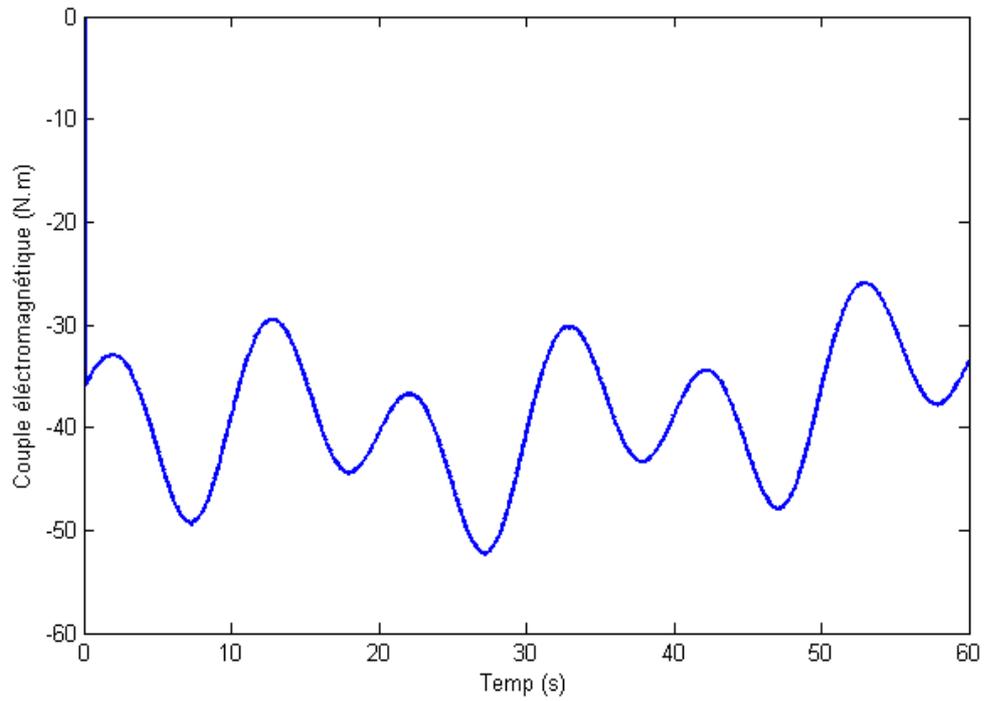


Figure III.4 : couple électromagnétique.

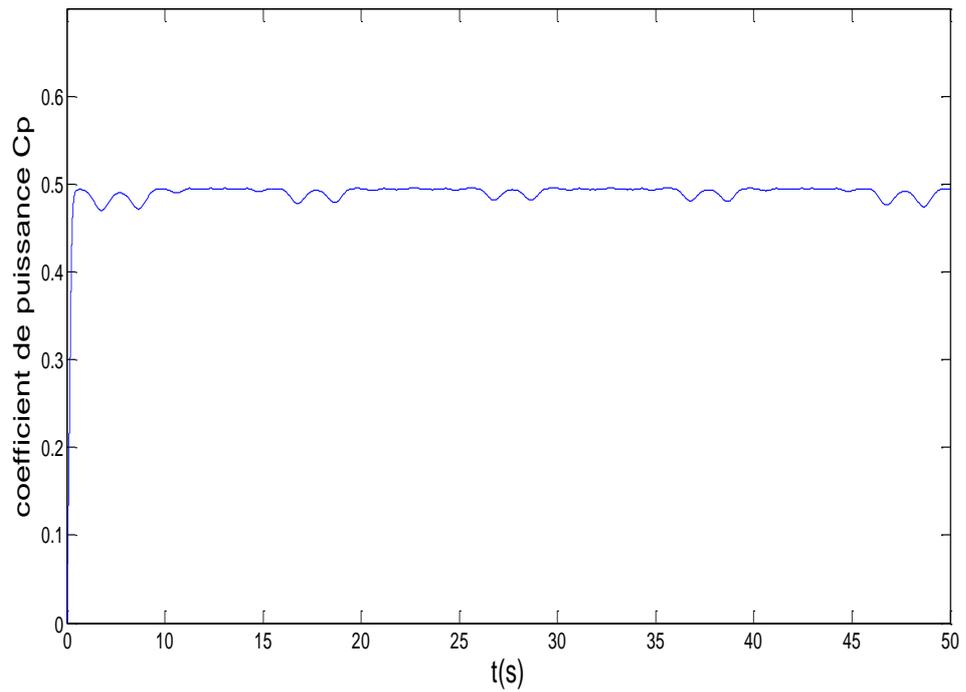


Figure III.5 : Coefficient de puissance.

La figure III.6 présente les formes des tensions statoriques GAS, ainsi que leurs zooms.

On peut conclure que :

- a- Les tensions statoriques ont des fréquences variables, image de l'évolution de la vitesse du vent.
- b- La régulation du flux a donné des tensions statoriques d'amplitude nominale le long du profil du vent. Cela permet de compenser la surtension aux bornes des condensateurs auto-amorçant une fois que la vitesse du vent change.

Sur la figure III.7. L'analyse spectrale de la tension du stator est affichée, à partir de laquelle on peut observer qu'au moyen d'un contrôle adéquat du redresseur MLI, une réduction presque totale des harmoniques est obtenue.

La figure III.8. Montre la forme des courants du stator GAS. Contrairement aux tensions statoriques, les courants présentent des modèles de fréquence et des amplitudes variables en raison de la variation de la vitesse du vent, d'une part, et de la demande de charge, d'autre part.

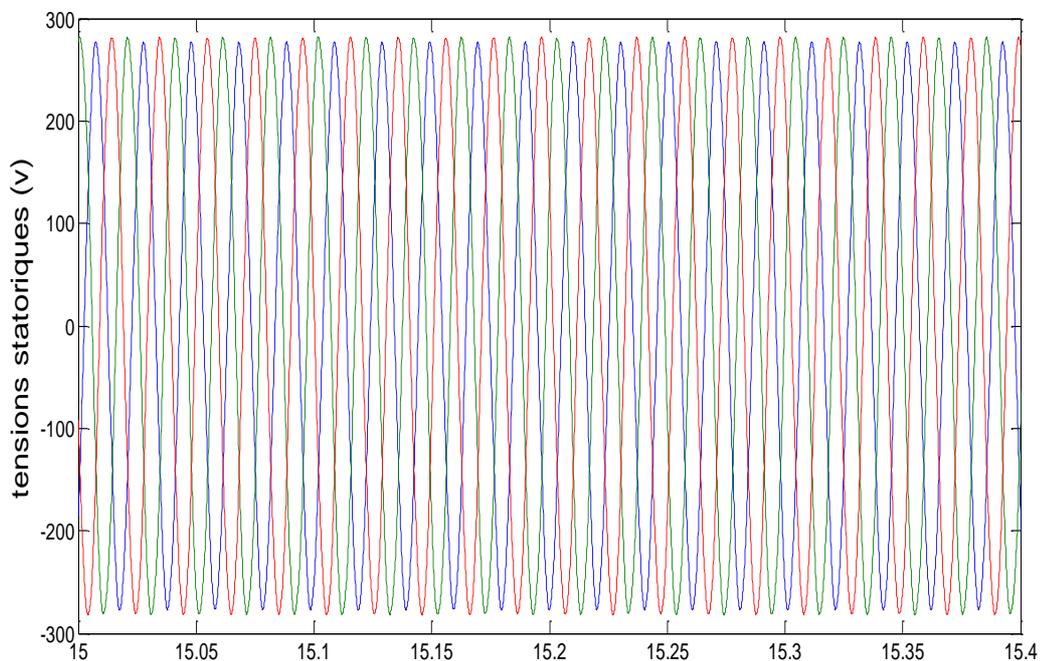


Figure III.6 : Allures des tensions statoriques.

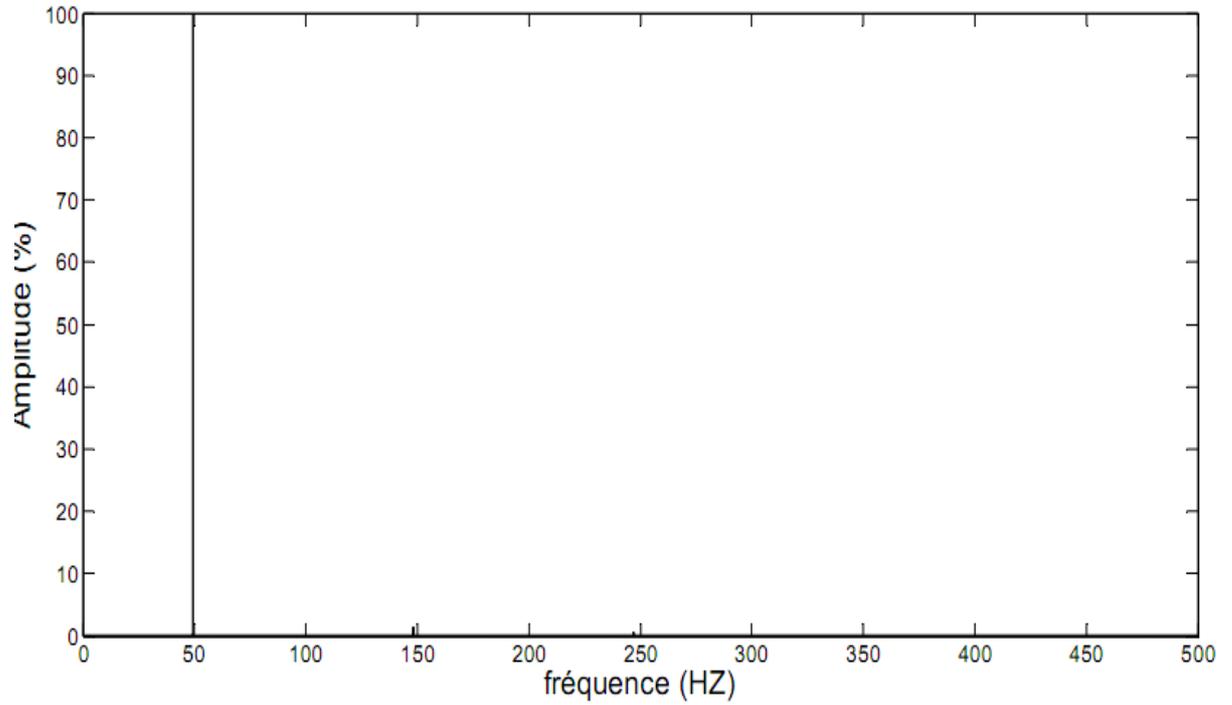


Figure III.7 : Spectre de la tension statorique.

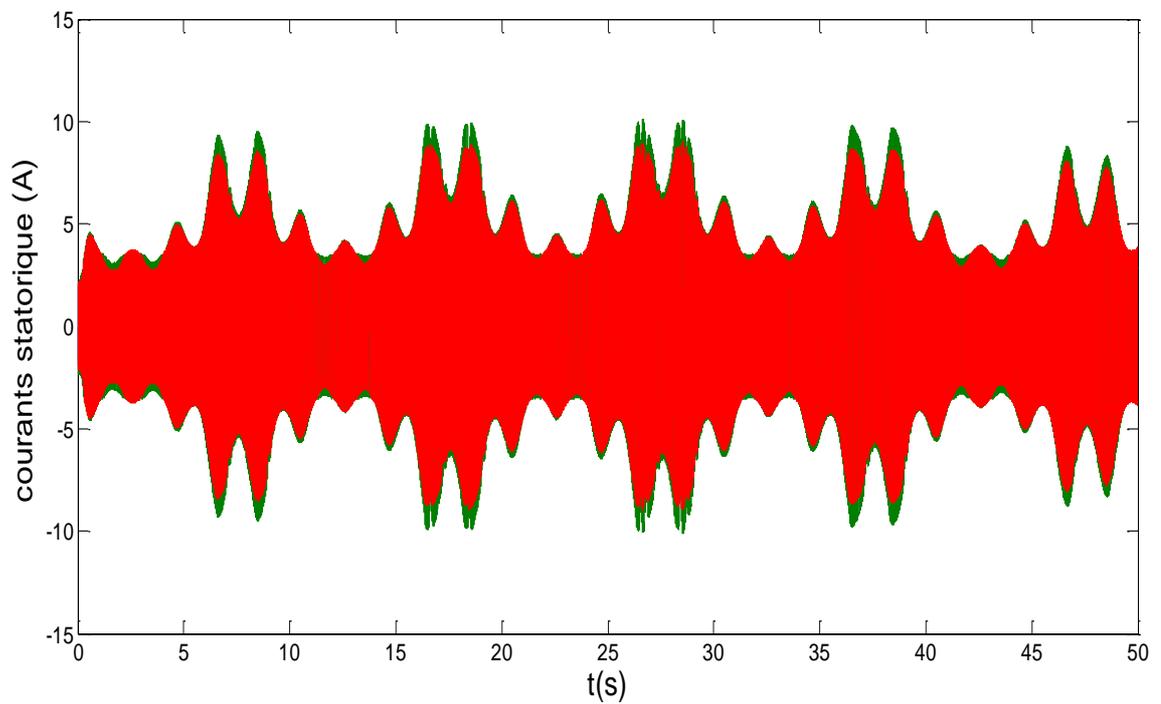


Figure III.8 : Allure des courants statoriques.

La figure III.9 expose l'évolution de la tension du bus continu ainsi que son zoom, qui fait montrer que :

- a- la tension du bus atteint sa consigne qui est 550V sans dépassement, ni erreur statique, ce qui permet un transfert total de puissance de la GAS au moteur asynchrone.
- b- la forme de la tension du bus est plus douce lors de la régulation, qui présente

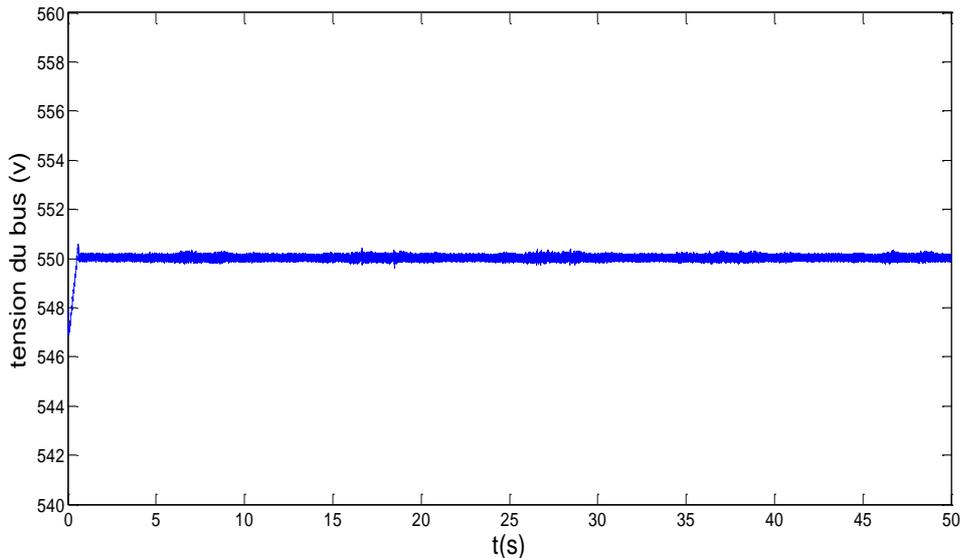


Figure III.9 : Allure de la tension du bus continu.

III.3. Conclusion

Dans ce chapitre, un test des algorithmes de contrôle proposés a été réalisé sur un profil de vent choisi.

Dans le niveau de la turbine les résultats de simulation montrés l'efficacité de l'MPPT, malgré l'ignorance de la courbe caractéristique de la turbine.

Dans le GAS, une commande vectorielle de couple a été appliquée, qui est sortie vers un redresseur MLI commandé par hystérésis en contrôlant instantanément les composants de courant continu et de quadrature. La régulation du bus continue diffus s'est avérée efficace, aidant à surmonter les surtensions dans les condensateurs auto-amorçant lorsque la vitesse du vent change.

Conclusion générale

Les travaux présentés dans notre thèse se réfèrent généralement à l'étude et à la modélisation, puis à la simulation d'un système éolien.

L'objectif principal de ce mémoire est d'étudier les techniques de commande de la GAS afin d'améliorer les performances et d'optimiser la production d'une éolienne.

Pour maximiser l'énergie contenue dans le vent, une recherche opérationnelle du point de puissance maximale (MPPT) a été présentée à l'aide d'un algorithme. Le grand avantage de cette technique est qu'elle permet un fonctionnement à puissance maximale.

Au niveau du moteur asynchrone, après avoir formulé le problème d'optimisation, un fonctionnement variable a été adopté basé sur l'utilisation d'algorithmes génétiques pour minimiser les pertes motrices.

Nous développons les modèles mathématiques des composants du système de conversion de l'énergie éolienne (modèles du profil aérodynamique, de la machine asynchrone et du redresseur MLI).

La loi qui régit le système a été détaillée. Les résultats des différentes simulations réalisées qui ont permis de valider les modèles mathématiques du système éolien proposé ont été commentés.

Les résultats obtenus confirment les performances souhaitées à l'état d'équilibre. Nous avons présenté des résultats de simulation pour un vent croissant linéairement.

En perspective, nous proposons une continuité dans les domaines suivants :

- Réaliser une implémentation globale du système en tenant compte des conditions réelles de fonctionnement et de l'association d'un système de stockage d'énergie.
- Faire un système de contrôle pour les vents fort.
- Réalisation pratique de ce travail sur un banc d'essai expérimental.

Bibliographiques

- [1] G.Cunty ; "Eoliennes et aérogénérateur, guide de l'enneiger éolienne.", Edisud-2011, pp, 11-13.
- [2] A.davigny ; "Participation aux services système de fermes d'éolienne à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie", thèse de doctorat de l'université des sciences technologies de Lille, France, 2007.
- [3] www.mem-algeria.org, consulté le 01/03/2011.
- [4] P.W. Carlin; "The History and State of Art of Variable-Speed Wind Turbine Technology", NREL/TP-500-28607, Février 2001.
- [5] O. Gergaud ; " Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur", Docteur de l'École Normale Supérieure de Cachan 2002.
- [6] www.neal-dz.net, consulté le 01/03/2011.
- [7] B. Multon ;" Production d'énergie électrique par sources renouvelables", Techniques de l'Ingénieur Traité, D 4005.
- [8] A. Tounzi ; "Utilisation de l'Energie Eolienne dans la Production de l'Electricité", Revue 3EI, Mars 2000, pp. 24-38.
- [9] E. Hau;"Wind-turbines, Fundamentals, technologies, application, economics, " Editions Springer, 2000.
- [10] M. Ivan; "Modélisation et réalisation d'une chaîne de conversion éolienne petite Puissance" Laboratoire d'électrotechnique de Montpellier (LEM).
- [11] T. Grignoux ; " Eoliennes en milieu urbain -État de l'art ", janvier 2006, pp. 1-129.
- [12] J. Chen ; " Design and FE analysis of an outer-rotor PM generator for directly coupled wind turbine applications ", proceeding of the IEEE industry applications conference, New York, USA, 1998, vol 1, pp. 387-394.

- [13] S. El Aimani, " Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension ", thèse de doctorat, l'université des sciences et technologies de Lille (USTL), France, 2010.
- [14] B. Multon ; " 3ème situation énergétique mondiale à l'aube du millénaire. Perspectives offertes par les ressources renouvelables ", revue 3Ei No36 mars 2004, pp. 1-14.
- [15] M. Kranthi Kumar Reddy, "fuzzy logic control of variable speed induction machine wind generation system ", IEEE2010, paper N° 10, pp. 333-338.
- [16] L. Louze. " Production décentralisée de l'énergie électrique : Modélisation et contrôle d'une génératrice asynchrone auto excitée". Mémoire de Magister, Constantine Algérie, 2010.
- [17] T. Azouz. " Modélisation d'une chaîne de conversion basée sur une machine asynchrone à double alimentation ". Mémoire de Magister, Biskra, Algérie 2009.
- [18] K.yahia. " Estimation en ligne de l'état et des paramètres du moteur asynchrone triphasé ". Mémoire de Magister, Biskra, Algérie 2005.
- [19] Chatelin. J. " Machines électriques" traité d'électricité, d'électronique et électrotechnique, tome 1et2, Dunod, 1989.
- [20] Z. Rouabah. " Modélisation et commande vectorielle d'une machine à induction avec prise compte et minimisation des pertes ". Mémoire de Magister, Batna, Algérie 2003.
- [21] A.Moussi, A.Saadi, « étude comparative entre les techniques d'optimisation des Systèmes de pompage photovoltaïque », LARHYSS Journal, n°01, mai 2002.
- [22] N. Hamdi « Modélisation et Commande des Génératrices Eoliennes », Mémoire de magister, Université de Constantine, 2008.
- [23] D.Aitkaid « commande d'une machine asynchrone sans capteur mécanique, à l'aide de régulateurs fonctionnaires », Mémoire d'ingénieur. Université de Tizi ouzo, 2011.

- [24] M.Kekouaz, « Commande vectorielle d'une machine synchrone à aimants permanents alimentée par un onduleur de tension », PFE, Université Annaba, 2000.
- [25] R. Kot, M. Rolak, M. Malinowski « Comparison of maximum peak power tracking algorithms for a Small Wind turbine », *Mathematics and Computers in Simulation* 91 29– 40, 2013.
- [26] Remli Aziz « Etude, Commande et Supervision d'un parc de source d'énergie Décentralisées », thèse de doctorat de Université de Bejaia, 2017
- [27] L.Aloui, « Etude par simulation d'une éolienne basée sur une machine Asynchrone à double alimentation alimentée par convertisseur matriciel », Mémoire de Magister en électrotechnique à l'Université de Bejaia, Octobre 2006.
- [28] Armand Boyette, « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne » Thèse de doctorat l'Université Henri Poincaré, Nancy1, 2009 I.
- [29] T. Rekioua « Contribution à la modélisation et à la commande vectorielle des machines synchrones à aimants permanents », Thèse de doctorat de l'INPL Nancy (France), 1991.
- [30] C. Alonso, 'Contribution à l'Optimisation, la Gestion et le Traitement de l'Energie', Mémoire en vue de l'obtention de l'Habilitation à Diriger les Recherches, Université Paul Sabatier, Toulouse III, Décembre 2003.
- [31] B. Multon, X. Roboam, B. Dakyo, C. Nichita, O. Gergaud et H. Ben Ahmed, 'Aérogénérateurs Electriques', *Techniques de l'Ingénieur, Traités de Génie Electrique*, D3960, Novembre 2004.
- [32] F. Yassa, B. Batoun and R. Khaniche, 'Study of Wind Resources in Algeria Based upon Satellite Data', *International Conference on Ecological Vehicles & Renewable Energies, EVER'08, Monaco, March 27-30, 2008.*
- [33] A.S. Toledo, 'Commande Directe et Observation des Convertisseur de Puissance: Application à l'Onduleur de Tension Triphasé', Thèse de Doctorat, Ecole Doctorale de l'Institut National Polytechnique, Grenoble, 2000.

- [34] Communication, 'Les Moteurs Synchrones et leurs Applications Industrielles', Journées de l'Enseignement, de l'Electrotechnique et de l'Electronique Industrielle, SEE-MAFPEN, Gif-sur-Yvette, Mars 1995.
- [35] A. Mirecki, X. Roboam and F. Richardeau, 'Architecture Complexity and Energy Efficiency of Small Wind Turbines', IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol. 54, N°1, 2007.
- [36] A.M. Knigh and G.E. Peters, 'Simple Wind Energy Controller for an Expanded Operating Range', IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 20, N°2, pp. 459 - 466, 2005.
- [37] S. Belakehal, H. Benalla and A. Bentounsi, 'Power Maximization Control of Small Wind System Using Permanent Magnet Synchronous Generator', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 12, N°2, pp. 307 – 319, 2009.
- [38] A. Guettaf « Optimisation floue-Génétique d'un système de pompage éolien », thèse de doctorat, Université de Biskra, 2013
- [39] Jourieh.M. (2007). Développement d'un modèle représentatif d'une éolienne afin d'étudier l'implantation de plusieurs machines sur un parc éolien. Thèse de doctorat, ENSAM de France.
- [40] Mirecki.A (2005). Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance. Thèse de Doctorat, INPT de France.
- [41] Peeters.J (2006). Simulation of dynamic drive train loads in a wind turbine. Thèse de doctorat de l'Université de Katholieke, Belgium.
- [42] Ackermann, T (2012). Wind power in power systems. Wiley second edition.
- [43] Henderson. A. R., C. Morgan, B. Smith, H. C. Sorensen, R. J. Barthelmie, and B. Boesmans (2003). Offshore wind energy in Europe a review of the state of the art. Wind Energ 6:35–52.
- [44] Berger .J (1997). Charging A head: The business of Renewable Energy and What it means for America. University of California Press, Berkley, CA, Canyon.
- [45] Harrison.R., E. Hau, and H. Snel (2000). Large Wind Turbines: Design and Economics. Wiley.

- [46] Andriani.B., P.Lignièrès , M. Barges, A.Bennis, G. Mokhtari (2013) , L'énergie au Royaume du Maroc Stratégie énergétique et développements récents. L'énergie au Royaume du Maroc linklaters.com.
- [47] 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.
- [48] Boudia .S. M., A. Benmansour, and M.A.T.Hellal (2016). Wind resource assessment in Algeria. *Sustainable Cities and Society*, 22:171-183.
- [49] Chellali, F., Khellaf, A., Belouchrani, A., & Reciouï, A. (2011). A contribution in the actualization of wind map of Algeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(2), 993–1002.
- [50] Merzouk, N. K. (2006). Evaluation du Gisement Energétique Eolien- Contribution à la Détermination du Profil Vertical de la Vitesse du Vent en Algérie. Thèse de doctorat d'état en physique énergétique, Université de Tlemcen.
- [51] Daaou Nedjari, H., Kheder Haddouche, S., Balehouane, A., Guerri, O (2017). Optimal windy sites in Algeria: Potential and perspectives. *Energy*. In press.
- [52] Van Haaren, R.V., Fthenakis, V (2011). GIS-based wind farm site selection using spatial multi-criteria analysis (SMCA): Evaluating the case for New York State. *Renew. Sustain. Energy Rev*; 15: 3332–3340.
- [53] Belabes .B. 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. *Renew Sustain Energy Rev*; 51:1245–1255.
- [54] Diaf .S. Notton, G (2013). Evaluation of electricity generation and energy cost of wind energy conversion systems in southern Algeria. *Renew Sustain Energy Rev*; 23:379–90.
- [55] <http://www.mem-algeria.org>. Ministry of energy and mines, Sonelgaz Group Company. Program for renewable energy and energy efficiency; March2011.

- [56] Hau.E (2005). Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics, second edition, Springer.
- [57] Blaabjerg. F., and Z. Chen (2006). Power Electronics for Modern Wind Turbines, Morgan & Claypool Publishers.

ANNEXE

A- Profil du vent

$$v(t) = (8 + 0.5 \sin\left(\left(\frac{0.2\pi}{10}\right)t\right) + 0.5 \sin\left(\left(\frac{\pi}{10}\right)t\right) - 0.75 \sin\left(\frac{2\pi}{10}\right)t)$$

B- Paramètres turbine éolienne

Rayon Pale : R= 2.5m

Coefficient de puissance maximale : Cpmax = 0.54 N/m

Ratio de vitesse optimal : $\lambda = 6.40$

C- Paramètres de la génératrice asynchrone : [64]

Puissance nominale : pn =5000 W.

Tension nominale : vs=220V.

Inductance propre cyclique statorique : Ls = 0.115H.

Inductance propre cyclique rotorique : Lr = 0.115H.

Résistance statorique Rs = 1.8 Ω .

Résistance rotorique Rr = 1.2 Ω .

Coefficient de frottement : f =0.06 N.m.s/rad.

Inertie : J = 0.2 N.m.

Condensateur d'auto-amorçage C= 44 μ F

D- Paramètres de moteur asynchrone:[52]

Puissance nominale : pn=5000W.

Tension nominale : vs= 220 / 380V.

Inductance propre cyclique statorique : Ls = 0.1554H.

Inductance propre cyclique rotorique : Ls = 0.1554H.

Inductance mutuelle : Lm=0.15H.

Résistance statorique Rs = 1.2 Ω .

Résistance rotorique Rr = 1.8 Ω .

Coefficient de frottement : f =0.0001 N.m.s/rad.

Inertie : J = 0.07 N.m.

E- Bus continu

C=1000 μ F

F- Coefficients des régulateurs

✓ Régulation du couple

$K_p = 19.8418$, $K_i = 2050.89$

✓ Régulation des courants I_d et I_q :

$K_p = 1.04$, $K_i = 19.8$