

DEPARTEMENT : **Électrotechnique**

MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE : **Sciences et Technologies**

FILIERE : **ELECTROTECHNIQUE**

OPTION : **ELECTROTECHNOQUE INDUSTRIELLE**

Thème

**Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne
A base de machine synchrone à aimants permanents**

Présenté par :

Dione Fatou

Dirigé par :

Ouari Ahmed

Jury de soutenance :

- Omeiri Amar
- Ouari Ahmed
- Ourici Amel

Président professeur Université d'Annaba
Rapporteur professeur Université d'Annaba
Examinatrice MCA Université d'Annaba

Promotion : Juin 2018

Résumé

Les sources d'énergie renouvelable, permettant une production décentralisée de l'électricité, peuvent contribuer à résoudre le problème de l'électrification des sites isolés où un grand nombre d'individus est dépourvu de tout apport énergétique, ne pouvant ainsi satisfaire aucun besoin même minime et améliorer ses conditions de vie. Ce mémoire traite de la simulation d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à base de génératrice synchrone à aimants permanents destiné à un site isolé. Dans un premier temps, un modèle de chaque étage constituant la chaîne de conversion est proposée. Les différents constituants de la chaîne de conversion sont ensuite connectés entre eux afin de former le modèle complet qui est implémenté dans l'environnement Matlab. Les résultats de simulation obtenus ont permis d'analyser le comportement du dispositif éolien et ont fournis des informations pouvant être utiles à la mise en œuvre d'un système de commande et de contrôle adéquat.

Abstract

Renewable energy, allows a decentralized electrical energy production, which contributes to the solution of supplying isolated area with the necessary energy. This memory calls the simulation of a wind energy conversion chains to basis a generator synchronous of permanent magnets for an isolated site. In a first time, a model of every floor constituting the chain of conversion is proposed. The different constituent of the chains of conversion are then connected between them in order to form the complete model that is implement in the Matlab environment. The results of simulation gotten permit to analyze the behaviour of the wind device and provide some information capable to be useful to the setting in work of a system of order and appropriate control.

وجود مصادر الطاقة المتجددة، سمح بإنتاج الكهرباء اللار كزي، التي يمكن أن تساعد في حل مشكلة كهرباء ذات مواقع معزولة حيث أعداد كبيرة من الناس هي دون أي مساهمة الطاقة، ولا يمكن تلبية أي حاجة حتى الحد الأدنى وتحسين ظروفهم المعيشية. تتناول هذه الأطروحة محاكاة لمتزامن مولد المغناطيس الدائم سلسلة الرياح وتحويل الطاقة القائمة على موقع معزولة. في البداية، يقترح نموذجاً لكل مرحلة تشكل سلسلة التحويل. ثم يتم توصيل مكونات مختلفة من سلسلة تحويل معاً لتشكيل نموذج كامل التي يتم تنفيذها في Matlab. واستخدمت نتائج المحاكاة لتحليل سلوك الجهاز الرياحي، وقدمت معلومات يمكن أن تكون مفيدة لتنفيذ نظام التحكم والسيطرة الكافية

DEDICACE

Je dédie ce mémoire aux personnes les plus chères à mon cœur :

A mon tendre et chaleureux père Modou et ma douce mère Bineta Ngom pour leurs patiences, leurs amours, leurs soutiens et Leurs encouragements.

A mes chères sœurs : Astou, Awa et Khady.

Mes chers frères : Issa et Adama.

A mes petits neveux : Mohamed et Mame Diarra.

A tous mes amis particulièrement à Fatou Socé

REMERCIEMENTS

Au nom d'ALLAH le tout miséricordieux, le très miséricordieux.

Louange à Lui pour m'avoir permis par Sa grâce de vivre ce jour, et de finaliser mon cursus pas ce mémoire. Je Lui suis reconnaissante et Le prie de m'accorder de ces biens.

Je remercie également mes parents pour la confiance qu'ils ont su placé en moi, pour les bonnes valeurs qu'ils ont pu m'inculquer, soyez-en fiers. Je ne saurais vous récompenser pour tout ce que vous avez fait pour moi depuis toujours, seulement considérez ce mémoire comme gage de ma gratitude et mon humilité face à votre présence, vos encouragements, vos bénédictions et tous vos sacrifices. Qu'Allah vous rétribue de la meilleure manière.

Je remercie mon encadrant Monsieur Ouari Ahmed pour son soutien tout au long de ce travail.

Je remercie Monsieur Omeiri Amar, pour avoir bien voulu accepter de présider le jury et à Madame Ourici qui a accepté de juger mon travail

Mes remerciements vont aussi à l'endroit de toutes les bonnes personnes que j'ai eu à rencontrer durant mon séjour en Algérie : la communauté sénégalaise, à mes amies et amis qui m'ont toujours soutenue, et à toutes mes sœurs de la cité 2000 lits de Chaïba, ainsi qu'à mes promotionnaires algériens en Master électrotechnique industrielle.

Et je ne pourrais terminer sans remercier l'Etat Algérien pour leur formation de qualité, à tous les professeurs qui ont contribué à ma formation à l'université Badji Mokhtar d'Annaba, particulièrement ceux du département d'électrotechnique, déterminés et dévoués dans leur travail et toujours à l'écoute des étudiants.

A tous ceux qui de près ou de loin m'ont moralement, physiquement, et financièrement soutenue, qu'Allah vous récompense.

Notations et symboles

V : la vitesse du vent.

S : la surface des pales.

ρ : densité du vent.

ω_s : Pulsation statorique

ω_r : Pulsation rotorique

P : nombre de paires de pôles.

P_m : puissance mécanique.

C_p : coefficient de puissance.

GSAP : générateur synchrone à aimant permanent.

MADA : machine asynchrone à double alimentation.

S, r : indices d'axes correspondant au stator et rotor.

A, b, c : indices correspondant aux trois phases.

V_{sa}, V_{sb}, V_{sc} : tensions d'alimentation des phases statoriques.

V_{ra}, V_{rb}, V_{rc} : tension d'alimentation des phases rotoriques.

I_{sa}, I_{sb}, I_{sc} : courants statoriques.

I_{ra}, I_{rb}, I_{rc} : courants rotoriques.

$\phi_{sa}, \phi_{sb}, \phi_{sc}$: flux statoriques.

$\phi_{ra}, \phi_{rb}, \phi_{rc}$: flux rotoriques.

$d, q, 0$: système d'axes dans le référentiel de PARK

L_s : la matrice des inductances statoriques.

L_r : la matrice des inductances rotoriques

R_r, L_r : résistance et inductance propre d'une phase statorique.

R_s, L_s : résistance et inductance propre d'une phase rotorique.

Θ : angle électrique.

G : gain de multiplicateur

Jg : Moment d'inertie du rotor de la génératrice

Jt : moment d'inertie de la turbine

Cg : Couple de la génératrice

Ω_{mec} : vitesse mécanique

J : Moment d'inertie totale

Cmec : Couple mécanique totale appliqué au rotor de l'éolienne

f : Coefficient de frottement visqueux

Cem : Couple électromagnétique

Cf : Le couple résistant dû aux frottements

R : Rayon de la turbine éolienne

β : Angle de calage des pales de la turbine

Table des matières

CHAPITRE I : ETAT DE L'ART SUR LES SYSTEMES EOLIENS

<u>Introduction générale</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>Introduction</u>	14
<u>I.1. Historique et croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne</u>	14
<u>I.2 Définition de l'énergie éolienne</u>	15
<u>I.3 Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne</u>	16
<u>I.4 Principaux composants de l'éolienne</u>	17
<u>I.5 Différents types d'éoliennes</u>	18
<u>I.6 Puissance et dimensions des aérogénérateurs</u>	22
<u>I.7 Classification des éoliennes selon le type de génératrice</u>	23
<u>I.8. Classification des éoliennes selon leur vitesse</u> :	24
<u>I.9. Etat de l'art sur la conversion électromécanique</u>	25
<u>I.9.1 Systèmes utilisant la machine asynchrone</u>	26
<u>I.9.1.1 Machine asynchrone à cage d'écureuil</u>	26
<u>I.9.1.2 Machine Asynchrone à Double Stator</u>	28
<u>I.9.1.3 Machine Asynchrone à Double Alimentation type "rotor bobiné"</u> ..	29
<u>I.9.2 Systèmes utilisant la machine synchrone</u>	33
<u>I.9.2.1 Générateur Synchrone à Rotor Bobiné</u>	33
<u>I.9.2.2 Générateur Synchrone à Aimants Permanents (GSAP)</u>	34
<u>I.10 Conclusion</u>	36

CHAPITRE II : MODELISATION DE LA TURBINE EOLIENNE

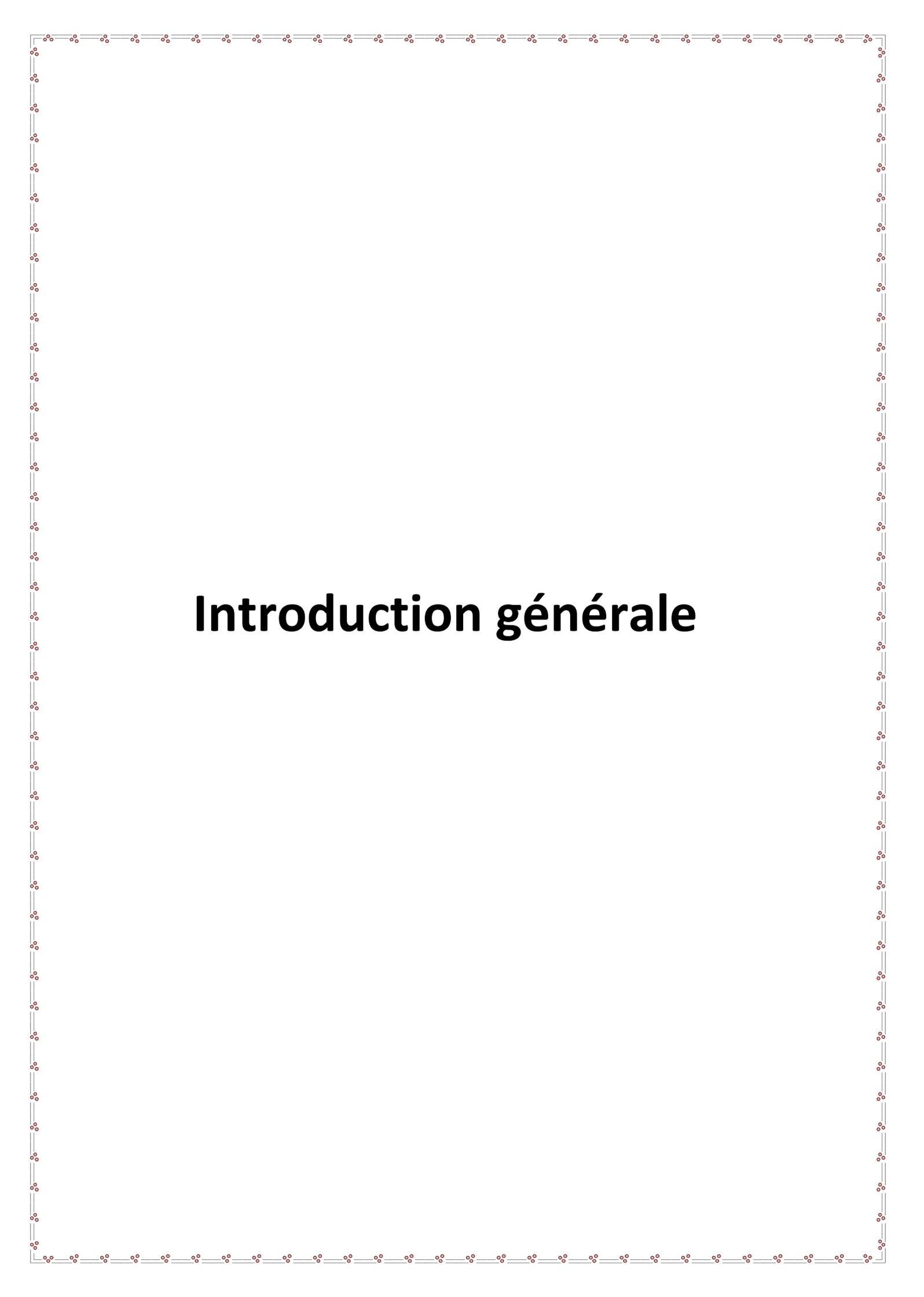
Introduction :	38
II.1 Modèle du vent	38
II.2 Conversion de l'énergie éolienne	39
II.2.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique	39
II.2.2 Loi de BETZ	40
II.2.3 Coefficient de puissance	42

II.2.4 La vitesse spécifique ou normalisée [Tip-Speed-Ratio].....	43
II.2.5 Coefficient de couple	44
II.2.6 Production d'énergie mécanique	44
II.2.7 L'angle d'inclinaison (Blade pitch angle) :.....	45
II.2.8 Effort sur une pale d'éolienne :	47
II.2.9 Relation du coefficient de puissance avec l'angle de calage et la vitesse relative :	48
II.3 Poursuite du point de Maximum de Puissance (Maximal Power Point Tracking, MPPT)	48
II.4 Production optimale d'énergie.....	49
II.5 Modélisation du système éolien.....	50
II.5.1 Présentation du système.....	50
II.5.2 Hypothèse simplificatrices pour la modélisation de la turbine	51
II.5.3 Modélisation de la turbine	51
II.5.3.1 Modèle du multiplicateur.....	53
II.5.3.2 Equation dynamique de l'arbre	53
II.6 Conclusion.....	54

CHAPITRE III : MODELISATION DE LA GENERATRICE SYNCHRONNE A AIMANTS PERMANENTS

Introduction	56
III.1. Description.....	56
III.2. Principe de fonctionnement d'une génératrice synchrone.....	57
III.3. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents.....	57
III.3.1 Les hypothèses simplificatrices	57
iii.3.2 modèle en abc.....	57
iii.3.3 modele biphasé (transformation de park)	58
iii.3.4 expression du couple électromagnétique.....	60
iii.3.5 l'équation mécanique.....	61
III.4. Commande vectorielle de la MSAP	61
III.4.1 Commande vectorielle avec découplage de la régulation des courants par compensation	62
III.4.2 Calcul du régulateur PI	63

III.5 Conclusion.....	64
CHAPITRE IV : SIMULATION DE LA CHAINE DE PRODUCTION D'ENERGIE EOLIENNE	
Introduction	66
IV.1- L'outil Matlab/Simulink.....	66
IV.2 Simulation de la chaine de conversion	67
IV.2.1 La turbine.....	67
IV.2.2 La machine synchrone à aimant permanent	68
IV.2.3 Résultats de simulation.....	68
IV.2.3.1 Vitesse constante :.....	68
IV.3 Conclusion	73
Conclusion générale	



Introduction générale

Introduction générale

L'énergie est l'un des moteurs du développement des sociétés. La civilisation industrielle s'est bâtie autour de l'exploitation du charbon à la fin du 18e siècle, puis du pétrole au milieu du

20e siècle. Depuis le premier choc pétrolier de 1973, les pays industrialisés optent progressivement pour les énergies nouvelles et renouvelables. D'une façon générale, les énergies renouvelables sont des modes de production d'énergie utilisant des forces ou des ressources dont les stocks sont illimités. L'eau des rivières faisant tourner les turbines d'un barrage hydroélectrique ; le vent brassant les pales d'une éolienne ; la lumière solaire excitant les photopiles ; mais aussi l'eau chaude des profondeurs de la terre alimentant des réseaux de chauffage. En plus de leur caractère illimité, ces sources d'énergie sont peu ou pas polluantes. Le solaire, l'éolien, l'eau,...etc. ne rejettent aucune pollution lorsqu'elles produisent de l'énergie.

L'aérogénérateur est basé sur le principe des moulins à vent. Le vent fait tourner les pales qui sont elles-mêmes couplées à un rotor et à une génératrice. Lorsque le vent est suffisamment fort (15 km/h minimum), les pales tournent et entraînent la génératrice qui produit de l'électricité.

L'énergie éolienne est aujourd'hui l'énergie propre la moins coûteuse à produire, ce qui explique l'engouement fort pour cette technologie. Les recherches en cours pourraient lui laisser pendant encore de nombreuses années cette confortable avancée.

La multiplication des éoliennes a conduit les chercheurs en Génie Electrique à mener des investigations de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie. Dans ce cadre, le présent mémoire décrit une étude sur l'utilisation des machines de type synchrone à aimant permanent dans un système éolien.

Le premier chapitre est consacré à des rappels sur les systèmes éoliens à travers les concepts physiques régissant leur fonctionnement. Ces rappels sont suivis par 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, et les différentes technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal), ainsi que les différents générateurs utilisés dans les systèmes éoliens, et les convertisseurs qui leur sont associés.

Le second chapitre comporte la modélisation de la turbine.

Le troisième chapitre est consacré à la modélisation de la génératrice et sa commande vectorielle.

Enfin, nous terminons notre mémoire par une conclusion générale suivie de quelques perspectives envisagées dans nos travaux futurs.

Chapitre I

Etat de l'art sur les systèmes éoliens

Introduction

Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des capteurs éoliens n'a cessé d'évoluer. C'est n'ai qu'au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes à pales profilées ont été utilisés avec succès pour générer de l'électricité.

Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal) et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes. Outre les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones ou asynchrones. Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse de vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes.

L'énergie éolienne est utilisée par l'homme depuis très longtemps déjà. Elle remplaça les rames pour faire avancer les navires, elle fut utilisée pour actionner les meules des moulins, elle permet encore le pompage d'eau pour abreuver les bêtes dans les champs. Depuis plus de cent ans, elle est utilisée pour produire de l'électricité, source d'énergie fondamentale actuellement. En effet, on utilise l'électricité pour la plupart de nos activités, que ce soit dans le domaine domestique ou industriel.

I.1. Historique et croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne

Le vent, étant une source d'énergie traditionnelle non polluante, a été exploité depuis plusieurs siècles pour la propulsion des navires (avant 3000 ans environ), l'entraînement des moulins (environ 200000 moulins à vent en Europe vers le milieu du 19ème siècle), le pompage d'eau. Ces différentes utilisations sont toutes basées sur la conversion de l'énergie du vent captée par des hélices en énergie mécanique exploitable. Ce n'est qu'après l'évolution de l'électricité comme forme moderne d'énergie, que le danois Poul La Cour a construit pour la première fois en 1891 une turbine à vent générant de l'électricité.

C'est principalement la crise pétrolière de 1974 qui relança le besoin d'utilisation des énergies renouvelables en remplacement des énergies fossiles. Des études sur l'utilisation de l'énergie éolienne ont été menées par plusieurs pays et des investissements importants ont été consentis pour améliorer et moderniser la technologie des chaînes de conversion éolienne. Ces investissements ont permis un développement important de l'utilisation de l'énergie éolienne par de nombreux pays dont l'Allemagne, l'Espagne et le Danemark.

I.2 Définition de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (Figure I.1).

L'énergie éolienne est une énergie intermittente "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse. 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. Les matériaux nécessaires à la fabrication des différents éléments (nacelle mât, pales et multiplicateur notamment) doivent être technologiquement avancés et sont par conséquent onéreux.

L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable à l'énergie nucléaire sans pour autant prétendre la remplacer (l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produite étant largement plus faible). Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer (fermes éoliennes offshore) où la présence du vent est plus régulière

L'énergie éolienne est utilisée par l'homme depuis très longtemps déjà. Depuis plus de 100 ans, elle est utilisée pour produire de l'électricité, source d'énergie fondamentale dans notre société actuelle. En effet, on utilise l'électricité pour la plupart de nos activités, que ce soit dans le domaine domestique ou industriel.

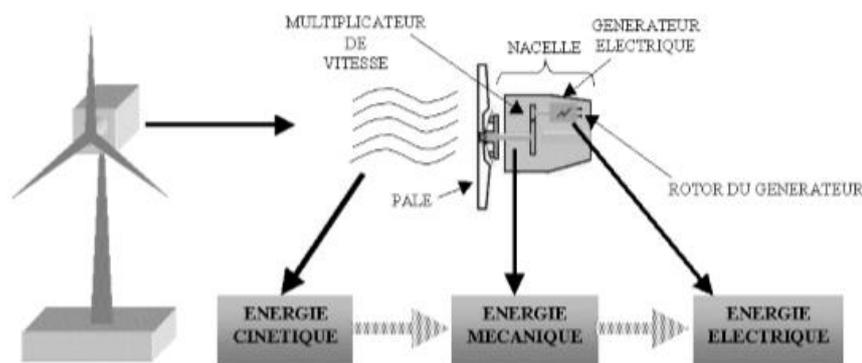


Fig.I.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent

I.3 Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie. Cette source d'énergie présente des inconvénients qu'il est nécessaire de palier pour qu'elles ne constituent pas un frein à son développement.

Le tableau ci-dessous montre les avantages et inconvénient de l'énergie éolienne :

Tableau I. 1 : Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.

Avantages	Inconvénients
L'énergie éolienne est une énergie qui respecte l'environnement	L'énergie éolienne est dépendante de la topographie, de la météo.
L'énergie éolienne est une énergie propre (pas d'émissions de gaz, pas de particules).	Possède un mécanisme bruyant.
L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui ne nécessite aucun carburant.	Le coût de l'énergie éolienne est plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés
L'énergie éolienne ne produit pas de déchets toxiques.	L'impact visuel, « ça reste néanmoins un thème subjectif »
L'énergie éolienne produit de l'électricité : sans dégrader la qualité de l'air, sans polluer les eaux, sans polluer les sols	La qualité de la puissance électrique : la puissance électrique produite par les Aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne.
Le vent souffle plus souvent en hiver, cette saison étant celle où la demande d'électricité est la plus forte.	
La surface occupée au sol est peu importante.	
C'est l'énergie la moins chère des énergies renouvelables.	
Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer. Le cout d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles. Enfin, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.	

I.4 Principaux composants de l'éolienne

Une éolienne est généralement constituée de cinq éléments principaux : la nacelle, la tour, la génératrice, le rotor et le multiplicateur.

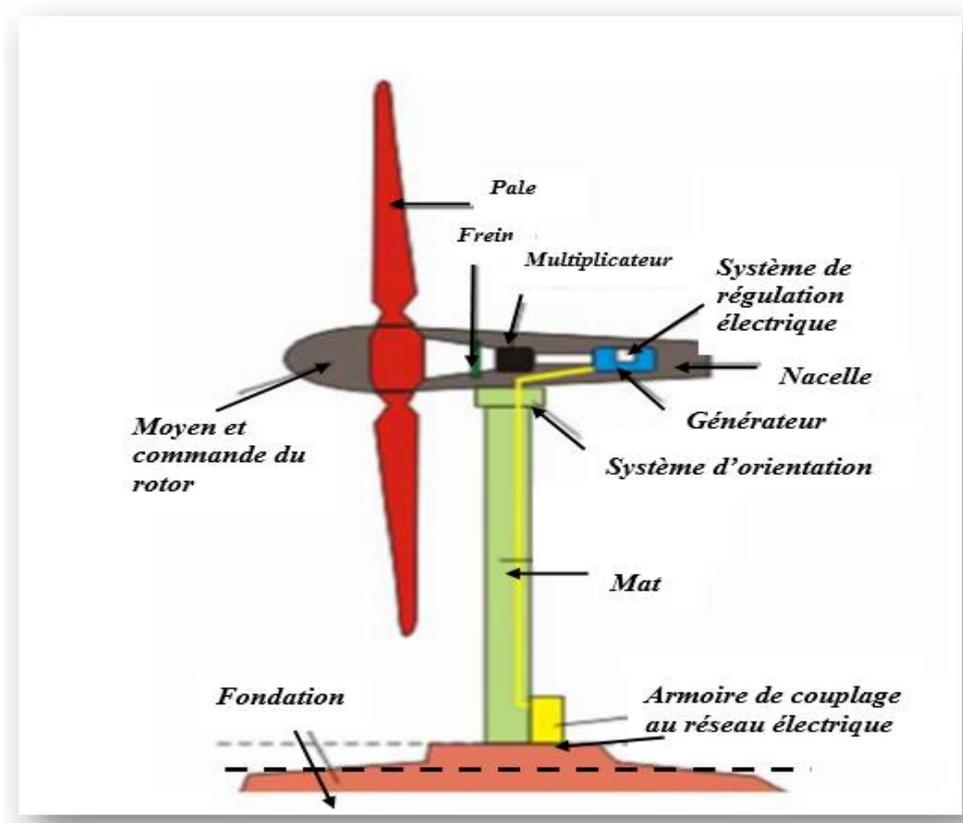


Fig.I. 2 : schéma d'une éolienne

- **La nacelle** : Au sommet du mât se trouve la nacelle qui regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique (arbres primaire et secondaire, multiplicateur, Le frein, générateur...)

- **La tour (le mat)** : C'est un tube d'acier, il doit être le plus haut possible pour bénéficier du maximum d'énergie cinétique du vent et d'éviter les perturbations près du sol. Trois grands types de tour existent, à savoir :

- ✓ **Tour mât haubané** de construction simple et moins coûteuse, elle s'adresse essentiellement aux machines de faible puissance. Une intervention au niveau de la nacelle nécessite en général de coucher le mât.
- ✓ **Tour en treillis** qui sont les moins chères sont souvent mal acceptées et très peu utilisés. Son avantage essentiel est sa simplicité de construction, qui la rend

attractive pour les pays en voie de développement. Pour des machines de grande taille, son aspect inesthétique devient un handicap certain.

- ✓ **Tour tubulaire** qui est beaucoup plus élégant, a un cout qui peut atteindre trois à quatre fois celui d'un pylône haubané.

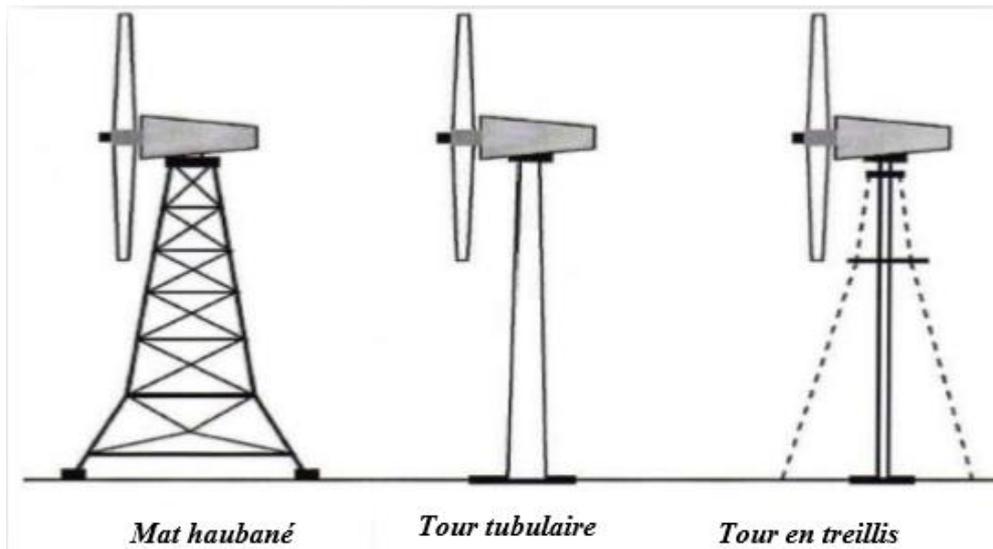


Fig.I. 3 : Différents types de tour

- **Le rotor** : Le rotor est entraîné par l'énergie du vent via des pâles, il est branché directement ou indirectement (via un multiplicateur de vitesse à engrenages) au système mécanique qui utilisera l'énergie recueillie (pompe, générateur électrique ...).
- **Le multiplicateur** : Sert à adapter la vitesse de la turbine de l'éolienne à celle de la génératrice électrique.
- **La génératrice** : C'est un alternateur qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. C'est généralement soit une machine synchrone, ou une machine asynchrone à cage ou encore une machine à rotor bobiné. La puissance électrique de cette génératrice peut varier entre quelque kW à 10 MW.

I.5 Différents types d'éoliennes

Il existe deux grandes familles d'éoliennes certaines ont un axe horizontal, parallèle au sol, et d'autres ont un axe vertical, perpendiculaire au sol.

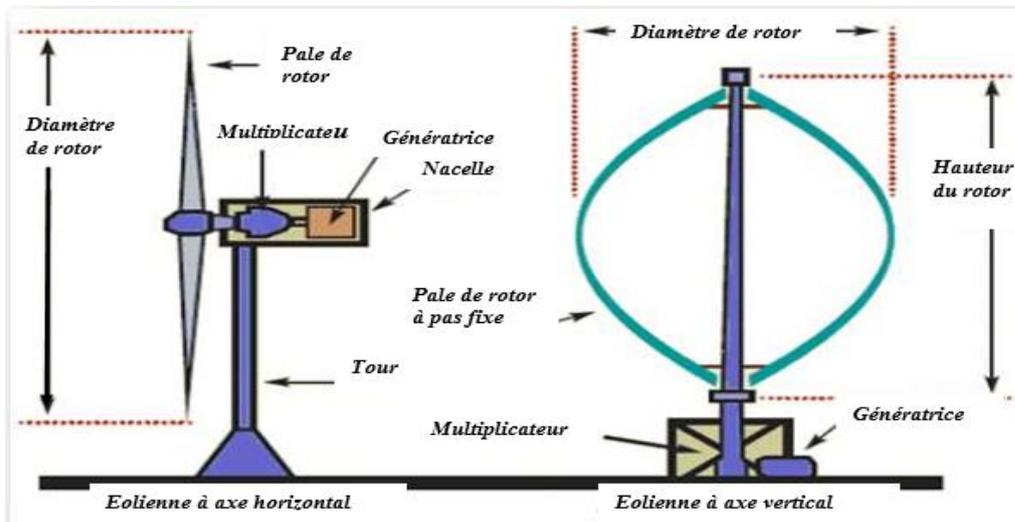
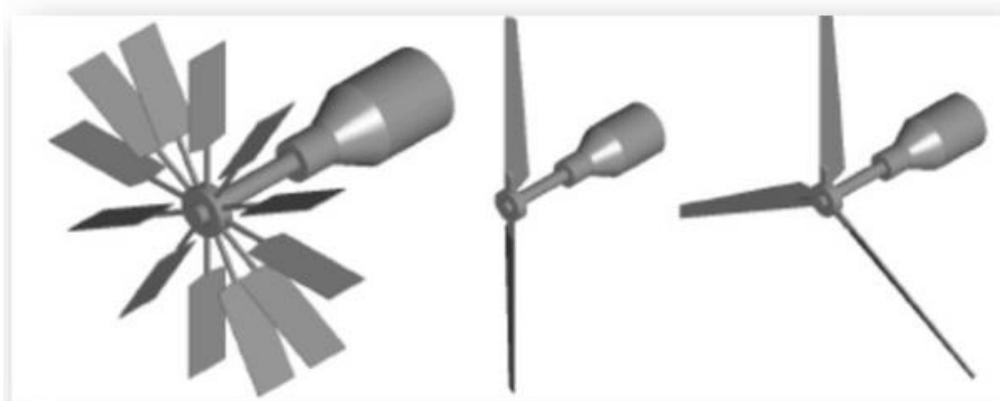


Fig.1. 4 : deux types des éoliennes

- Concernant les éoliennes à axe horizontal : Elles sont souvent appelées "éolienne à hélices" et sont basées sur le principe des moulins à vent. Elles s'orientent suivant la direction du vent. Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent des voilures à deux, trois (les plus courantes) ou plusieurs pales.

Une éolienne à axe horizontal est constituée donc d'une hélice perpendiculaire au vent montée sur un mat dont les pales sont profilées aérodynamiquement à la manière d'une aile d'avion.

Elles sont implantées dans les zones rurales ou en mer car elles nécessitent de la place.



Eolienne à pale

Eolienne à deux

Eolienne à trois

Fig.1.5 : Eoliennes à axe horizontal

- Concernant les éoliennes à axe verticale : elles ont été les premières structures utilisées pour produire de l'électricité. Elles possèdent l'avantage d'avoir des organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles. Il existe

deux types d'éolienne verticale, les éoliennes de Savonius (inventé par le finlandais Sigurd Savonius en 1924), Ils sont basés sur le principe de la traînée différentielle qui stipule qu'un couple moteur peut être obtenu par une pression différente exercée par le vent sur les parties concaves et convexes de la structure.

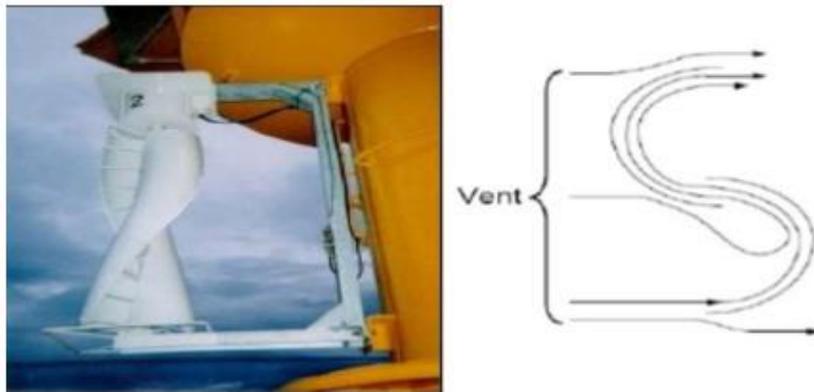


Fig.I. 6 : éoliennes à axe vertical de type Savonius

Et les éoliennes de Darrius (conçu par l'ingénieur français George Darrius). Ce type d'aérogénérateur est basé sur le fait qu'un profil placé dans la direction de l'écoulement de l'air est soumis à des forces de direction et d'intensité variables selon l'orientation de ce profil (Fig. I.7). La résultante de ces forces génère un couple moteur entraînant l'orientation du dispositif.

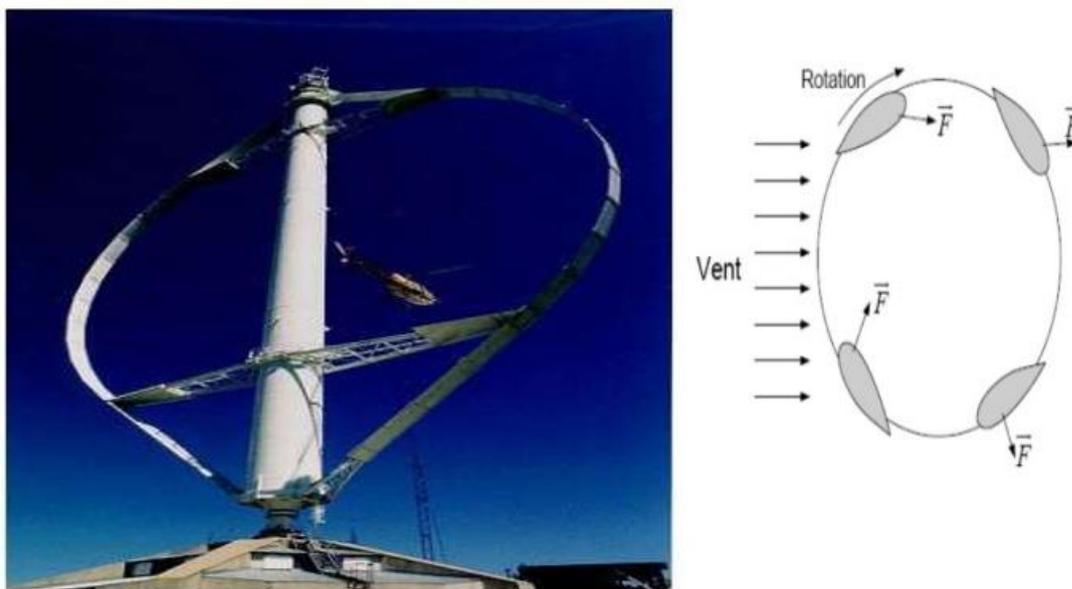


Fig.I.7 : éoliennes à axe vertical de type Darrius

Parmi les avantages et inconvénients des éoliennes à axe horizontale et axe verticale, nous avons :

Tableau I.2 : Les avantages et les inconvénients des éoliennes à axe horizontale et axe vertical

	Horizontal	Vertical
Avantages	Cout limité	De conception plus simple que Les machines à axe horizontal
	Peu de contraintes mécaniques	Elle est plus facile d'accès
	Grande efficacité	La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol
Inconvénients	Bruit conséquent	Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal
	Vibrations non négligeables	Les éoliennes ne démarrent pas automatiquement, il faut utiliser la génératrice comme moteur pour permettre le démarrage de l'éolienne
	Grande sensibilité au flux éolien et sa variation	Leur implantation au sol exige l'utilisation des tirants qui doivent passer au-dessus des pales, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne à tour

I.6 Puissance et dimensions des aérogénérateurs

Les éoliennes sont divisées en trois catégories selon leur puissance nominale, ainsi nous avons :

- Les éoliennes de petite puissance : inférieures à 40 KW
- Les éoliennes de moyenne puissance : de 40 à quelques centaines de KW
- Les éoliennes de forte puissance : supérieures à 1 MW

De plus, le tableau ci-dessous propose une classification de ces éoliennes selon la puissance qu'elles délivrent et le diamètre de leur hélice :

Tableau. I. 3 : Classification des éoliennes selon leur puissance nominale

Eolienne	Diamètre de l'hélice	Puissance
Petite	Moins de 12m	Moins de 40kW
Moyenne	12m à 45m	De 40 kW à 1MW
Grande	46m et plus	1MW et plus

I.7 Principe de fonctionnement d'une éolienne

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.
- Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique transmise en suite au réseau électrique.

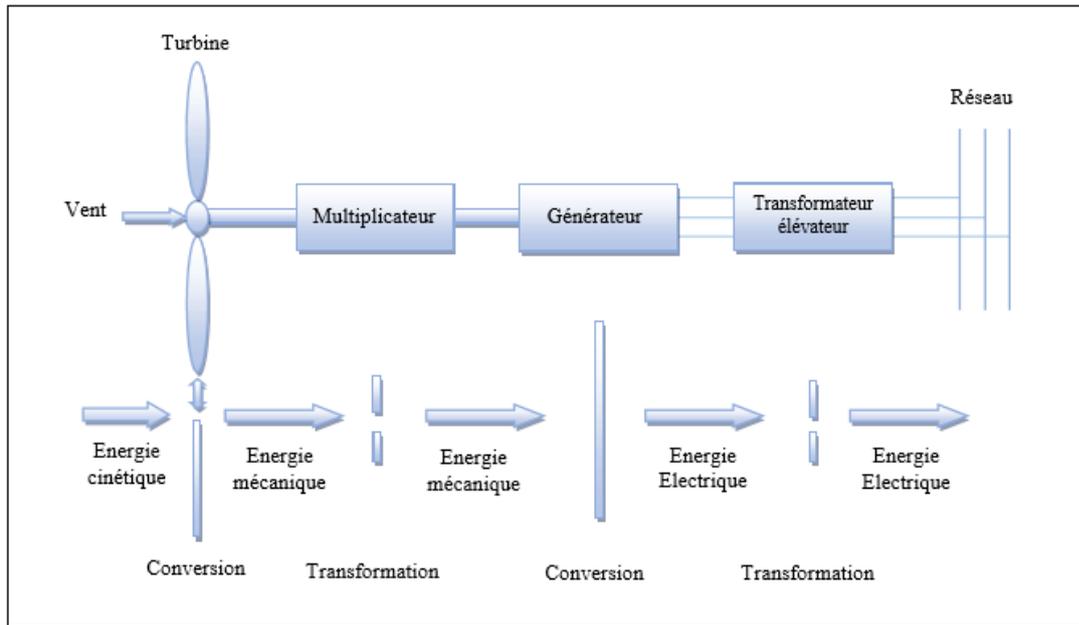


Fig.I. 8 : Principe de la conversion de l'énergie éolienne

Son principe de fonctionnement est donc relativement simple. Pour résumer, le vent va faire tourner les pales qui elles-mêmes vont faire tourner le générateur. A son tour le générateur va transformer l'énergie mécanique du vent en énergie électrique.

L'électricité est dirigée vers le réseau électrique ou vers des batteries de stockage.

1.7 Classification des éoliennes selon le type de génératrice

Un générateur électrique est un dispositif permettant de produire de l'énergie électrique à partir d'une autre forme d'énergie. Donc il existe différents types de génératrices. On les classe généralement en deux catégories, les génératrices synchrones et les génératrices asynchrones. Le tableau suivant montre les avantages et inconvénients des différentes machines.

Tableau I. 4 : Différente type des machines

	Avantages	Inconvénients
M. asynchrone (à cage)	Faible cout	Puissance extraite non optimisée
	Machine robuste	Maintenance de boite de vitesse
	Fiabilité de l'électronique de puissance	Pas de contrôle de l'énergie réactive
		Magnétisation de la machine imposée par le réseau
M. asynchrone (MADA)	Machine robuste	Maintenance de boite de vitesse
	Fonctionnement à vitesse variable	Prix de l'électronique de puissance
	Puissance extraite optimisée	Contrôle commande complexe
	Machine standard	Contact glissant bague balais
Machine synchrone (MSAP)	Très bon rendement	Cout élevé (à cause du prix des aimants)
	Fonctionnement à vitesse variable Sur toute la plage de vitesse	Prix de l'électronique de puissance
		Beaucoup plus chair
		Moins robuste

I.8. Classification des éoliennes selon leur vitesse :

Il y a deux types d'éoliennes raccordées aux réseaux électriques : les éoliennes à vitesse fixe constituées d'une machine asynchrone à cage d'écureuil et les éoliennes à vitesse variable constituées d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) ou d'une machine synchrone à aimants permanents (MSAP). Ces dernières (MADA et

MSAP) sont principalement installées afin d'augmenter la puissance extraite du vent ainsi que pour leurs capacités de réglage.

- **Concernant les éoliennes à vitesse fixe** : Elles sont les premières à avoir été développées. Dans cette technologie, la génératrice asynchrone à cage d'écureuil est directement couplée au réseau sans convertisseur de puissance. Sa vitesse mécanique est fonction de la fréquence du réseau et du nombre de paires de pôles de la génératrice. Les avantages des éoliennes à vitesse fixe utilisant des machines asynchrones à cage d'écureuil peuvent se résumer dans les points suivants :
 - ✓ Système électrique simple.
 - ✓ Grande fiabilité.
 - ✓ Prix modéré

Leurs inconvénients majeurs résident en :

- ✓ Une puissance extraite non optimale : Ce type d'éoliennes n'offre quasiment pas de possibilité de réglage de la puissance générée.
- ✓ L'absence de gestion de l'énergie réactive par le générateur asynchrone : La connexion directe au réseau électrique d'une génératrice asynchrone nécessite l'ajout de bancs de condensateurs afin de limiter la puissance réactive appelée.
- **Concernant les éoliennes à vitesse variable** : Malgré sa simplicité, le système de fonctionnement à vitesse fixe peut être bruyant, à cause de la modification des caractéristiques aérodynamiques dues à l'orientation des pales. De plus, il limite la plage de vitesses de vent exploitable. Ces deux principaux inconvénients peuvent, en grande partie, être levés grâce à un fonctionnement à vitesse variable qui permet alors de maximiser la puissance extraite du vent. Mais dans ce cas, l'utilisation d'un convertisseur à base d'électronique de puissance entre la génératrice et le réseau est nécessaire. Cette dernière est généralement constituée de deux convertisseurs (un redresseur et un onduleur) connectés par l'intermédiaire d'un étage à tension continue.

Parmi les avantages de cette configuration nous avons :

- ✓ L'augmentation du rendement énergétique.
- ✓ La réduction des oscillations de couple (Réduction des efforts subis par le multiplicateur de vitesse et les autres parties mécaniques).
- ✓ La génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité

I.9. Etat de l'art sur la conversion électromécanique

La technologie des aérogénérateurs a énormément évolué ces 20 dernières années entraînant une spécialisation des différents types d'éolienne. Différents types de machines électriques peuvent être utilisés pour la génération de puissance éolienne. Des

facteurs techniques et économiques fixent le type de machine pour chaque application. Pour les petites puissances (< 20 kW), la simplicité et le coût réduit des générateurs synchrones à aimants permanents (PMSG) expliquent leur prédominance. Dans les applications de plus forte puissance, jusqu'à 2MW environ le générateur asynchrone est plus courant et économique. Les générateurs habituellement rencontrés dans les éoliennes sont présentés dans les paragraphes suivants :

I.9.1 Systèmes utilisant la machine asynchrone

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

I.9.1.1 Machine asynchrone à cage d'écureuil

La génératrice asynchrone à cage d'écureuil qui occupe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde. La plupart des applications utilisant la machine asynchrone sont destinées à un fonctionnement en moteur (cela représente d'ailleurs un tiers de la consommation mondiale d'électricité), mais cette machine est tout à fait réversible et ses qualités de robustesse et de faible coût ainsi que l'absence de balais-collecteurs ou de contacts glissants sur des bagues la rendent tout à fait appropriée pour l'utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne. La caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à deux paires de pôles est donnée sur la Fig. 1.9.

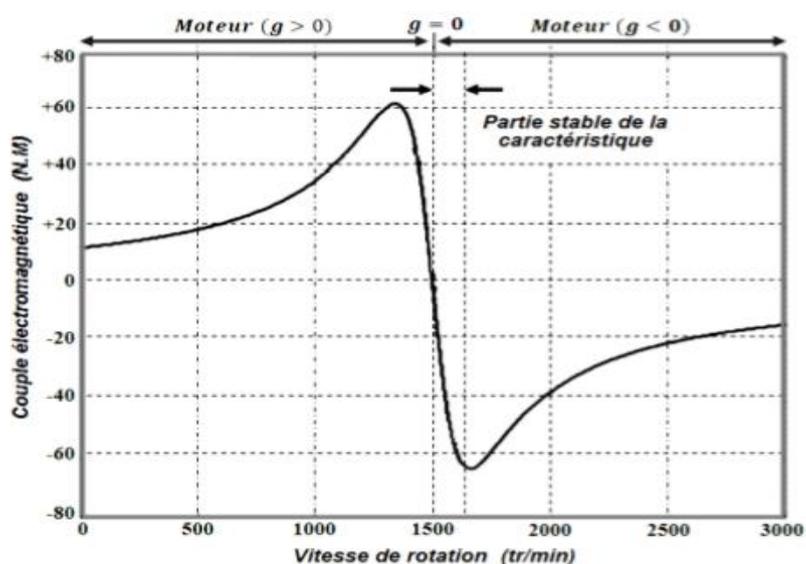


Fig.I.9 : Caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à 2 paires de pôles.

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

Le dispositif le plus simple et le plus couramment utilisé consiste à coupler mécaniquement le rotor de la machine asynchrone à l'arbre de transmission de l'aérogénérateur par l'intermédiaire du multiplicateur de vitesse et à connecter directement le stator de la machine au réseau (fig. 1.10).

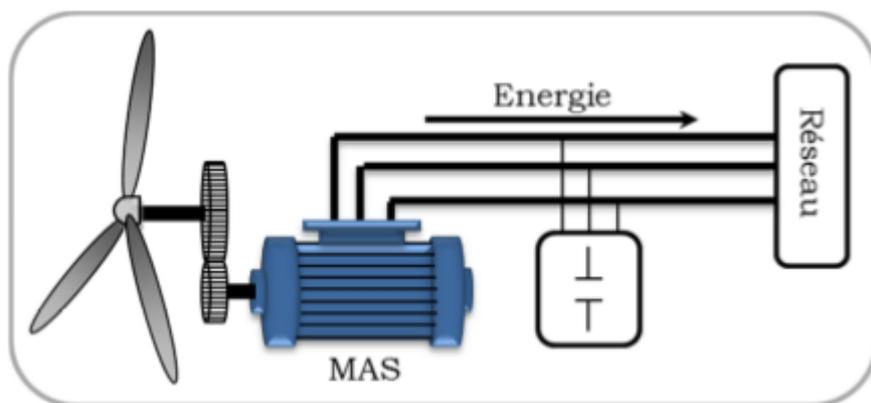


Fig.1.10 : connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau

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

La simplicité de la configuration de ce système (aucune interface entre le stator et le réseau et pas de contacts glissants) permet de limiter la maintenance sur la machine. Ce type de convertisseur électromécanique est toutefois consommateur d'énergie réactive nécessaire à la magnétisation du rotor de la machine, ce qui détériore le facteur de puissance global du réseau, celui-ci peut être toutefois amélioré par l'adjonction de capacités représentées sur la Fig.1.11, qui deviennent la seule source de puissance réactive dans le cas d'un fonctionnement autonome de l'éolienne.

Par contre, cette configuration représente quelques inconvénients :

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

Une autre solution consiste à utiliser la génératrice asynchrone triphasée car la connexion de l'éolienne au réseau se fait par l'intermédiaire d'un dispositif électronique de puissance (Fig. 1.11).

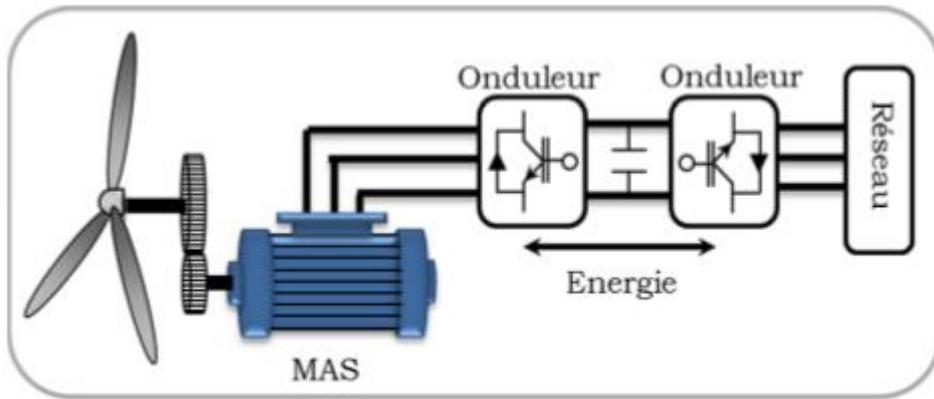


Fig.1.11 : éolienne connectée au réseau par l'intermédiaire de deux convertisseurs de puissance

I.9.1.2 Machine Asynchrone à Double Stator

Cette configuration d'éolienne, permet un point de fonctionnement à deux vitesses. On réalise un double bobinage au stator (Fig. I.12) qui induit un nombre de paires de pôles variable et donc des plages de vitesses différentes. On peut imposer 2 vitesses de synchronisme par changement du nombre de pôles. D'une part, on a un stator de faible puissance à grand nombre de paires de pôles pour les petites vitesses de vent. En effet, la puissance est donnée par :

$$P_{mg} = C_m \cdot \Omega_s$$

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

$$\Omega_s = \frac{\omega}{P}$$

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

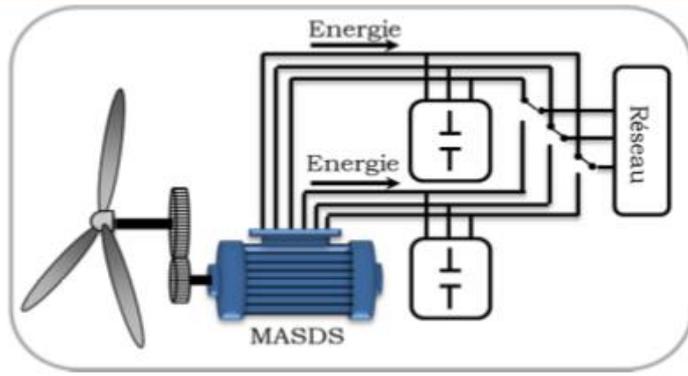


Fig.I.12 : Schéma de la connexion au réseau de l'éolienne avec la MAS à double stator

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

I.9.1.3 Machine Asynchrone à Double Alimentation type "rotor bobiné"

Ce type d'aérogénérateur s'est développé récemment car la double alimentation de machine asynchrone permet une meilleure exploitation du potentiel de l'éolienne. Le stator est directement relié au réseau tandis que les grandeurs rotoriques sont commandées par un convertisseur statique (Fig. I.13). La maîtrise de l'état électromagnétique de la machine par le rotor permet de fonctionner à la fréquence et l'amplitude nominales du réseau même si le rotor s'éloigne de la vitesse de synchronisme. Le dimensionnement du convertisseur est proportionnel au glissement maximal du rotor, autrement dit, il dépend de l'écart maximal entre la vitesse de synchronisme et la vitesse réelle du rotor.

La diminution de puissance du convertisseur statique permet la minimisation des composants de filtrage et de conversion, l'accroissement de la fiabilité de l'électronique, la diminution du coût de l'ensemble et l'amélioration de la qualité d'onde générée (grâce à la diminution de l'amplitude des courants commutés par le convertisseur et l'augmentation de la fréquence de hachage).

Ces machines sont un peu plus complexes que des machines asynchrones à cage avec lesquelles elles ont en commun de nécessiter un multiplicateur de vitesse.

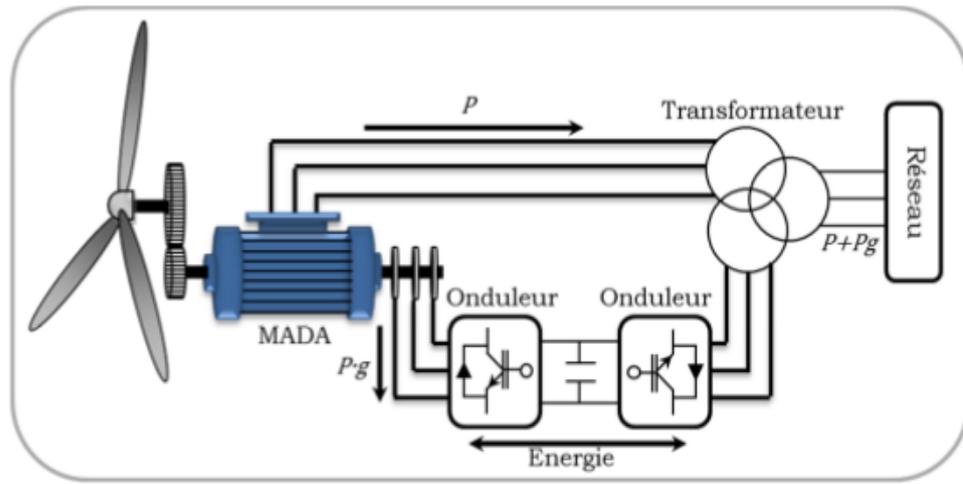


Fig.I.13 : schéma de principe d'une machine asynchrone pilotée par le rotor

Le résumé des points forts de la MADA sont :

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

a) MADA – structure de Kramer

Cette configuration à vitesse variable est représentée sur la Figure 1.14, le stator est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un redresseur et un onduleur est placé en sortie du redresseur. L'ensemble redresseur-onduleur est alors dimensionné pour une fraction de la puissance nominale de la machine.

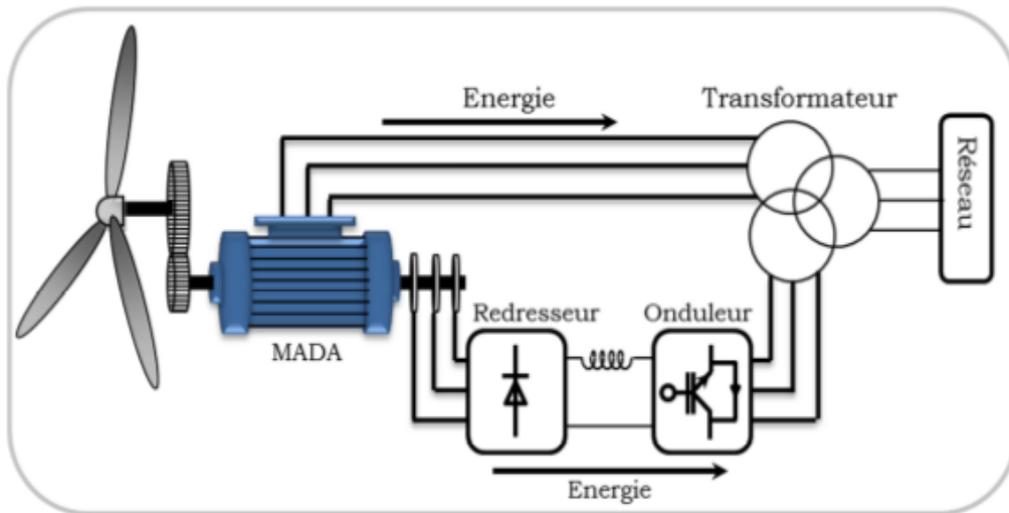


Fig.I.14 : : MADA - structure Kramer

b) MADA à énergie rotorique dissipée

La Figure 1.15 représente cette configuration avec le stator connecté directement au réseau et le rotor connecté à un redresseur. Une charge résistive est alors placée en sortie du redresseur par l'intermédiaire d'un hacheur à IGBT ou GTO. Le contrôle de l'IGBT permet de faire varier l'énergie dissipée par le bobinage torique et de fonctionner à vitesse variable en restant dans la partie stable de la caractéristique couple/vitesse de la machine asynchrone.

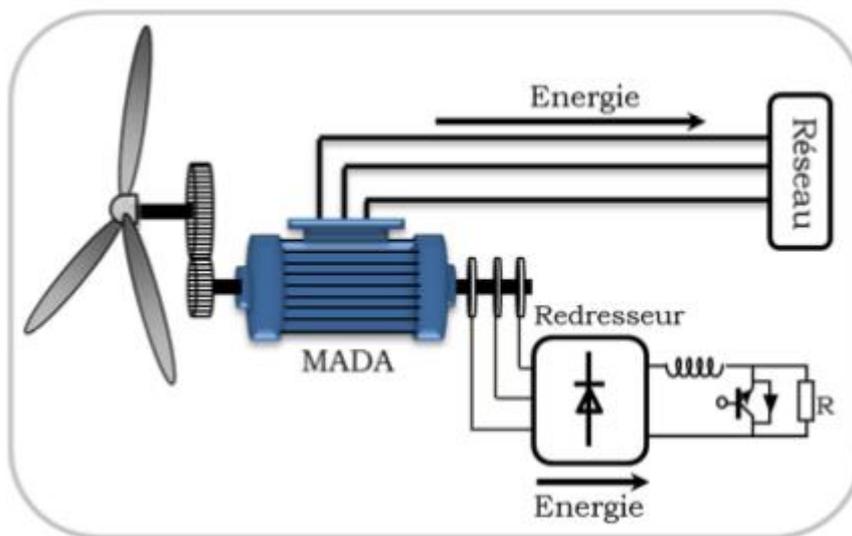


Fig.I. 15 : MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée

Si le glissement devient important, la puissance extraite du rotor est élevée et elle est entièrement dissipée dans la résistance R, ce qui nuit au rendement du système. De plus cela augmente la puissance transmise dans le convertisseur ainsi que la taille de la résistance. Le fabricant "VESTAS" dans son dispositif "OPTI-SLIP" a mis en œuvre ce système en utilisant des composants qui tournent avec le rotor et une transmission

optique des signaux de commande. Les contacts glissants sont ainsi évités. La variation maximale du glissement obtenue dans ce procédé est de 10%.

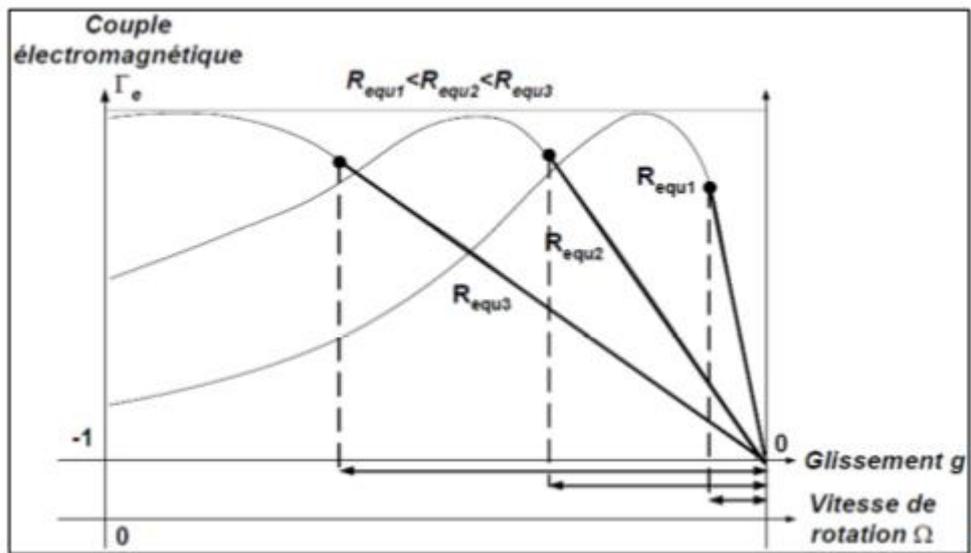


Fig.I. 16 : Effet de la variation de la résistance rotorique sur le couple électromagnétique

c) MADA – structure de « Scherbius » avec cycloconvertisseur

Quand on remplace l'association redresseur - onduleur par un cycloconvertisseur (Fig. 1.17) pour autoriser un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, l'ensemble est alors appelé « structure de Scherbius ». La plage de variation de vitesse est doublée par rapport à la structure de la Figure 1.15.

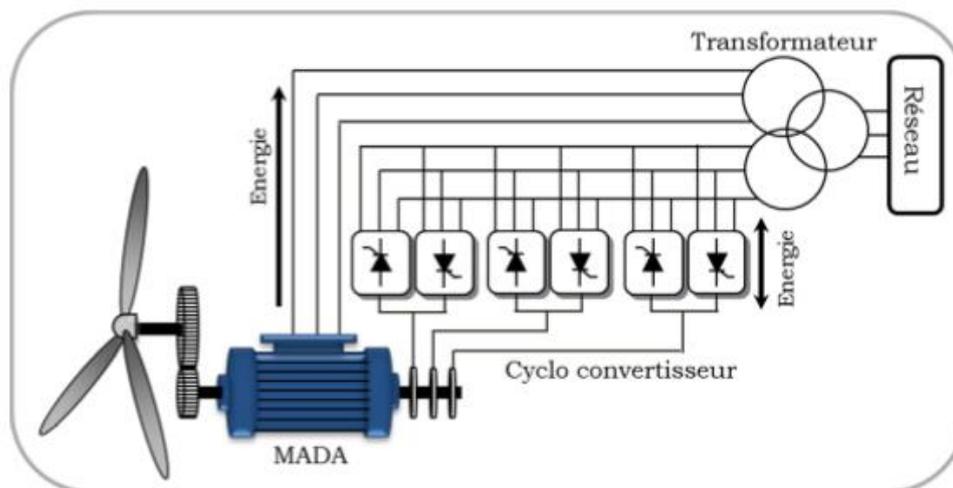


Fig.I. 17 : Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur

d) Machine Asynchrone à Double Alimentation Type "Brushless"

Cette machine est constituée de deux bobinages triphasés au stator. Un des bobinages est directement connecté au réseau et est destiné au transfert de puissance. Le second

bobinage, dont la section des conducteurs est moins élevée, permet de faire varier les courants d'excitation de la machine. Le stator de forte puissance est connecté directement sur le réseau et le convertisseur est placé entre le stator de faible puissance et le réseau (Figure 1.18).

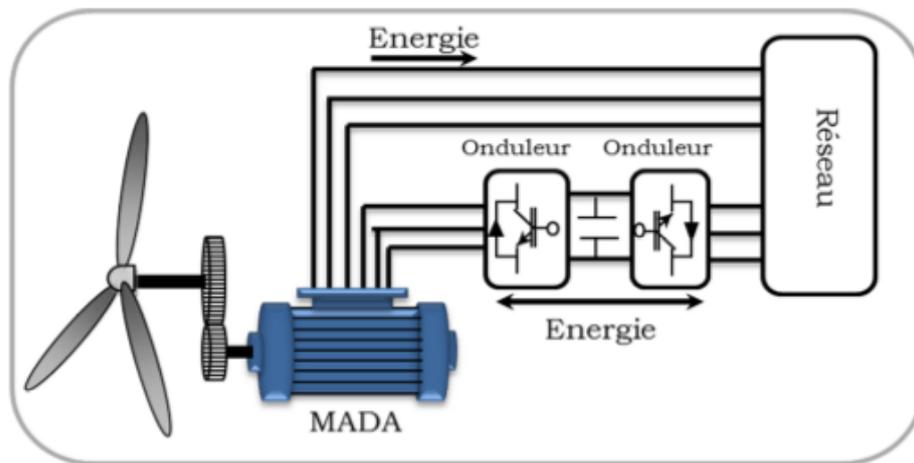


Fig.I. 18 : Machine asynchrone brushless connectée sur le réseau

I.9.2 Systèmes utilisant la machine synchrone

L'avantage du générateur synchrone sur le générateur asynchrone est l'absence de courant réactif de magnétisation. Le champ magnétique du générateur synchrone peut être obtenu par des aimants ou par un bobinage d'excitation conventionnel. Si le générateur possède un nombre suffisant de pôles, il peut être utilisé pour les applications d'entraînement direct qui ne nécessitent pas de boîte de vitesses. Le générateur synchrone est toutefois mieux adapté à la connexion indirecte au réseau de puissance à travers un convertisseur statique, lequel permet un fonctionnement à vitesse variable. Pour des unités de petites tailles, le générateur à aimants permanents est plus simple et moins coûteux. Au-delà de 20 kW (environ), le générateur synchrone est plus coûteux et complexe qu'un générateur asynchrone de taille équivalente.

I.9.2.1 Générateur Synchrone à Rotor Bobiné

Ce type de machine est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité. Le champ créé par la rotation du rotor doit tourner à la même vitesse que le champ statorique. Ainsi, si la génératrice est directement connectée au réseau, sa vitesse de rotation doit être rigoureusement proportionnelle à la fréquence du réseau. Ces machines présentent aussi le défaut d'imposer la présence d'un multiplicateur de vitesse. Elles sont en effet bien adaptées à des vitesses de rotation relativement importantes et un couple insuffisant pour un couplage mécanique direct sur la turbine. Par contre, les machines synchrones sont connues pour offrir des couples très importants à dimensions géométriques convenables. Elles peuvent donc être utilisées avec un entraînement direct sur les turbines éoliennes. Ceci pose le problème d'adaptation de ce type de machines avec le système éolien pour maintenir la vitesse de rotation de l'éolienne strictement fixe

et pour synchroniser la machine avec le réseau. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion génératrice - réseau, les fluctuations du couple capté par l'aérogénérateur se propagent sur tout le train de puissance, jusqu'à la puissance électrique. C'est pourquoi les machines synchrones ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs directement connectés au réseau, et nécessitent une interface d'électronique de puissance entre le stator de la machine et le réseau (Figure 1.19) ce qui permet d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable dans une large plage de variation. Les machines synchrones à rotor bobiné demandent un entretien régulier du système de contacts glissants au rotor. Le circuit d'excitation est assuré par l'intermédiaire d'un redresseur connecté au réseau.

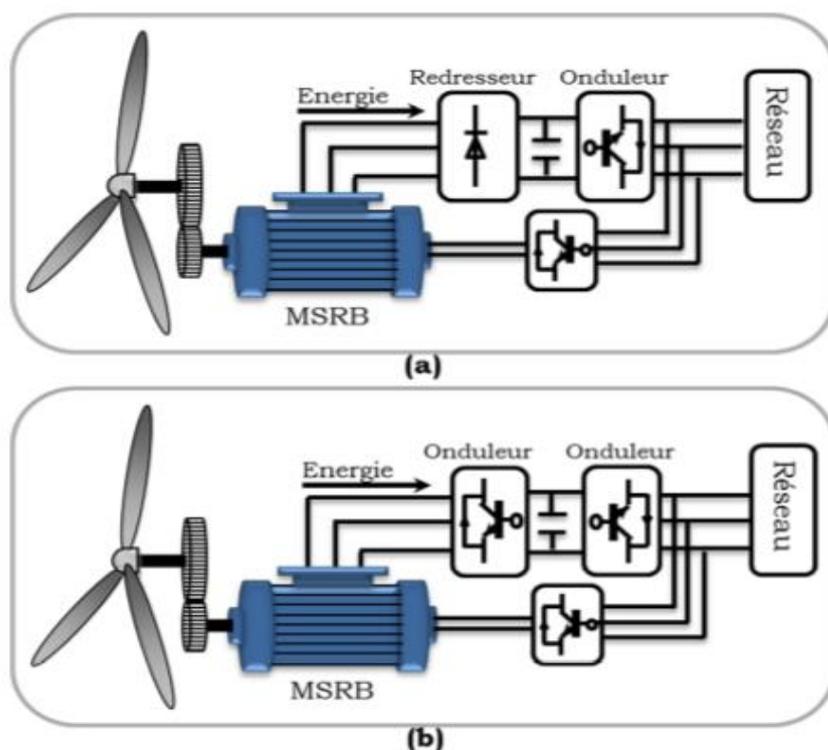


Fig.I. 19 : système éolien basé sur la machine synchrone à rotor bobiné. (a) avec redresseur à diodes, (b) avec convertisseur commande

1.9.2.2 Générateur Synchrone à Aimants Permanents (GSAP)

Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction des machines synchrones à aimants permanents à des coûts qui deviennent compétitifs. Les machines de ce type sont à grand nombre de pôles et permettent de développer des couples mécaniques considérables. Il existe plusieurs concepts de machines synchrones à aimants permanents dédiées aux applications éoliennes, des machines de construction standard (aimantation radiale) ou génératrices discoïdes (champs axial), ou encore à rotor extérieur. Le couplage de ces machines avec l'électronique de puissance devient de plus en plus viable économiquement, ce qui en fait un concurrent sérieux des génératrices asynchrones à double alimentation. Les systèmes de ce type ont un taux de défaillance

jugé faible grâce à la suppression de certaines sources de défauts : suppression du multiplicateur de vitesse et du système de bague et balais (Figure 1.20). Les frais d'entretien sont alors minimisés ce qui est très intéressant dans les applications éoliennes, en particulier dans les sites difficilement accessibles (offshore par exemple). La présence obligatoire de l'électronique de puissance permet enfin une régulation simple de la vitesse de rotation et donc une optimisation énergétique efficace.

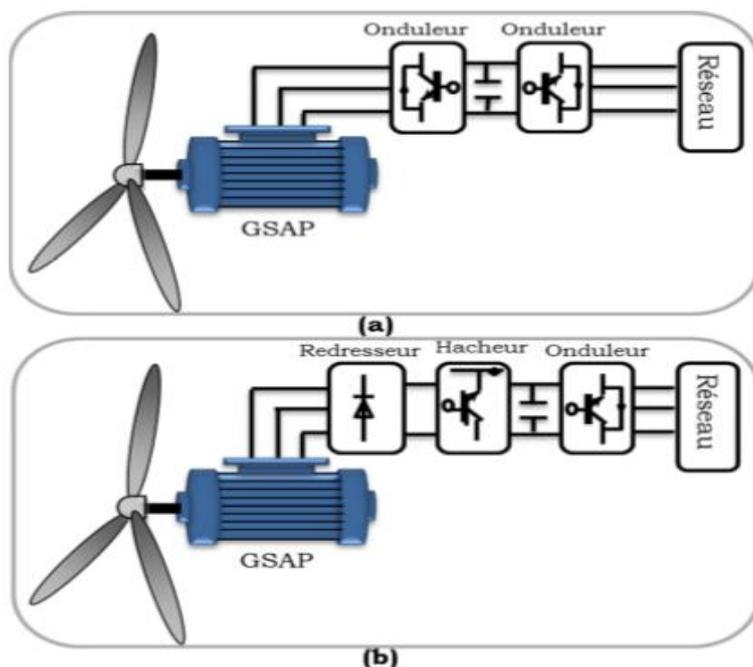


Fig.1. 20 : systèmes éoliens basés sur la Machine Synchrones à Aimants Permanents (a) GSAP avec convertisseurs MLI (b) GSAP avec redresseur, hacheur et convertisseur

L'inconvénient majeur de l'utilisation de la GSAP est le coût des aimants utilisés. Toutefois certains d'entre eux sont réalisés à l'aide de terres rares et sont par conséquent très coûteux, bien que leur utilisation de plus en plus fréquente tende à faire baisser leur prix. De plus, les variations importantes de couples électromagnétiques qui peuvent avoir lieu dans un système éolien risquent d'entraîner une démagnétisation des aimants lorsqu'ils sont constitués de matériaux classiques. Ceci contribue largement à la diminution de leur durée de vie. Dans la configuration de la GSAP de la Fig. 1.20-b, la génératrice est connectée à un redresseur triphasé suivi d'un hacheur, qui a pour rôle de contrôler le couple électromagnétique. La liaison au réseau est assurée par un onduleur MLI qui assure la régulation de la tension du bus continu aussi bien qu'il contrôle le facteur de puissance. L'inconvénient de cette configuration est l'utilisation du redresseur, ce qui augmente l'amplitude du courant et la déformation de la tension. En conséquence, cette configuration a été considérée pour les petites puissances (inférieures à 50KW). Dans la configuration de la Fig. 1.20-a, un redresseur MLI est placé entre la génératrice et le bus continu, et la liaison au réseau est assurée par un onduleur MLI. L'avantage de cette configuration par rapport à la configuration précédente est l'utilisation de la commande vectorielle ce qui permet à la génératrice de fonctionner au voisinage du point optimal. Cependant, ces performances dépendent de la bonne connaissance des paramètres de la

génératrice qui dépendent de la température et la fréquence. En choisissant judicieusement les paramètres du système représenté sur la Fig. 1.21, un système à vitesse « Non constante », à coût minimum et énergétiquement assez performant peut être obtenu.

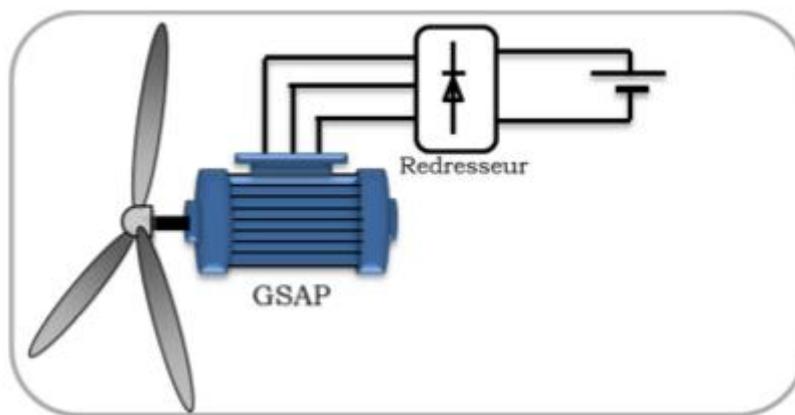


Fig.I. 21 : Système éolien à coût minimum basé sur GSAP

I.10 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté des généralités sur la production de l'énergie électrique à partir de l'exploitation de l'énergie éolienne et son importance en tant qu'énergie verte. Nous avons également consacré ce chapitre à la description d'une éolienne, le calcul de la puissance extraite de la rotation de celle-ci, et les objectifs derrière le contrôle de son fonctionnement. Enfin, Nous avons donné un aperçu sur la conversion électromécanique et les différents types de machines utilisées. La comparaison entre ces machines a dégagé l'idée de consacrer notre étude à un système utilisant une machine synchrone à aimants permanents (MSAP).

Chapitre II

Modélisation de la turbine éolienne

Introduction :

Une éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice.

Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique. D'une manière générale, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est indispensable pour parvenir à cet objectif. Idéalement, une éolienne doit comporter.

Un système qui permet de la contrôler mécaniquement au niveau de la turbine, essentiellement pour limiter la puissance pour les vents forts (L'orientation des pales de l'éolienne, l'orientation de la nacelle).

Un système qui permet de la contrôler électriquement au niveau du générateur associé à l'électronique de commande (Machine électrique associée à l'électronique de commande).

Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement à la modélisation et au contrôle de la turbine éolienne. Dans un premier temps, une étude aérodynamique de la turbine est présentée, en vue de connaître ses principaux paramètres de fonctionnement, à savoir les coefficients de puissance (C_p) et de couple, et la limite de BETZ.

Différentes stratégies de commande sont décrites dans le but de contrôler la puissance aérodynamique de la turbine, et limiter cette puissance lorsque la vitesse du vent devient trop élevée. Un modèle analytique de la turbine éolienne sera réalisé.

II.1 Modèle du vent

Le vent est la raison d'être des aérogénérateurs. L'énergie cinétique contenue dans le vent est transformée en partie en énergie mécanique par la turbine, puis en énergie électrique par le générateur. C'est donc une variable importante à modéliser car la précision des simulations dépendra de la qualité de son modèle.

Le choix géographique d'un site éolien est primordial dans un projet de production d'énergie. Les caractéristiques du vent vont déterminer la quantité de l'énergie qui pourra être effectivement extraite du gisement éolien. De nombreux travaux sur la modélisation du vent ont été réalisés. L'un des principes retenus consiste à générer l'allure temporelle du vent à partir d'un bruit blanc sur lequel on applique une fonction de transfert à déterminer.

Les paramètres de cette fonction de transfert dépendent de grandeurs caractéristiques du site et de la nature du vent.

Donc la vitesse du vent va être décomposée en deux composantes :

$$v(t) = v_0 + vT(t)$$

- Une composante turbulente du vent $vT(t)$ est un processus aléatoire stationnaire (ne varie pas avec la vitesse moyenne du vent)
- Une composante lente V_{moy} ; c'est la moyenne de la vitesse du vent variant régulièrement sur de plus longues périodes dans un site donné.

Alors la vitesse du vent sera modélisée sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques sous la forme :

$$V(t) = 7,5 + 0,7 [3\sin 0,09t + 0,7\sin 0,42t + 18\sin 0,01t + \sin 0,038t]$$

La Figure (Fig. II.1) Représente le vent simulé avec une vitesse moyenne de 7,5 m/s.

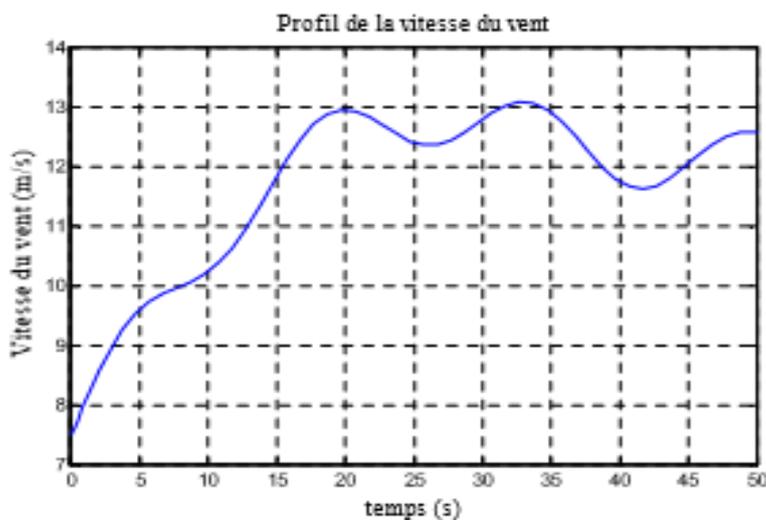


Fig. II. 22 Simulation du profil de la vitesse du vent

II.2 Conversion de l'énergie éolienne

II.2.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor : la densité de l'air, la surface balayée par le rotor et la vitesse du vent. La densité de l'air et la vitesse du vent sont des paramètres climatologiques qui dépendent du site.

L'énergie cinétique d'une colonne d'air de longueur dx , de section S et de masse volumique ρ , animée d'une vitesse v , (Fig. II.2) s'écrit :

$$dE_c = \frac{1}{2} \rho S dx v^2 \tag{II.1}$$

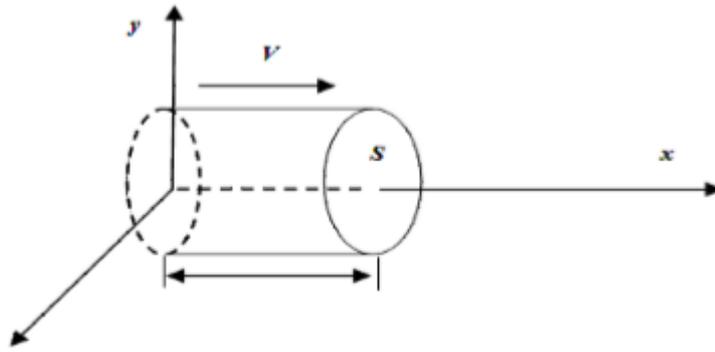


Fig. II. 23 Colonne d'air animée d'une vitesse v

La puissance P_m extraite du volume d'air en mouvement est la dérivée de l'énergie cinétique par rapport au temps.

En supposant $dx = vdt$ on déduit l'expression de P_m :

$$P_m = \frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2} \rho S_0 V^3 \quad (\text{II.2})$$

ρ : masse volumique de l'air, 1,3 kg/m³.

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

E_c : énergie cinétique (en joules)

II.2.2 Loi de BETZ

La loi de BETZ stipule qu'une éolienne ne pourra jamais convertir en énergie mécanique plus de 16/27 (ou 59%) de l'énergie cinétique contenue dans le vent. Ce fut l'Allemand Albert Betz qui, en 1929, formula la loi de BETZ pour la première fois.

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la figure (Fig. II.3) sur lequel on a représenté la vitesse du vent en amont de l'aérogénérateur V_1 et V_2 en aval.

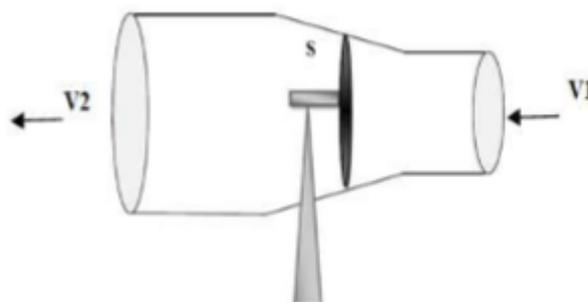


Fig. II. 24 Tube de courant autour d'une éolienne.

D'après la théorie de Betz, la puissance récupérable sur l'éolienne est due à la variation de l'énergie cinétique du vent :

$$P_m = \Delta E_c = \frac{1}{2} m (V_1^2 - V_2^2) \quad (II.3)$$

La masse d'air en mouvement de densité ρ traversant une surface S des pales en une seconde par une moyenne de vitesse.

$$m = \rho S v = \rho S \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (II.4)$$

L'effort qui s'exerce sur l'éolienne est donné par le théorème de la variation de la quantité de mouvement :

$$\vec{F} = \rho S V (\vec{V}_1 - \vec{V}_2) \quad (II.5)$$

Cet effort crée une puissance :

$$P_m = \vec{F} \vec{V} = \rho S V^2 (V_1 - V_2) \quad (II.6)$$

Qui est évidemment la même que celle donnée par (II.3). Ainsi, la combinaison de (II.3) et (II.6) donne :

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (II.7)$$

Avec :

V_1 : vitesse du vent dans le plan du rotor en m/s ;

V_2 : vitesse du vent à l'aval du rotor en m/s ;

S : surface balayée par l'hélice en m^2 ;

On pose que $K = \frac{V_1}{V_2}$ on peut écrire :

$$P_m = \frac{1}{4} \rho S V_1^3 (1 + K)^2 (1 - K) \quad (II.8)$$

Cette puissance admet une valeur maximale pour la valeur de K qui annule sa dérivée

$$\frac{dP_m}{dK} = 0 \iff 2(1 + K)(1 - K)^2 = 0.$$

Soit pour $K=1$ ou $K= 1/3$ or pour ($K= 1$ aucun sens physique)

Donc pour $K=1/3$, alors

$$P_{\max} = \frac{16}{27} \times \frac{1}{2} \rho.S.V_1^3 \approx 0.6 \frac{1}{2} \rho.S.V_1^3 \quad (\text{II.9})$$

On a démontré que l'énergie récupérable dépend du rapport V_2 / V_1 et passe par un maximum lorsqu'il est égal à $1/3$. Dans ces conditions, l'énergie récupérable est égale aux $16/27$ de l'énergie cinétique totale. Il n'est donc possible de récupérer, au mieux, que moins de 60% de cette énergie.

Alors pour un vent théoriquement non perturbé traversant cette une S sans diminution de vitesse soit à la vitesse V_1 , la puissance P_{mt} correspondante serait alors :

$$P_{mt} = \rho S \frac{V_1^3}{2} \quad (\text{II.10})$$

II.2.3 Coefficient de puissance

On définit le coefficient de puissance, le rapport entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible :

$$C_p = \frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left(1 + \left(\frac{V_2}{V_1}\right)\right)\left(1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2\right)}{2} \quad (\text{II.11})$$

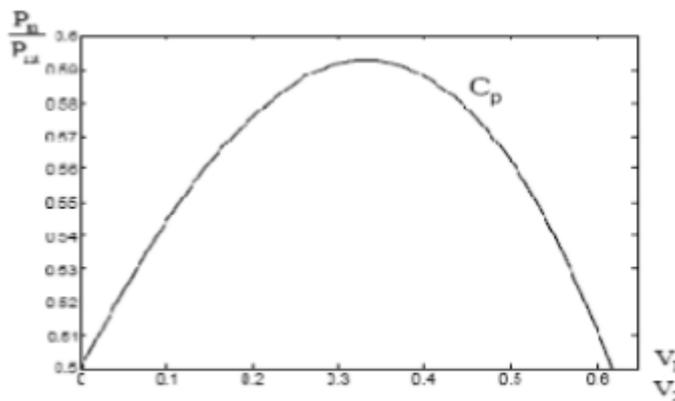


Fig. II. 25 Coefficient de puissance

Le coefficient C_p est variable, il est fonction de la vitesse du vent, de la vitesse de rotation de la turbine Ωt et des paramètres des pales de la turbine comme l'angle d'incidence et l'angle de calage, [10]. Il est souvent représenté en fonction de la vitesse spécifique λ . La valeur maximale théorique possible du coefficient de puissance, appelée limite de BETZ, est de $B C$ soit 0.593. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte. Pour les meilleures machines à axe horizontale, bipale au tripale, celle-ci situe à 60-65% de la limite de BETZ en ne récupère globalement que 40% de l'énergie due au vent. On déduit alors le rendement aérodynamique :

$$\eta = \frac{16}{27} C_{pmax} \quad (\text{II.12})$$

C_{pmax} étant la valeur maximale que peut prendre le coefficient de puissance C_p . Cette valeur est associée à une vitesse spécifique nominale λ_{opt} pour laquelle la turbine a été dimensionnée suivant une vitesse de vent nominale V_n et une vitesse de rotation nominale Ω_{tn} .

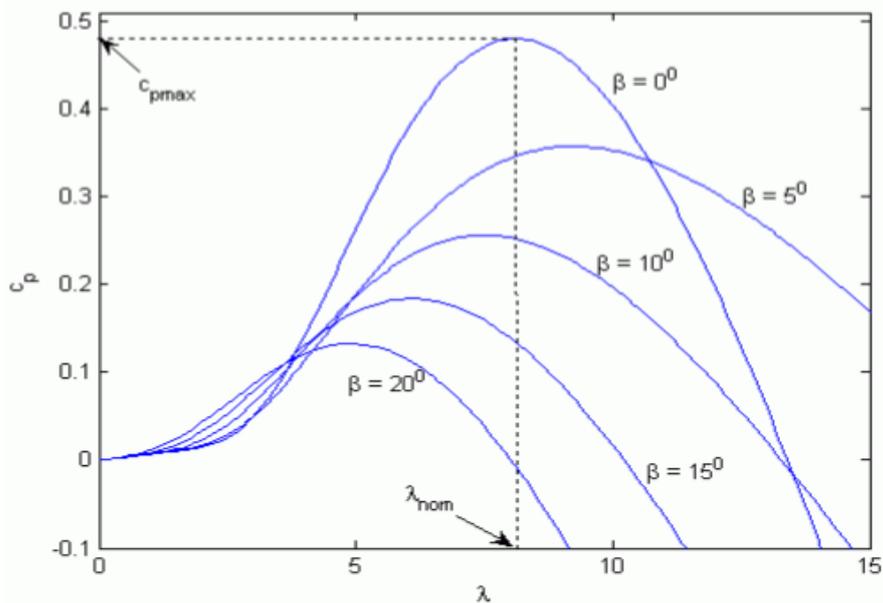


Figure II-26 : Exemple de variation du coefficient de puissance en fonction de l'angle d'orientation des pales et de la ration de vitesse

II.2.4 La vitesse spécifique ou normalisée [Tip-Speed-Ratio]

On définit la vitesse spécifique ou normalisée λ comme étant le rapport de la vitesse linéaire en bout de pales de la turbine $\Omega_t R_t$ sur la vitesse instantanée de vent V (Fig. II.6) et donnée par l'expression suivante :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R_t}{V} \quad (II.13)$$

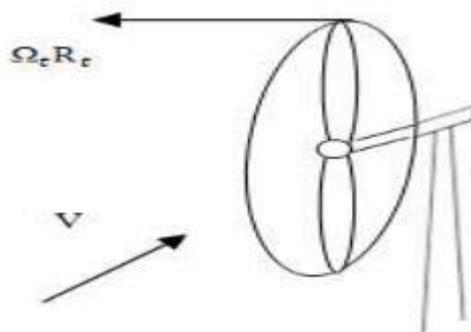


Fig. II. 27 Vitesse de vent V et vitesse tangentielle de l'aubage $\Omega_t R_t$

R_t : Rayon de la surface balayée en m ;

V : vitesse de vent en m/s ;

Ω_t : vitesse de rotation avant multiplication en rad/s ;

II.2.5 Coefficient de couple

Le coefficient de couple C_m est assez proche du coefficient de puissance C_p . Il est fort utile afin d'estimer la valeur des couples pour différents points de fonctionnement, notamment à vitesse de rotation Ω nulle, ce qui correspond à une valeur de C_p nulle pour une valeur de C_m non nulle.

En combinant les équations (II.10), (II.11) et (II.13), la puissance mécanique P_m disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur peut s'exprimer par :

$$P_m = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (\text{II.14})$$

Avec $\lambda = \frac{\Omega_t R_t}{V}$ (II.15)

D'où l'expression du couple est la suivante :

$$T_i = \frac{P_m}{\Omega_t} = \frac{R_t P_m}{\lambda V} = \frac{C_p}{\lambda} \frac{1}{2} \rho \pi R_t^3 V^2 \quad (\text{II.16})$$

T_i : Couple de la turbine éolienne.

La valeur du coefficient de couple est déterminée par la formule suivante :

$$C_m = \frac{C_p}{\lambda} = \frac{T_i}{\frac{1}{2} \rho S_t R_t V^2} \quad (\text{II.17})$$

II.2.6 Production d'énergie mécanique

En tenant compte du rapport du multiplicateur G , à partir des équations (II.14) et (II.15), l'expression de la puissance mécanique disponible sur l'arbre du générateur peut s'exprimer par :

$$P_m = \frac{1}{2} C_p \left(\frac{\Omega_t R}{G V_1} \right) \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (\text{II.18})$$

Cette expression permet d'établir un réseau de courbes donnant cette puissance en fonction de la vitesse de rotation pour différentes vitesses de vent (Fig. II.8).

Au regard de la courbe en pointilles, qui joint les points de puissance maximales, il apparaît que pour pouvoir optimiser le transfert de puissance pour chaque vitesse de vent, la machine devra fonctionner à vitesses variables :

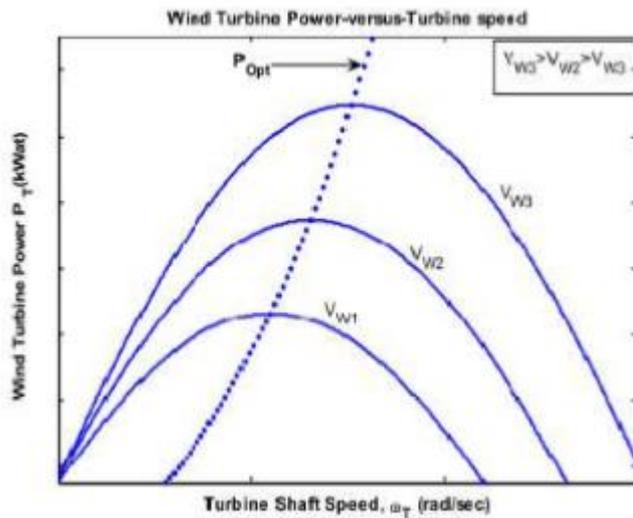


Fig. II. 28 Puissance théorique disponible en fonction de la vitesse de vent

Le fonctionnement à vitesse de rotation variable permet d'optimiser l'énergie captée par l'éolienne mais demande la mise en œuvre d'un convertisseur avec sa commande, ce qui entraîne un surcoût par rapport à la vitesse fixe. La littérature donne un gain de puissance extraite variant entre 2% et 38%.

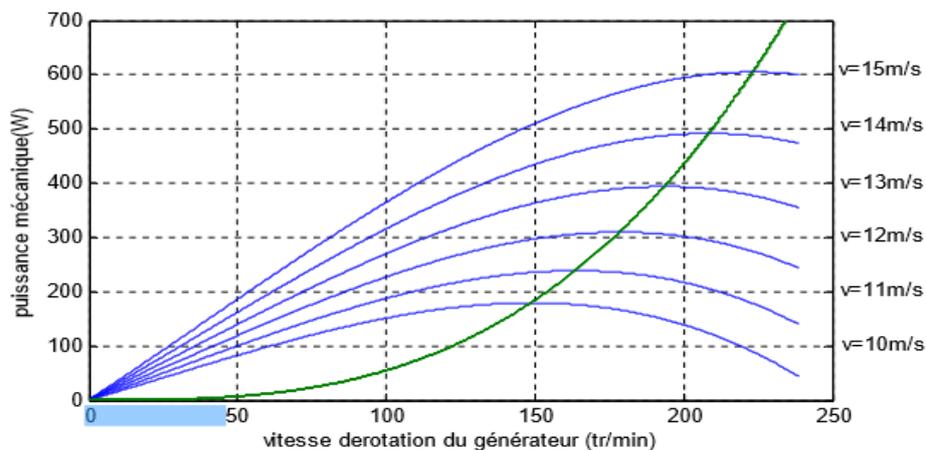


Figure II-29 Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné

Au vu de la caractéristique (Fig. II.8), il apparaît clairement que si l'éolienne et par conséquent la génératrice fonctionne à vitesse fixe, les maxima théoriques des courbes de puissance ne sont pas exploités.

II.2.7 L'angle d'inclinaison (Blade pitch angle) :

L'angle d'inclinaison ou de calage permet de faire varier directement le coefficient de puissance d'une turbine. Il peut être utilisé efficacement pour le contrôle de la puissance de sortie du rotor. La réduction mécanique de la puissance du rotor peut être réalisée en réduisant ou minimisant l'angle d'attaque au-dessus de sa valeur critique. En limitant le coefficient de puissance, la puissance extraite à partir du vent est limitée. Ce type de commande de puissance est également connu en tant que commande de l'angle de calage (pitch control). Cette commande peut être utilisée pour atteindre différent objectif :

- Optimisation de la puissance de l'éolienne, en maximisant la puissance mécanique de sortie pour une vitesse de vent donnée, ce qui est généralement appliqué pour des vitesses faibles et modérées du vent, tout en étant inférieur à sa vitesse nominale.
- Prévenir l'excès de puissance mécanique de sortie pour les vents forts au-dessus des vitesses du vent limite. Cela permet de maintenir un contrôle de la puissance mécanique et la maintient au-dessous de la valeur nominale dans le cas des vents forts.
- Pour prévenir le mouvement (rotation) des pales dans le cas de turbines déconnectées.

Il y'a deux façons communes dans lesquelles le contrôle de l'angle de calage peut être utilisé pour la régulation de la puissance de sortie d'éolienne.

- **commande actif de l'angle de calage** : Pour des vitesses variable d'une éolienne, le fonctionnement d'une turbine ainsi que sa puissance de sortie peuvent être affectés soit par des changements de vitesse ou de variation de l'angle de calage des pales. Dessous de la puissance nominale, ces machines fonctionnent à la vitesse variable d'optimiser la vitesse relative au niveau de l'angle de calage fixe. Après la puissance nominale de sortie est obtenu un contrôle de couple de générateur est utilisé pour maintenir la puissance de sortie, tout en hauteur contrôle est utilisé pour maintenir la vitesse du rotor. A des vitesses de vent élevées, la puissance de sortie du générateur peut être maintenue constante, avec une augmentation de la vitesse du rotor. Cette augmentation de l'énergie disponible dans le vent est stockée sous forme d'énergie cinétique dans le rotor. Il en résulte à la fois la réduction du un couple aérodynamique et d'accélération du rotor. Si la vitesse du vent continue à rester élevée, l'efficacité aérodynamique du rotor peut être réduite en modifiant l'angle de calage, ce qui réduit la vitesse du rotor.
- **commande passif de l'angle de calage** : En cas de contrôle passif la vitesse du vent est utilisée pour fournir la puissance d'actionnement, ce qui permet d'ajuster l'angle des pas des pales. Dans ces modèles d'éoliennes, les effets des changements dans la vitesse du rotor ou la vitesse du vent sont liés aux changements de l'angle d'inclinaison des pales.

L'action de l'air en mouvement va se traduire par des forces appliquées en chaque point de la surface. Les pales ont un profil aérodynamique présenté sur le schéma de la Figure(1.9) :

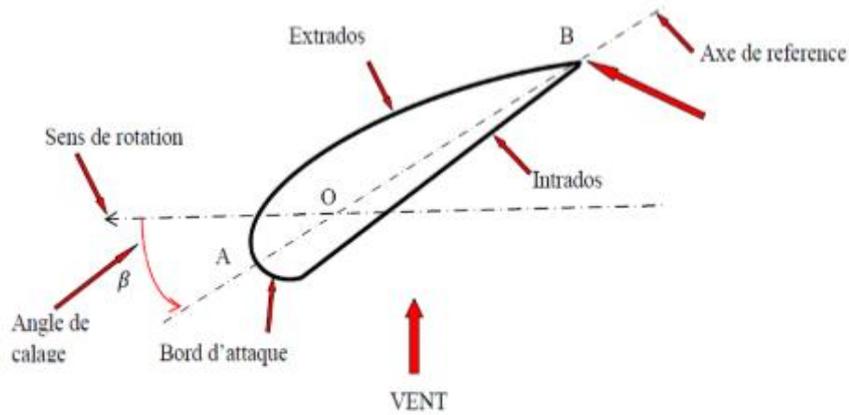


Fig.II. 30 : Eléments caractéristiques d'une pale

On remarque plus particulièrement les éléments suivants :

- Corde : longueur l du profil du bord d'attaque au bord de fuite.
- Angle de calage β (inclinaison de l'axe de référence par rapport au plan de rotation).
- Extrados : dessus des pales
- Intrados : dessous des pales.

Les profils sont généralement de type plan-convexe (l'intrados est plan alors que l'extrados est convexe) ou alors biconvexe (l'intrados et l'extrados sont convexes). Ils sont normalisés et les paramètres sont bien définis.

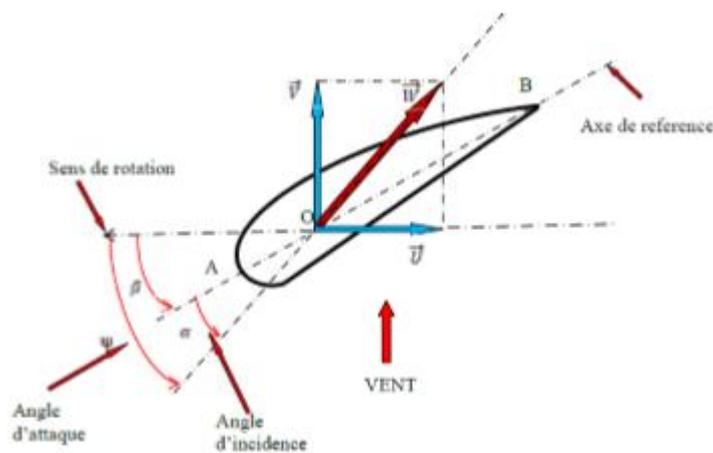


Fig.II. 31 : Directions du vent sur un tronçon de pale

II.2.8 Effort sur une pale d'éolienne :

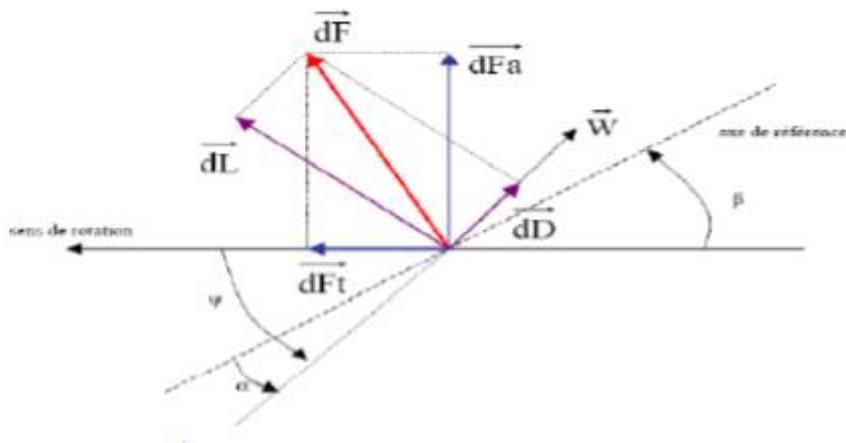


Fig.II. 32 : Forces appliquées sur un tronçon de pale

On peut décomposer la force résultante \vec{dF} de la manière suivante :

- ❖ La portance \vec{dL} , normale à la direction du vent apparent.
- ❖ La force de traînée \vec{dD} , parallèle à la direction du vent.

On peut aussi la décomposer d'une autre manière :

- ❖ La poussée axiale \vec{dFa} , perpendiculaire au plan de rotation.
- ❖ La poussée tangentielle \vec{dFt} , dans la direction de rotation.

II.2.9 Relation du coefficient de puissance avec l'angle de calage et la vitesse relative :

Une relation empirique entre (coefficient de puissance du rotor), la vitesse relative λ et angle d'inclinaison β est utilisé pour l'élaboration d'une table de consultation qui fournit une valeur de C_p pour une valeur donnée de la vitesse du vent et la vitesse relative. Angle d'inclinaison des pales peut être défini comme l'angle entre le plan de rotation et de pale ligne de corde. Vitesse de pointe rapport est défini comme le rapport de la vitesse linéaire de la lame à pointe à la vitesse du vent.

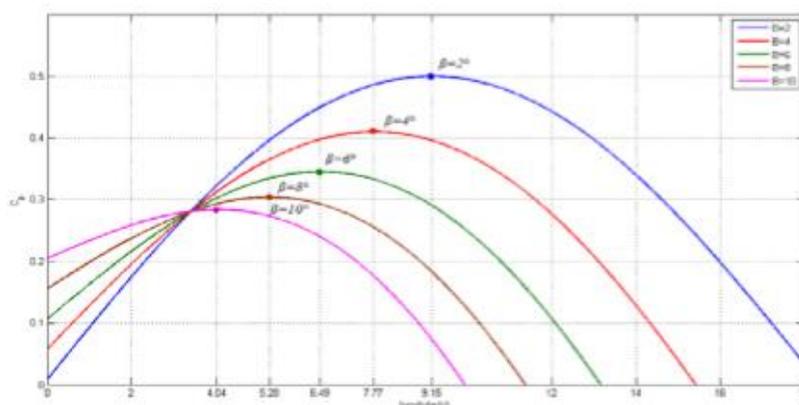


Fig.II. 33 : caractéristiques $C_p=f(\lambda)$ pour cinq valeurs de β

II.3 Poursuite du point de Maximum de Puissance (Maximal Power Point Tracking, MPPT)

Un dispositif « MPPT », de l'anglais Maximum Power Point Tracking correspond à une stratégie de gestion permettant de suivre le point de puissance maximale d'un générateur

électrique non linéaire. Les systèmes MPPT sont généralement associés avec les générateurs éoliens à travers une électronique de puissance permettant de maximiser l'efficacité énergétique du système à travers la variation de la vitesse du vent.

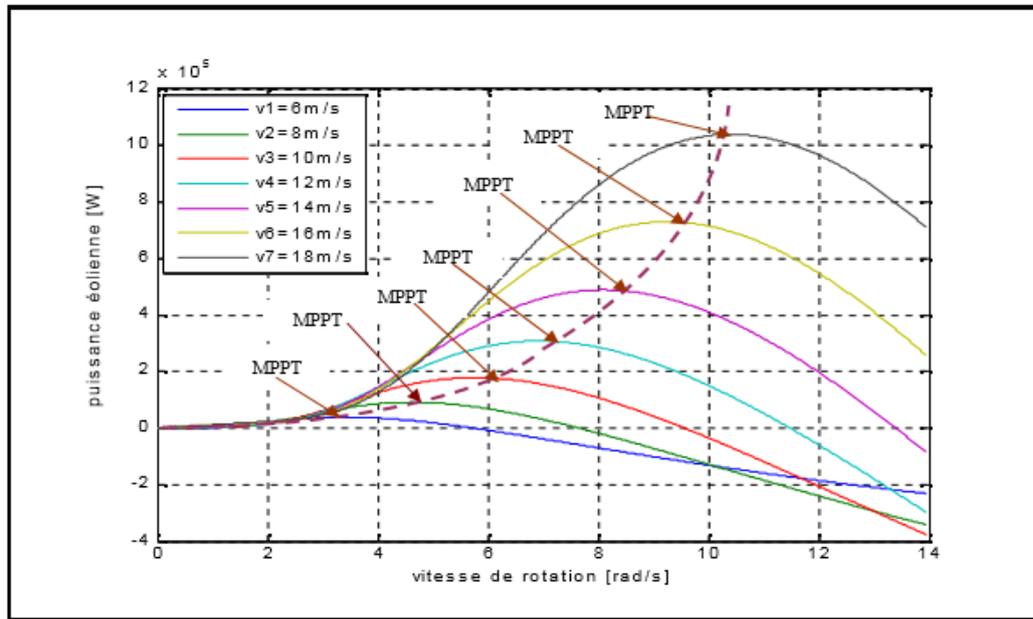


Fig.II. 13 : Points de MPPT d'une éolienne tripale avec la vitesse de vent

Par exemple, la figure II.13 montre les extrema que poursuit la MPPT d'une éolienne de type tripale à vitesse du vent variable : la courbe de puissance en forme de cloche, typique des éoliennes et donnée pour chaque vitesse du vent, présente un point de puissance maximale. De plus en plus souvent, les génératrices sont donc reliées à un convertisseur électronique de puissance contrôlé qui permet de réaliser cette fonction. De nombreux concepts ont été introduits pour parvenir à poursuivre efficacement le point de puissance maximum pour le « grand éolien ».

II.4 Production optimale d'énergie

Dans un système de production d'énergie par éolienne fonctionnant à vitesse variable, on cherchera systématiquement le régime optimal en exploitant les maxima du réseau. Ce qui signifie que pour un régime de fonctionnement donné (vitesse du vent fixe) on souhaite que la puissance fournie soit maximale ce qui correspond à une valeur de λ donnée appelée λ_{opt} . La vitesse de rotation optimale Ω_{opt} résultante est alors donnée par :

$$\Omega_{opt} = \frac{\lambda_{opt}}{R} \cdot v \quad (II.19)$$

La caractéristique correspondant à cette relation est donnée sur la zone II de la Figure 1-14. La zone I correspond aux vitesses de vent très faibles, insuffisantes pour entraîner la rotation de l'éolienne, et la zone III correspond aux vitesses de vent élevées pour lesquelles la vitesse de rotation de l'éolienne est limitée à une valeur maximale afin de ne pas subir de dégâts.

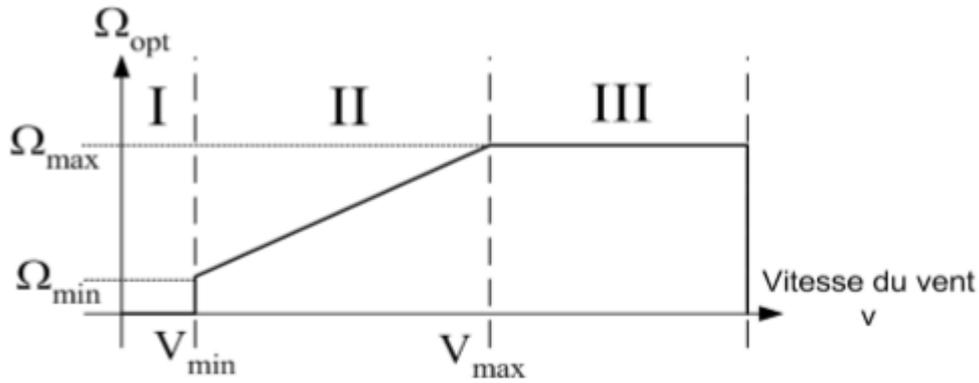


Figure I. 34 : Loi de commande optimale d'une éolienne à vitesse variable

La génératrice fournit alors de l'énergie électrique à fréquence variable et il est nécessaire d'ajouter une interface d'électronique de puissance entre celle-ci et le réseau (Figure 1-15). Cette interface est classiquement constituée de deux convertisseurs (un redresseur et un onduleur) connectés par l'intermédiaire d'un étage à tension continue. L'onduleur coté réseau est alors découplé de la machine via le bus continu et il n'y a pas de lien direct entre la fréquence du réseau et celle délivré par la machine. Un tel dispositif doit cependant être conçu et commandé de façon à limiter les perturbations qu'il est susceptible de générer sur le réseau. En effet, la tension délivrée n'est pas sinusoïdale et peut contenir des harmoniques indésirables. De plus, les convertisseurs sont dimensionnés pour faire transiter la totalité de la puissance échangée entre la génératrice et le réseau, ils représentent par conséquent un investissement financier et conduisent à des pertes non négligeables.

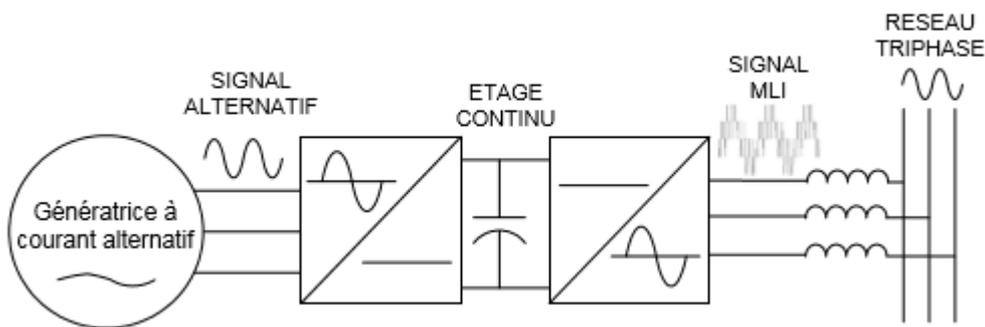


Figure I. 35: interface d'électronique de puissance

II.5 Modélisation du système éolien

II.5.1 Présentation du système

Le système de conversion de l'énergie éolienne est un système complexe à cause de la multiplicité des domaines existants, à savoir, le domaine aérodynamique, mécanique, électrique et les facteurs déterminant la puissance mécanique, comme la vitesse du vent, la dimension et la forme de la turbine.

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

La partie mécanique de la turbine qui sera étudiée comprend trois pales orientables et de longueur R . elles sont fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse $\Omega_{turbine}$ qui est relié à un multiplicateur de gain G . ce multiplicateur entraîne une génératrice électrique.

II.5.2 Hypothèse simplificatrices pour la modélisation de la turbine

On peut ainsi aboutir à un modèle mécanique plus simple (Fig. III.10).

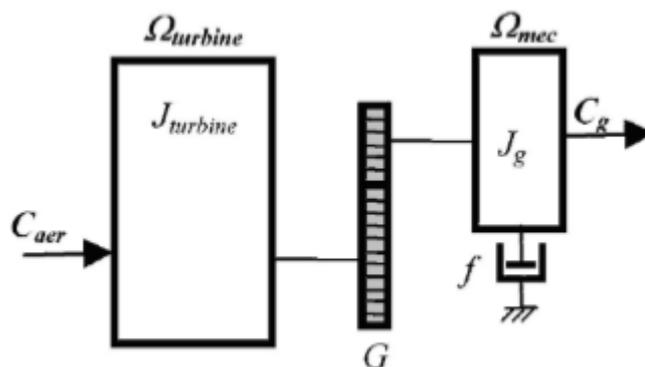


Fig.II. 36 Modèle mécanique simplifié de la turbine

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

- ✓ La vitesse du vent est supposée à répartition uniforme sur toutes les pales, ce qui permet de considérer l'ensemble des pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de tous les systèmes mécaniques.
- ✓ Le coefficient de frottement des pales par rapport à l'aire (db) est très faible et peut être ignoré.
- ✓ Les pertes par frottement du rotor turbine sont considérées négligeables par rapport aux pertes par frottement du côté génératrice

II.5.3 Modélisation de la turbine

Le dispositif qui est étudié ici, est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur R entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain G (Fig. II.16).

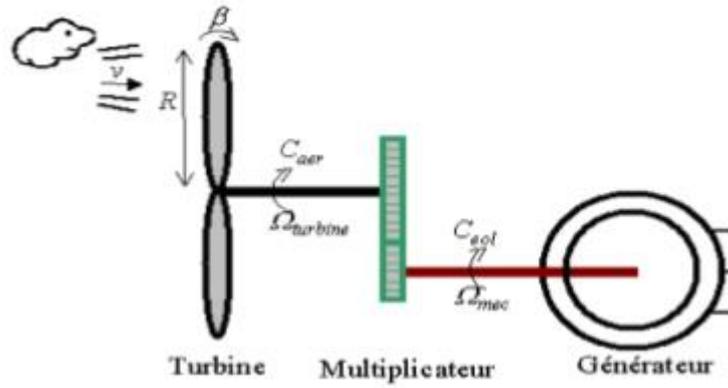


Fig.II. 37 schéma de la turbine éolienne.

Les variables d'entrée et de sortie de la turbine éolienne peuvent se résumer comme suit :

- 1- La vitesse du vent qui détermine l'énergie primaire à l'admission de la turbine.
- 2- Les quantités spécifiques de la machine, résultantes particulièrement de la géométrie du rotor et la surface balayée par les pales de la turbine.
- 3- La vitesse de la turbine, l'inclinaison des pales et l'angle de calage. Les quantités de sortie de la turbine sont la puissance ou le couple qui peuvent être contrôlés en variant les quantités d'entrées précédentes.

L'organigramme de simulation de la turbine peut être représenté comme suit :

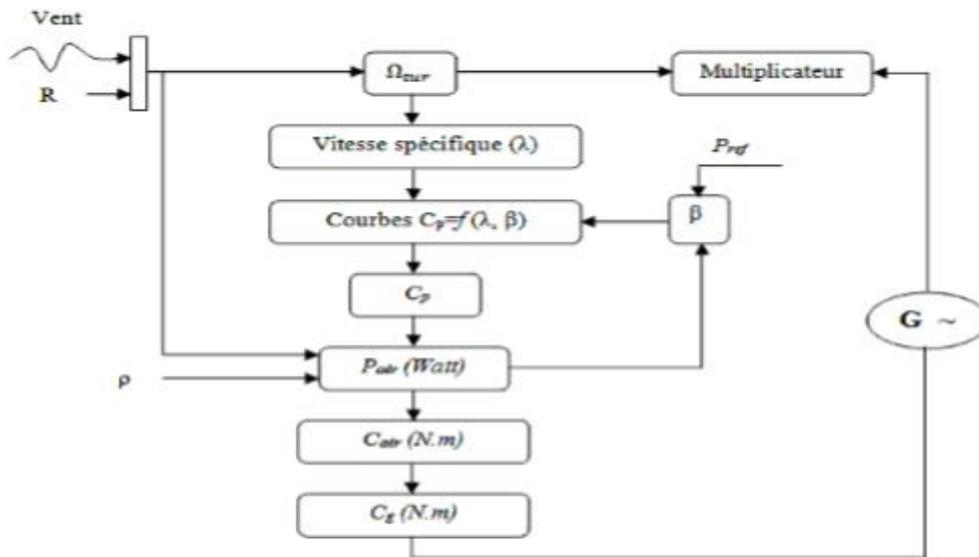


Fig. II. 38 Organigramme de simulation de la turbine éolienne

II.5.3.1 Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice et le couple aérodynamique en couple du multiplicateur (Fig.II.17). Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes:

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \quad (II.20)$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (II.21)$$

II.5.3.2 Equation dynamique de l'arbre

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie $J_{turbine}$ 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.

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \quad (II.22)$$

Il est à noter que l'inertie du rotor de la génératrice est faible par rapport à l'inertie de la turbine reportée par cet axe. L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évaluation de la vitesse mécanique à partir de la turbine du couple mécanique totale (C_{mec}) appliqué au rotor:

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (II.23)$$

J : L'inertie totale ramenée sur l'arbre de la génératrice, comprenant les inerties de la turbine, de la génératrice, des deux arbres et de multiplicateur ;

f : Le coefficient de frottement total du couplage mécanique ;

Le couple mécanique déduit de cette représentation simplifiée est la somme de tous les couples appliqués sur le rotor :

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_f \quad (II.24)$$

C_{em} : Le couple électromagnétique développé par la génératrice ;

C_g : Le couple issu du multiplicateur ;

C_f : Le couple résistant dû aux frottements ;

$$C_f = f\Omega_{mec}$$

Les variables d'entrée de l'arbre de transmission sont donc : le couple issu du multiplicateur C_g et le couple électromagnétique C_{em}

En se basant sur ce qui a précédé, la turbine d'une éolienne à axe horizontal à vitesse variable peut être modélisée comme le montre le schéma bloc de la figure (Fig. II.19).

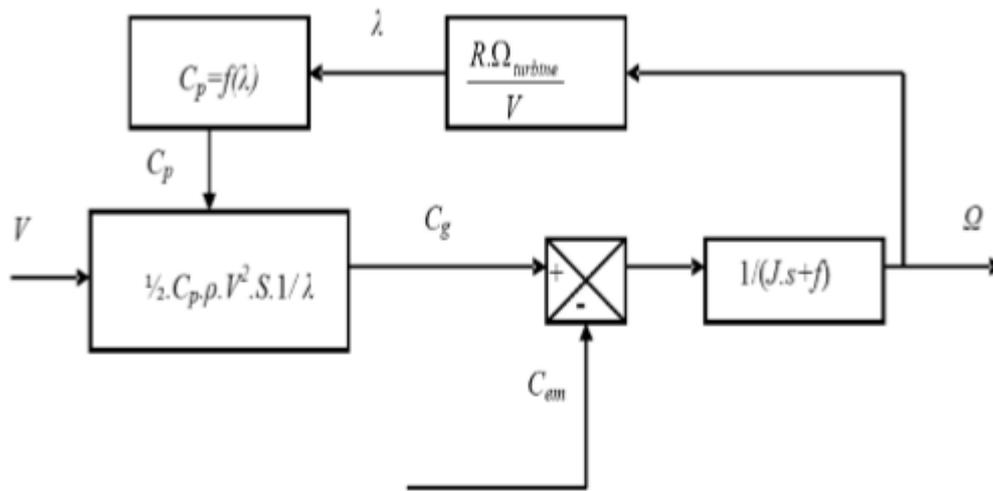


Fig. II. 39 Schéma bloc d'une turbine éolienne à vitesse variable.

II.6 Conclusion

Nous avons détaillé dans ce chapitre une modélisation de la partie mécanique de l'éolienne prenant en compte les caractéristiques du profil du vent et des pales utilisées et l'angle de calage. Les stratégies de fonctionnement d'une éolienne (vitesse fixe, vitesse variable) sont également décrites. Nous avons pu valider le model de notre turbine, ce qui nous permettra de l'utiliser par la suite.

Chapitre III

Modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents

Introduction

Les alternateurs triphasés sont la source primaire de toute l'énergie électrique. Entraînées par des turbines hydrauliques, à vapeur ou éoliennes, ces machines constituent les plus gros convertisseurs d'énergie au monde. Elles transforment l'énergie mécanique en énergie électrique avec des puissances allant jusqu'à 1500 MW.

Dans notre étude nous allons nous intéresser à une éolienne à vitesse variable utilisant une génératrice synchrone à aimants permanents. Ce choix n'est pas fortuit puisqu'il est basé sur les avantages technologiques et économiques qu'offre la MSAP comparée aux autres machines.

L'utilisation des aimants permanents a été une vraie révolution dans le domaine de l'utilisation de ces machines, car elle a permis d'éliminer le bobinage rotorique et son excitation ainsi que les balais et les contacts glissants. Ce qui induit moins de maintenance et plus de robustesse pour la machine. Cet avantage a couvert le coût élevé des aimants.

Le progrès technologique dans le domaine de l'électronique de puissance a également conduit vers un progrès important dans les performances globales des entraînements à vitesse variable, ce qui facilite l'autopilotage de la machine synchrone la rendant ainsi très performante comparée la machine asynchrone et celle à courant continu.

Mais l'avantage le plus important de ces machines dans le domaine éolien est l'absence de multiplicateur de vitesse pour des machines de grand nombre de paires de pôles, réduisant ainsi le volume de l'éolienne et la maintenance du système.

III.1. Description

L'alternateur est formé d'un stator fixe, et d'un rotor tournant. Le stator ou induit se compose d'un noyau feuilleté ayant la forme d'un cylindre vide et comportant des encoches dans lesquelles sont logés les conducteurs d'un enroulement triphasé à $2p$ pôles. Les bobines constituant cet enroulement sont décalées de $\frac{2\pi}{2}$ et toujours raccordées en étoile et le neutre est accessible pour permettre sa mise à la terre. Le rotor ou inducteur 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 est soit à pôles saillants ou à pôles lisses.

Le nombre de pôles d'un alternateur est imposé par la vitesse du rotor et par la fréquence du courant à produire. Ainsi, considérons un conducteur de l'induit devant lequel se déplacent les pôles nord et les pôles sud du rotor. Si la tension induite dans ce conducteur rend une série de valeurs positives pendant le passage d'un pôle nord, elle prendra une série de valeurs égales, mais négatives, pendant le passage d'un pôle sud. Chaque fois qu'une paire de pôles se déplace devant un conducteur, la tension induite

décrit donc un cycle complet. On en déduit que la fréquence est donnée par l'équation :

$$f = \frac{pn}{120}$$

Il existe quatre catégories de machines synchrones à aimants permanents du point de vue

Construction mécanique :

- ✓ Les Machines synchrones à aimants permanents montés en surface
- ✓ Les machines synchrones à aimants permanents insérés
- ✓ Les machines synchrones à aimants permanents chapeautés
- ✓ Les machines synchrones à aimants permanents enterrés

III.2. Principe de fonctionnement d'une génératrice synchrone

L'inducteur de la génératrice synchrone, entraîné mécaniquement, crée un champ à répartition spatiale variable dans les bobinages statoriques. Les f.e.m induites dans ces bobinages provoquent la circulation de courants induits qui créent à leur tour un champ statorique dans l'entrefer, qui tourne à la même vitesse que celle du champ inducteur.

III.3. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents

La modélisation des machines est essentielle aussi bien, pour le concepteur que pour l'automaticien. Elle est généralement utilisée pour l'analyse du comportement du système. Les machines à courant alternatifs sont en générale, modélisées par des équations non linéaires (équation différentielles). Cette non linéarité est due aux inductances et coefficients des équations dynamiques qui dépendent de la position rotorique et du temps. Une transformation triphasée – biphasé nécessaire pour simplifier le modèle (réduire le nombre des équations).

III.3.1 Les hypothèses simplificatrices

. Pour une représentation plus simple nécessite l'introduction des hypothèses simplificatrices suivantes :

- Caractéristique magnétique de la machine linéaire.
- Symétrie de la machine.
- Alimentation par un système de tensions triphasées, symétriques et sinusoïdales.
- Répartition sinusoïdale dans l'entre fer.
- L'influence des pièces polaires

III.3.2 Modèle en ABC

Les équations électriques

Equations des tensions des enroulements statoriques et rotoriques :

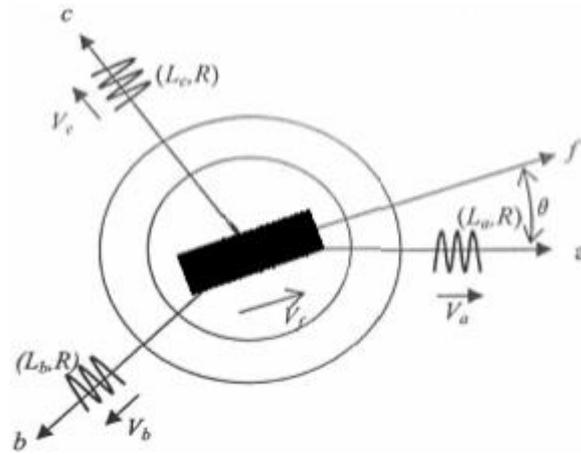


Fig.III. 40 : Modèle de la machine synchrone à aimant permanent en abc

$$\begin{cases} v_a = R.i_a + \frac{d}{dt} \Psi_a \\ v_b = R.i_b + \frac{d}{dt} \Psi_b \\ v_c = R.i_c + \frac{d}{dt} \Psi_c \end{cases} \quad (III.1)$$

On désigne par ψ_a , ψ_b , ψ_c les flux totaux qui traversent les enroulements (a, b, c), et par i_a , i_b , i_c les courants qui circulent dans ces enroulements.

III.3.3 MODELE BIPHASE (TRANSFORMATION DE PARK)

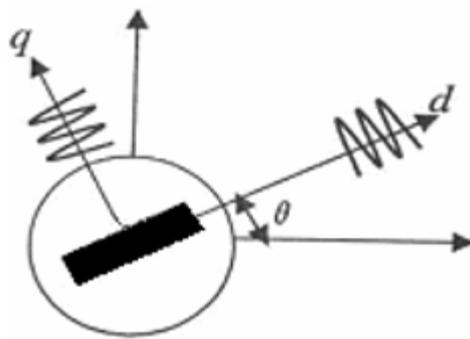


Fig.III-41 : Modèle de la machine en biphasé

A l'aide de transformation de PARK on passe de grandeurs réelle (V_a, V_b, V_c) et (i_a, i_b, i_c) à leurs composantes (V_0, V_d, V_q) et (i_0, i_d, i_q).

La matrice de PARK s'exprime par :

$$[P_3(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos \theta & -\sin \theta \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta - 4\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \end{bmatrix} \quad (\text{III.2})$$

Si le neutre de la machine synchrone est isolé (non relié à la terre) alors :

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (\text{III.3})$$

Dans ce cas la composante homopolaire est nulle. La matrice de transition de PARK devient alors :

$$[P_2(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 4\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \end{bmatrix} \quad (\text{III.4})$$

Et sa matrice inverse sera exprimée par :

$$[P_2(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \end{bmatrix} \quad (\text{III.5})$$

Equations électriques :

La figure II-6 représente les trois enroulements statoriques fixes, et le rotor à aimants permanents.

On a :

$$[V_{dq}] = [P_2(\theta)] \cdot [V_s] \quad (\text{III.6})$$

$$[i_{dq}] = [P_2(\theta)]^{-1} \cdot [i_s] \quad (\text{III.7})$$

Tel que :

$$\begin{bmatrix} V_{dq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} i_{dq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \begin{bmatrix} V_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} i_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.8})$$

Après simplification on aura :

$$V_d = R_s \cdot i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \psi_q \cdot \omega_r \quad (\text{III.9})$$

$$V_q = R_s \cdot i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \psi_d \cdot \omega_r \quad (\text{III.10})$$

Avec

$$\psi_d = L_d \cdot i_d + \psi_f \quad (\text{III.11})$$

$$\psi_q = L_q \cdot i_q \quad (\text{III.12})$$

ψ_f : Flux des aimants permanents.

Les relations (II-9) et (II-10) deviennent alors :

$$V_d = R_s \cdot i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - L_q \cdot i_q \cdot \omega_r \quad (\text{III.13})$$

$$V_q = R_s \cdot i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + (L_d \cdot i_d + \Phi_f) \cdot \omega_r \quad (\text{III.14})$$

III.3.4 EXPRESSION DU COUPLE ELECTROMAGNETIQUE

L'expression générale du couple électromagnétique est :

$$C_{em} = \frac{1}{2} \cdot [i_s] \cdot \left\{ \frac{d}{d\theta_m} [L] \right\} \cdot [i_s] \quad (\text{III.15})$$

Avec $\theta_e = p \cdot \theta_m$

θ_e : L'angle électrique

θ_m : L'angle mécanique

P ; nombre de pair de pôles

Après développement et simplification on trouve :

$$C_{em} = p.(\Phi_d i_q - \Phi_q i_d) \quad (III.16)$$

En remplaçant ϕ_d et ϕ_q par leurs valeurs on trouve :

$$C_{em} = p.((L_d - L_q).i_d + \Phi_f).i_q \quad (III.17)$$

III.3.5 L'EQUATION MECANIQUE

L'équation mécanique s'écrit :

$$J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega = C_{em} - C_r \quad (III.18)$$

$$\Omega = \frac{\omega r}{p} \quad (III.19)$$

ωr : Vitesse angulaire (pulsation électrique)

Ω : Vitesse mécanique.

C_r : Couple de charge.

J : Moment d'inertie de la partie tournante.

f : Coefficient de frottement visqueux

III.4. Commande vectorielle de la MSAP

Parmi les stratégies de commande vectorielle appliquées à la machine synchrone, celle qui consiste à imposer une référence du courant direct à zéro est la plus répandue. Cela permet de simplifier l'expression du couple électromagnétique de l'équation C_{em} en une expression linéaire donnée par :

$$C_{em} = k_t. i_q \quad (III.20)$$

Ce dernier est alors réglé en agissant sur le courant en quadrature i_q

Pour pouvoir appliquer la commande vectorielle nous devons :

- ✓ poser une référence $i_{dref} = 0$
- ✓ poser $C_{emref} = Cte. \Omega^2$
- ✓ poser une référence $i_{qref} = \frac{C_{emref}}{k_t}$

III.4.1 Commande vectorielle avec découplage de la régulation des courants par compensation

Afin de justifier le recours à la commande vectorielle avec découplage de la régulation des courants par compensation, examinons d'abord le modèle de la machine synchrone dans le plan de Park qui est donné par les équations (III.21-III.22)

$$v_d = R_s \cdot i_d + L_d \cdot \frac{di_d}{dt} - \omega_r \cdot \phi_q \quad (\text{III.21})$$

$e_q = \omega_r \cdot \phi_q$: f.e.m de la machine sur l'axe q

$$v_q = R_s \cdot i_q + L_q \cdot \frac{di_q}{dt} + \omega_r \cdot \phi_d \quad (\text{III.22})$$

$e_d = \omega_r \cdot \phi_d$: f.e.m de la machine sur l'axe d

La commande vectorielle avec découplage de la régulation des courants par compensation permet de découpler les courants i_d et i_q et de permettre de faire la régulation adéquate à chacun des deux séparément. Cette commande nous mène à un modèle de la machine synchrone similaire à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée.

Les termes de couplage en $E_{d,q} = +\omega_r \cdot \phi_{d,q}$ sont considérés comme des perturbations mesurables. Ainsi la machine peut être représentée par la fonction de transfert suivante :

$$G_s(p) = \frac{1}{R_s + L_s p} = \frac{1}{R_s} \cdot \frac{1}{1 + T_e p} \quad (\text{III.23})$$

Avec

$T_e = \frac{L_s}{R_s}$: La constante de temps électrique

Si on tient compte de la perturbation, $G_s(p)$ sera sous la forme donnée en III.24, en vertu du théorème de superposition

$$G_s(p) = \frac{i_{d,q}(p)}{V_{d,q}(p) + E_{d,q}(p)} \quad (\text{III.24})$$

Afin d'imposer la référence du courant sur l'axe d égale à zéro on utilise un régulateur PI. La boucle de régulation du courant i_d est donnée par le schéma bloc suivant :

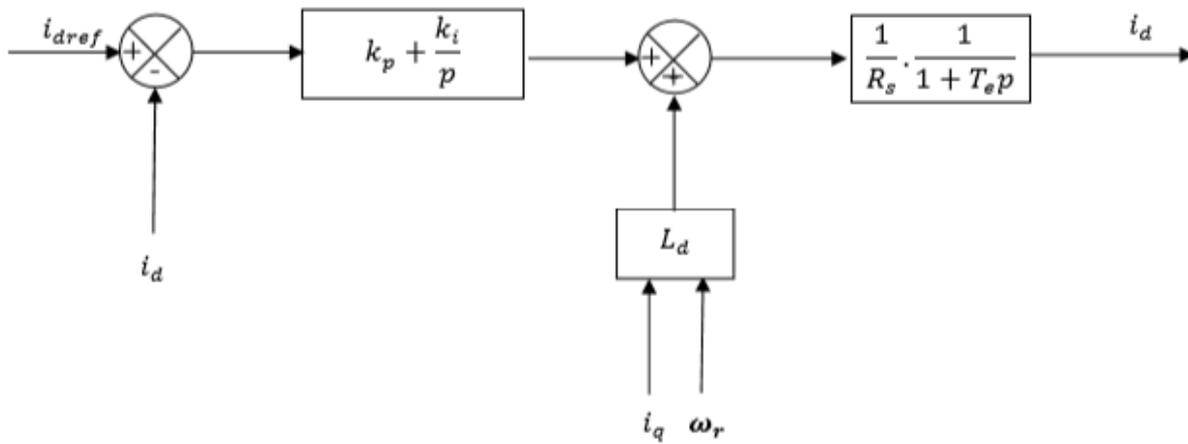


Figure III. 42 : Boucle de régulation du courant i_d

III.4.2 Calcul du régulateur PI

La fonction de transfert en boucle ouverte est donnée comme suit :

$$G_0(p) = \frac{k_{pd}p + k_{id}}{p} \cdot \frac{1}{R_s p + L_d} = \frac{k_{pd}p + k_{id}}{p} \cdot \frac{1}{R_s} \cdot \frac{1}{1 + T_e p} \quad (\text{III.25})$$

Enfin

$$G_0(p) = \frac{k_{pd}p + k_{id}}{p} \cdot \frac{G_0}{1 + T_e p} \quad (\text{III.26})$$

$T_e = \frac{k_p}{k_i}$: La constante de temps électrique

G_0 : Le gain statique

La fonction de transfert en boucle fermée est donnée par $G(p) = \frac{G_0}{1 + G_0(p)}$

Les paramètres du régulateur sont calculés par la méthode de placement de pôle

La fonction de transfert en boucle ouverte est :

$$G_{bo}(p) = \frac{k_p p + k_i}{p} \cdot \frac{1}{R_s} \cdot \frac{1}{1 + T_e p}$$

(III.27)

La fonction de transfert en boucle fermée est :

$$G_{bf}(p) = \frac{G_{bo}}{1 + G_{bo}p} = \frac{k_p p + k_i}{R p^2 + (L_q + k_p)p + k_i} \quad (\text{III.28})$$

$$k_p = \frac{2\xi_n k_i}{\omega_n} - J \quad (\text{III.29})$$

$$k_i = \omega_n^2 J$$

(III.30)

La boucle de régulation du courant i_q est donnée par le schéma bloc suivant :

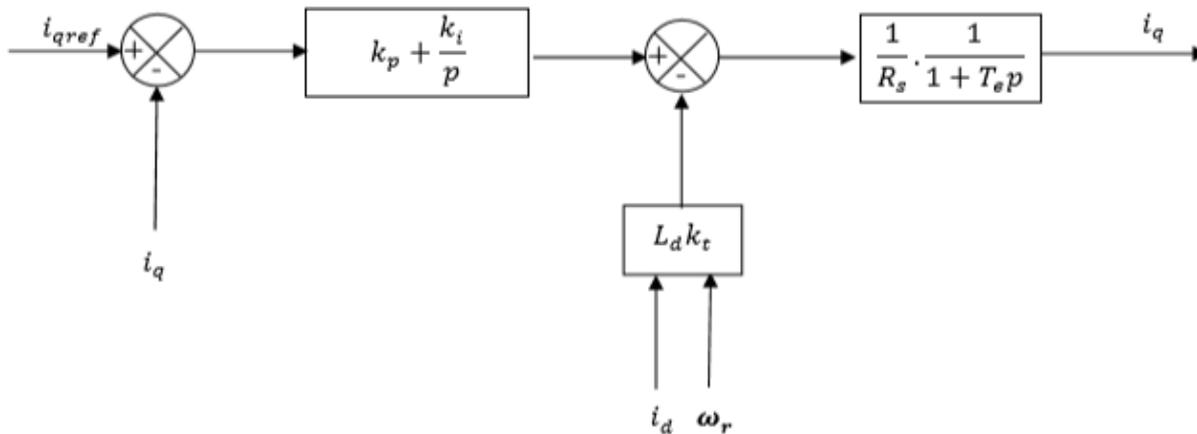


Figure III. 43 : Boucle de régulation du courant i_q

$$i_{qref} = \frac{Cem_{ref}}{k_t} = Cte. \frac{\Omega_t^2}{k_t}$$

(III.31)

$$Cem_{ref} = \frac{P_{éolimax}}{\Omega_t}$$

(III.32)

$$P_{éol} = \frac{1}{2} \cdot C_{pmax}(\lambda) \cdot \rho \cdot S \cdot v_v^2$$

$$S = \pi R^2$$

(III.33)

Si on remplace la puissance éolienne $P_{éol}$ et la surface active S , par leurs formules respectives, données en (III.33), on obtient :

$$Cte = \frac{\rho \cdot \pi \cdot R_t^5 \cdot C_{pmax}}{2 \cdot \lambda_{opt}^3}$$

(III.34)

III.5 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la présentation et la modélisation de la machine synchrone à aimants permanents. Nous avons présenté différentes structures concernant la construction de celle-ci du point de vue emplacement des aimants permanents. Nous avons ensuite présenté les équations régissant son fonctionnement, avec la commande vectorielle qui permet la modélisation d'une génératrice synchrone à aimants permanents.

Chapitre IV

Simulation du système éolien

Introduction

Afin de valider notre étude théorique de la chaîne de conversion d'énergie éolienne, la réalisation pratique ou, à défaut, la simulation du processus est nécessaire. La chaîne de conversion a été modélisée et simulée à l'aide du logiciel Matlab-Simulink.

Les convertisseurs électroniques présentés précédemment ont besoin, pour fonctionner, de recevoir des ordres de commande.

A l'aide du logiciel de simulation Matlab-Simulink, on transforme les équations qui constituent le modèle du processus à étudier en schémas bloc

IV.1- L'outil Matlab/Simulink

MATLAB fait partie d'un ensemble d'outils intégrés dédiés au traitement du Signal. En complément du noyau de calcul Matlab, l'environnement comprend des modules optionnels qui sont parfaitement intégrés à l'ensemble :

- Une vaste gamme de bibliothèques de fonctions spécialisées (Toolboxes).
- Simulink, un environnement puissant de modélisation basée sur les schémas-blocs et
- simulation des systèmes dynamiques linéaires et non linéaires.
- Des bibliothèques de blocs Simulions spécialisés (Blocksets).
- D'autres modules dont un Compilateur, un générateur de code C, un accélérateur.
- Un ensemble d'outils intégrés dédiés au Traitement du Signal : le DSP Workshop.

SIMULINK est une plate-forme de simulation multi-domaine et de modélisation des systèmes dynamiques.

Il fournit un environnement graphique et un ensemble de bibliothèques contenant des blocs de modélisation qui permettent le design précis, la simulation, l'implémentation et le contrôle de systèmes de communication et de traitement du signal.

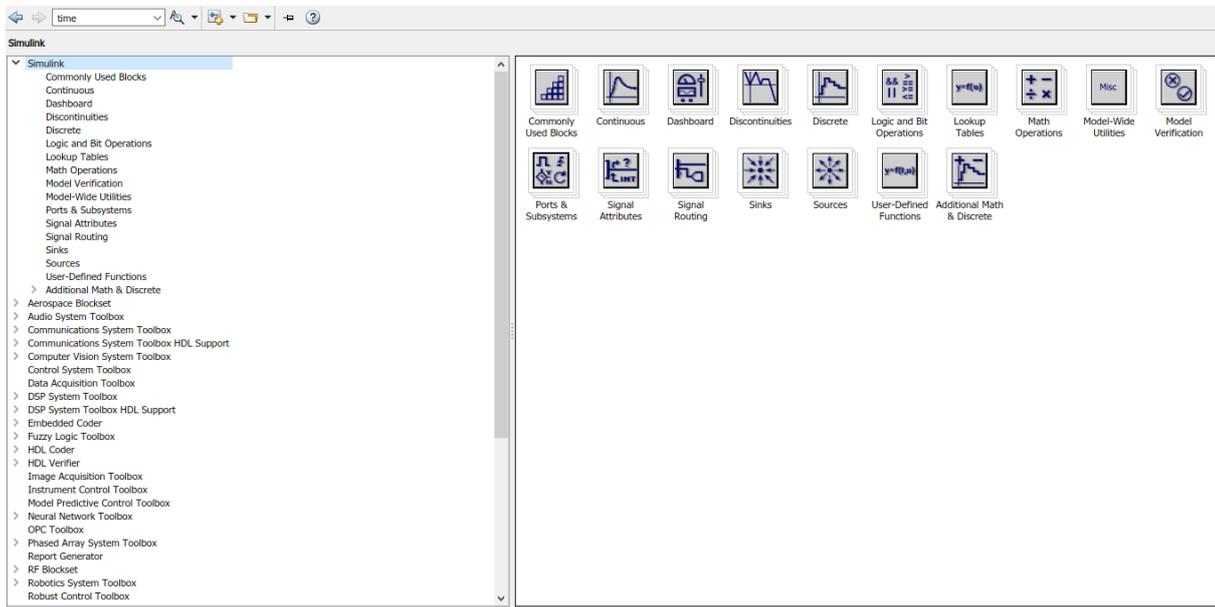


Fig.IV. 44: bibliothèque SIMULINK.

IV.2 Simulation de la chaine de conversion

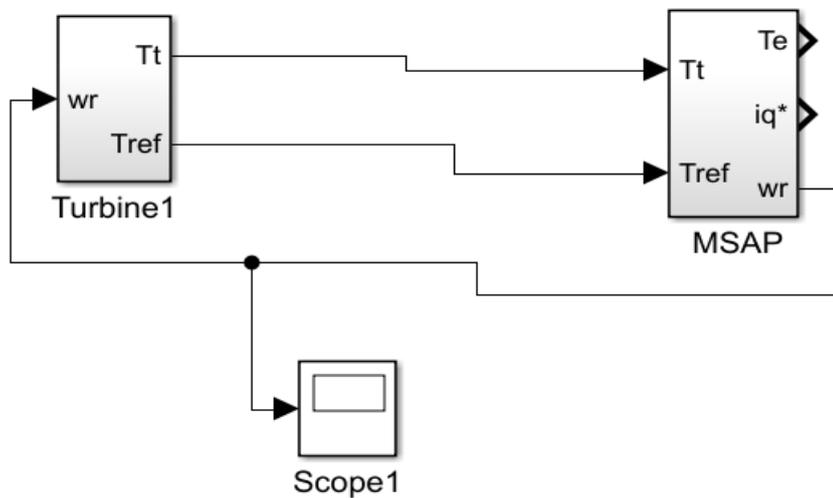


Fig.IV. 45 : schéma bloc de simulation de la chaine de conversion d'énergie éolienne

IV.2.1 La turbine

La turbine est entraînée par une MSAP, dont le schéma bloc correspondant à cette modélisation de la turbine est représenté dans la figure IV-3.

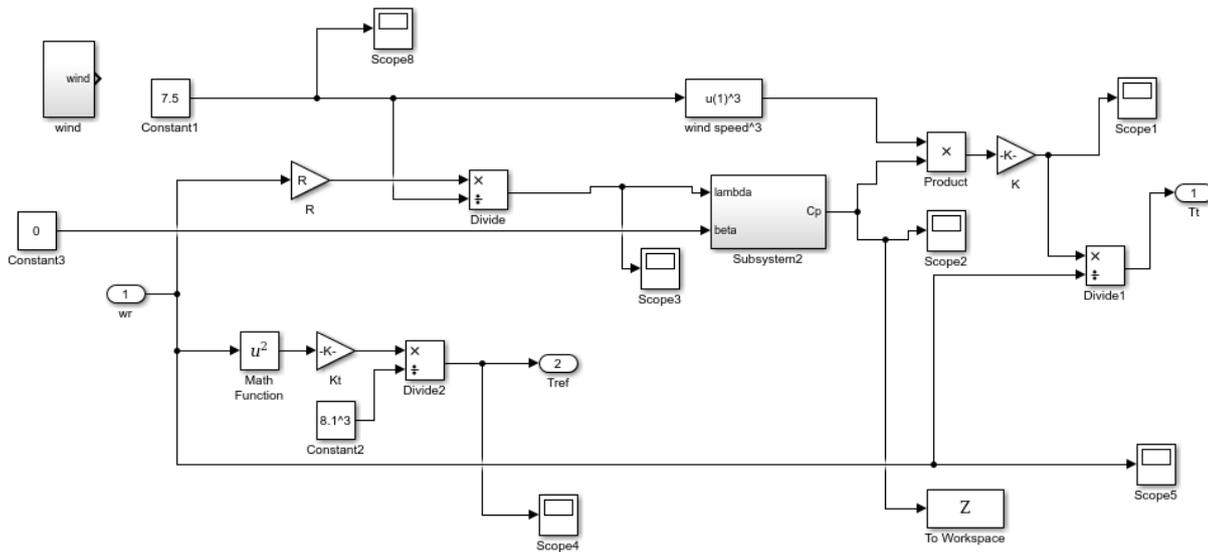


Fig.IV. 46: schéma bloc du modèle de la turbine

IV.2.2 La machine synchrone à aimant permanent

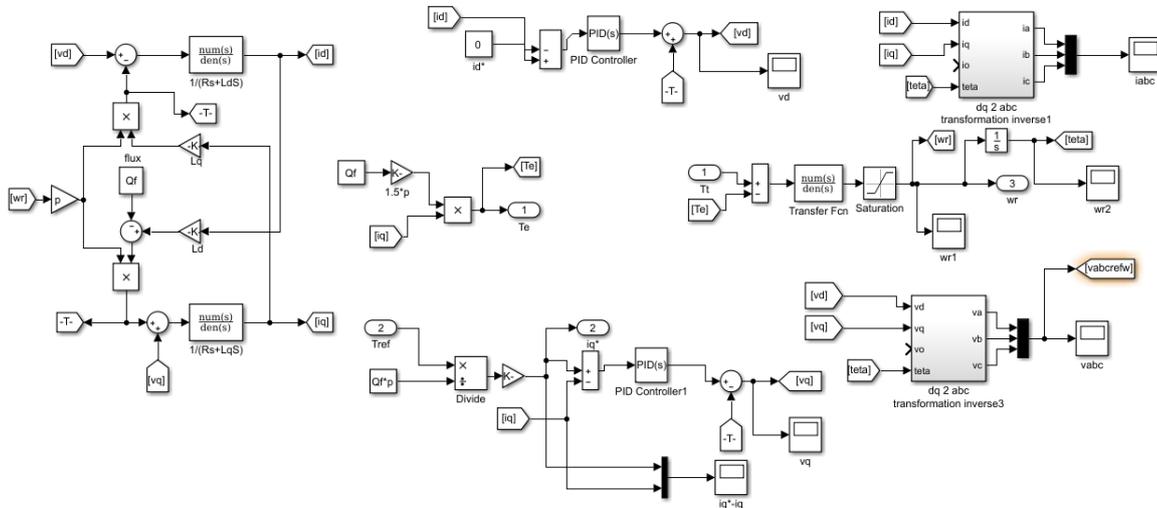


Fig.IV. 47 : schéma bloc du modèle de la machine

IV.2.3 Résultats de simulation

IV.2.3.1 Vitesse constante :

Nous avons connecté notre MSAP à une turbine à vitesse mécanique constante, égale à peu près à 25 rad/s, après un régime transitoire de 1.5 s (figure IV-5).

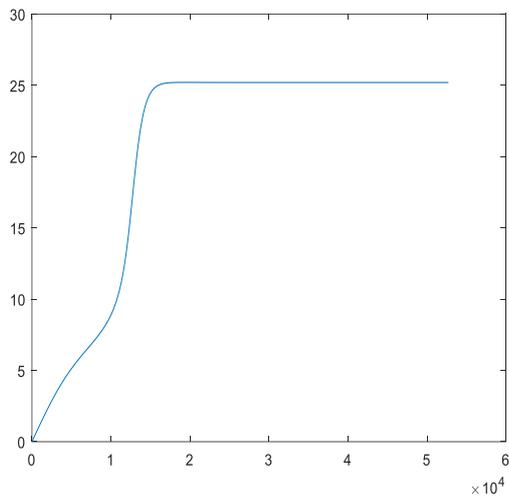


Fig.IV. 48: Vitesse mécanique de la turbine v_t [rad/s]

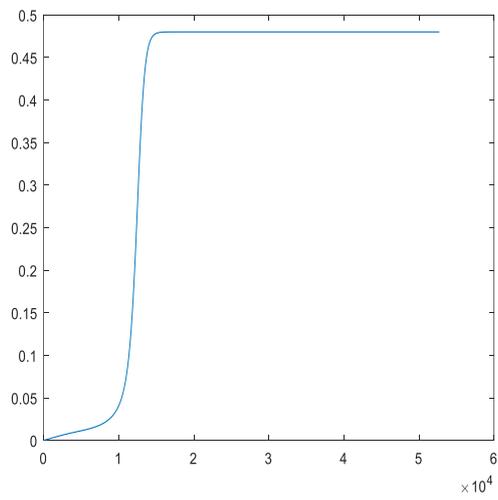


Fig.IV. 49 : le Coefficient de puissance

Les Fig. IV.5 présente la vitesse de rotation de la turbine et la Fig.IV.6 le coefficient de couple, ainsi les Fig. IV.7 et IV.8 présente le couple et la puissance à la sortie de la turbine à vide et pour une vitesse moyenne du vent égale à 7.5m/s.

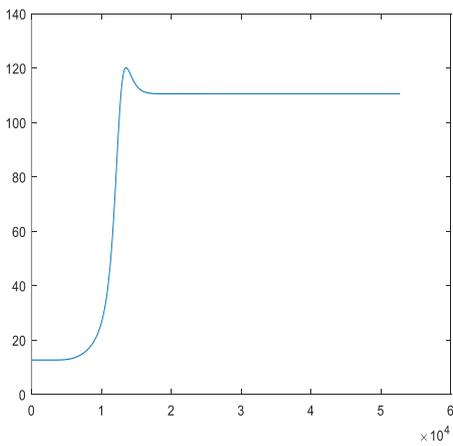


Fig.IV. 50 : le couple électromagnétique

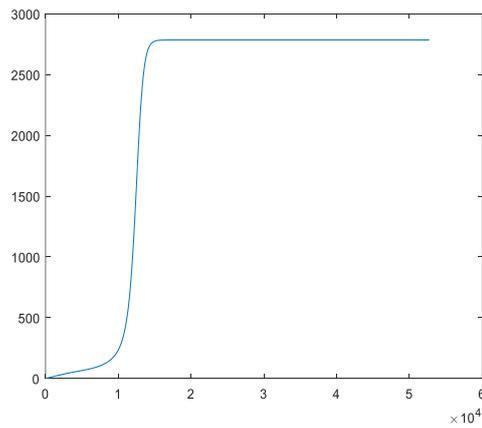


Fig.IV. 51 : la puissance mécanique

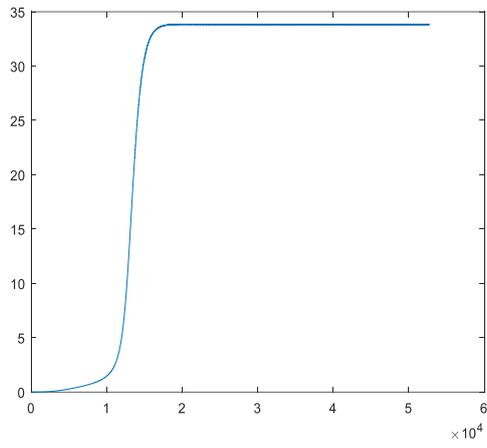


Fig.IV. 52 :tension direct Vd

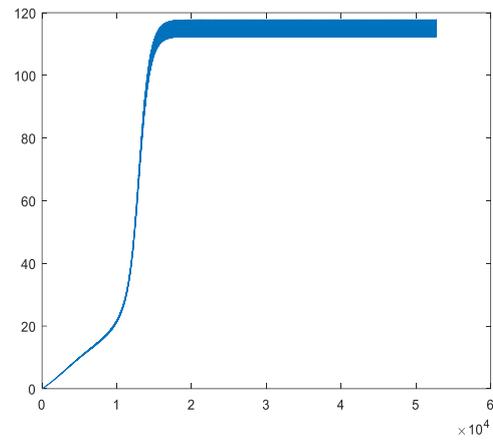


Fig.IV. 53 : tension de quadrature Vq

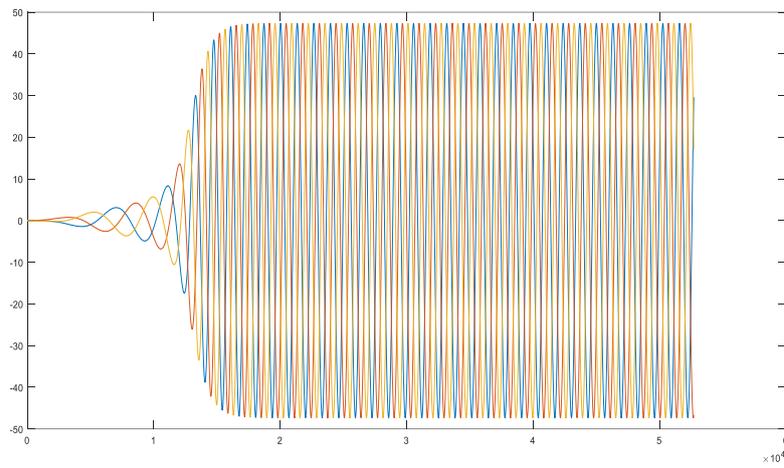
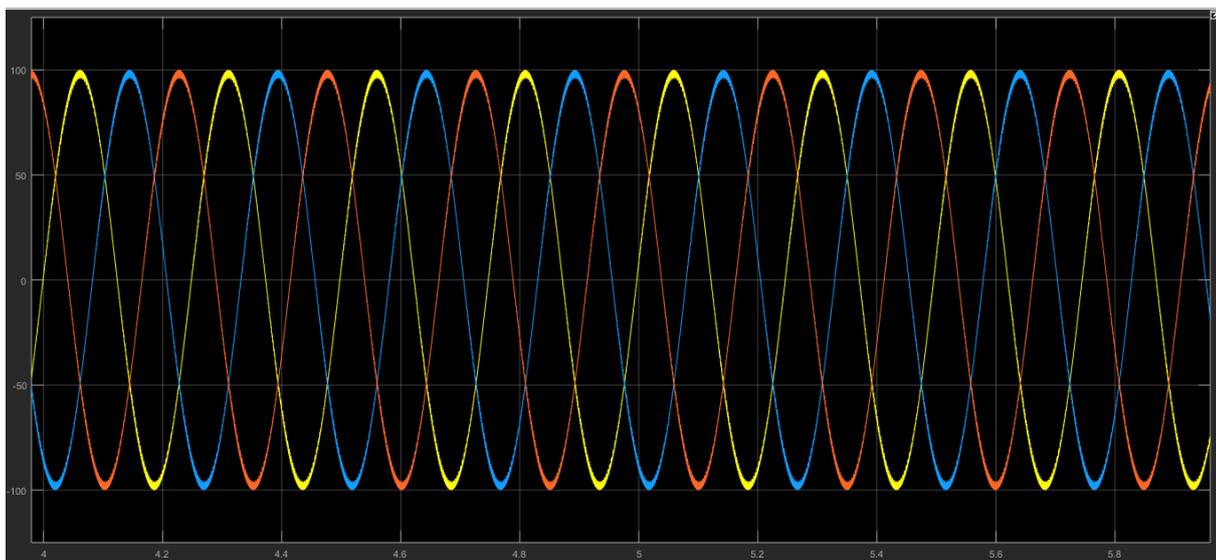


Fig.IV. 54 : Courants statoriques iabc



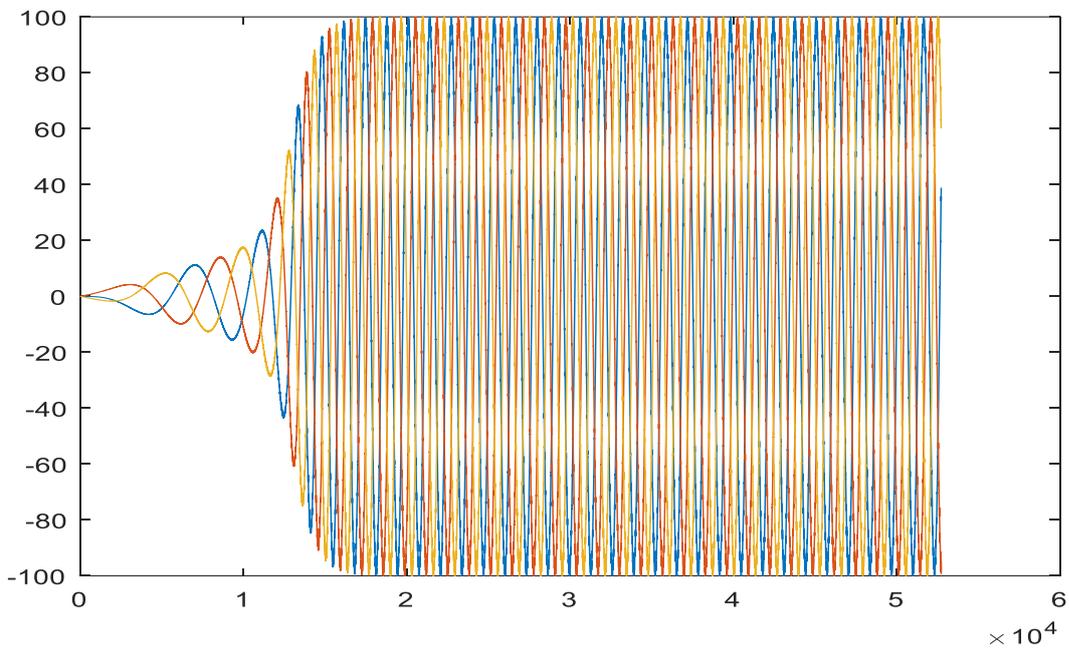


Fig.IV. 55 : Tensions statoriques Vabc

IV.2.3.2 Vitesse variable :

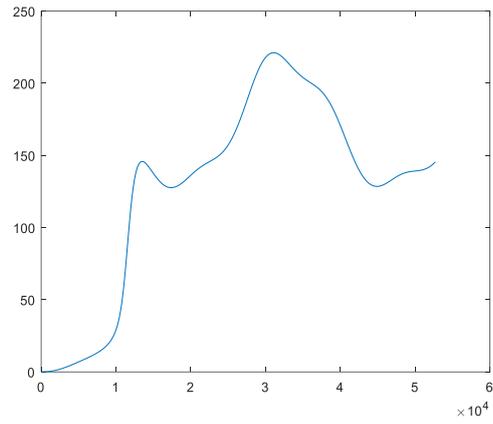
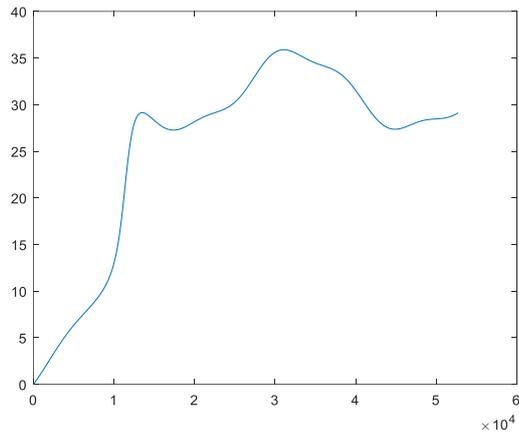


Fig.IV. 56 : la vitesse de la turbine(a)

(b) le couple électromagnétique

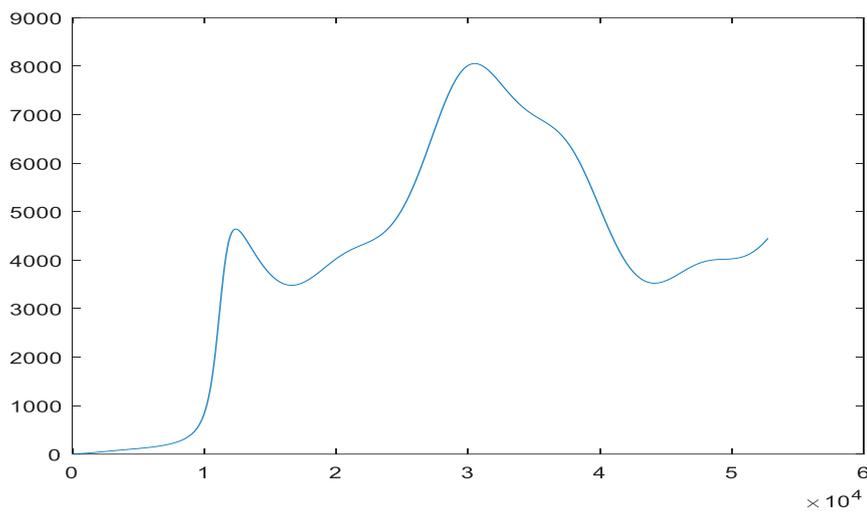


Fig.IV. 57 : la puissance

Les Figures IV-13 et IV.14 montrent que la vitesse et la puissance électrique en régime permanent ont une bonne adaptation aux variations de la vitesse du vent.

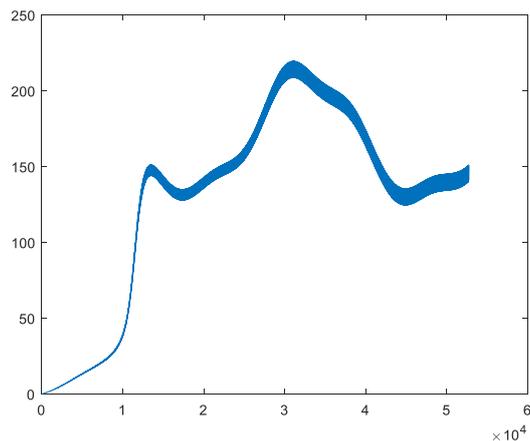
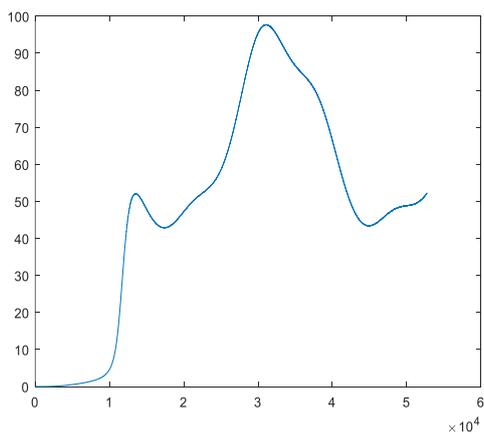
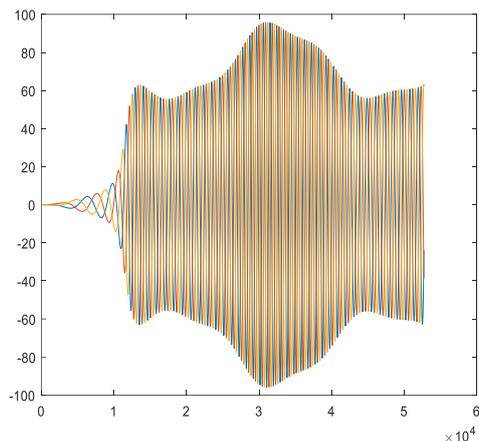


Fig.IV. 58 : composante Vd (a)



composante Vq (b)

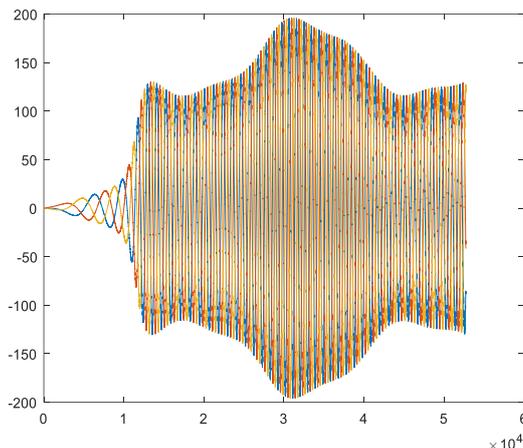


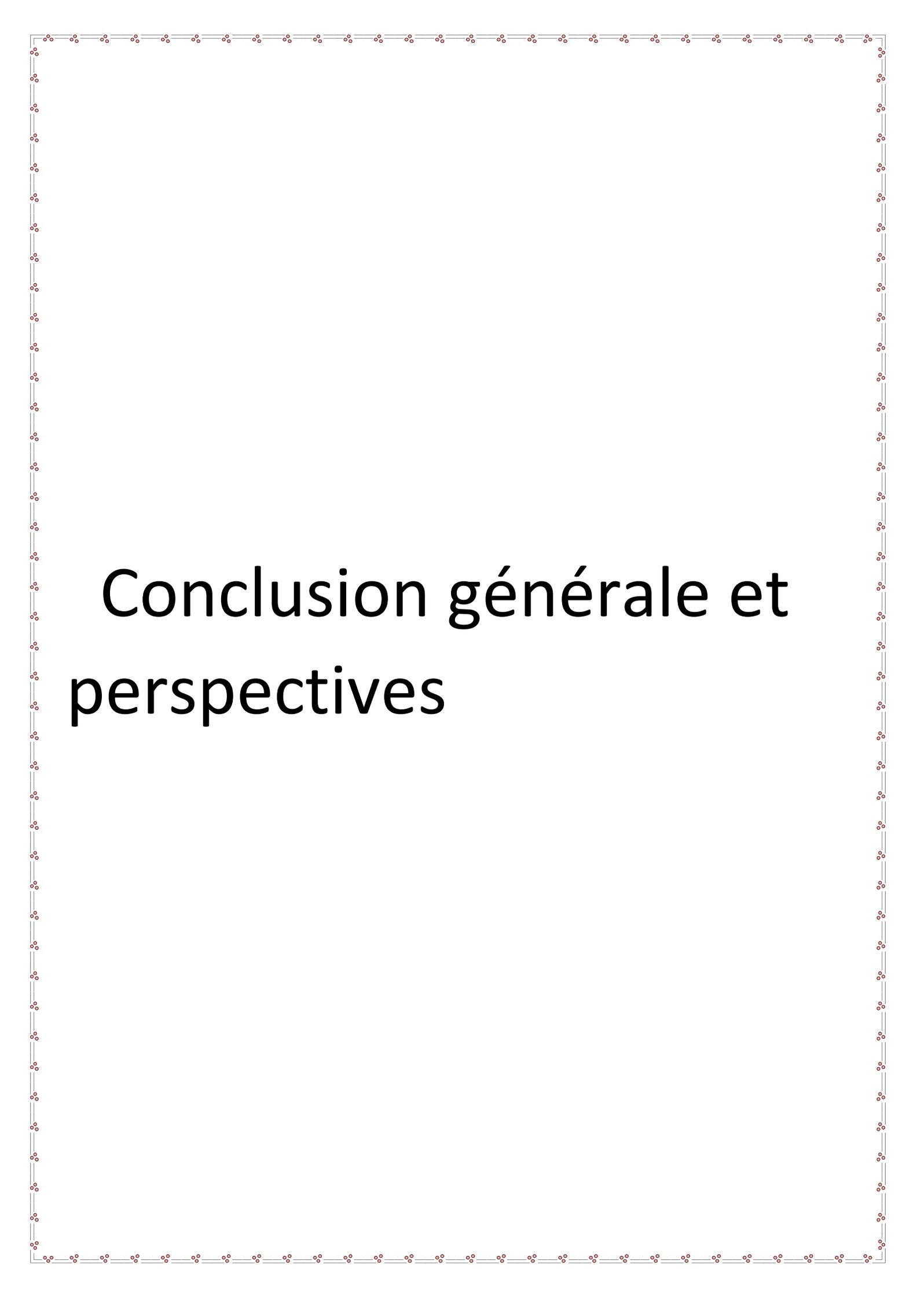
Fig.IV. 59 : courants statoriques iabc (e)

Tensions statoriques Vabc (f)

- Fig. IV.12(a) : vitesse de rotation, (b) : couple électromagnétique
- Fig.IV.13 : puissance mécanique
- Fig.IV.14 (a) : Composantes Vd, (b) : Composantes iq
- Fig.IV.15 (a) : courants statoriques iabc, (b) : Tensions statoriques Vabc

IV.3 Conclusion

L'essentiel de notre contribution est abordé dans le présent chapitre, à savoir la simulation de la chaîne de conversion. Les différents modèles étudiés sont conformes à la réalité. Un modèle de simulation a été mis au point pour prédire le comportement du système en entier. Nous avons étudié la chaîne de conversion éolienne et décrit les différentes chaînes de conversion d'énergie



Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur l'utilisation de la machine synchrone à aimant permanent dans un système de conversion d'énergie éolienne.

Dans un premier temps, une brève description sur les systèmes éoliens a été présentée. Comme beaucoup d'énergies renouvelables, le gisement éolien mondial est considérable puisqu'il est très supérieur à la consommation énergétique actuelle de l'humanité. Cependant le développement de son exploitation dépendra, non pas des difficultés technologiques surmontées actuellement côté pratique, mais de données économiques et politiques favorisant ou non les diverses formes d'énergies exploitables.

Et on peut dire aussi que la chaîne éolienne est une source de production d'énergie qui représente dans certains cas l'une des meilleures solutions adaptées car elle ne consomme aucun combustible et ne participe pas à l'effet de serre.

Vue l'importance de l'énergie éolienne, on s'intéressera dans les chapitres suivants à la conception et la simulation d'un modèle pédagogique d'une éolienne avec une génératrice synchrone à aimant permanent.

Dans un second temps, nous avons abordé la description des machines électriques (en s'intéresse à la machine synchrone à aimants permanents), on a passé en revue la machine synchrone et la modélisation des différents blocs de la chaîne de conversion, tels que la turbine et la machine synchrone à aimants permanents.

Dans un dernier temps, l'essentiel de notre contribution est abordé, à savoir la simulation de la chaîne de conversion. Les différents modèles étudiés sont conformes à la réalité.

Un modèle de simulation a été mis au point pour prédire le comportement du système en entier. Nous avons étudié la chaîne de conversion éolienne, décrit les différents constituants de la chaîne de conversion et présenter les résultats de simulation.

En perspective, ce travail peut être poursuivi et complété afin d'améliorer la production décentralisée et ceci, par l'étude des points suivants :

1. Etude des systèmes de production hybride tels que les systèmes (éolienne - photovoltaïque), (éolienne-diesel), (éolienne photovoltaïque-diesel)...etc.
2. Application de plus de commandes pour l'énergie éolienne, par exemple, les modèles de simulation des aérogénérateurs à vitesse variable avec régulation pitch.
3. Etudier les techniques de recherche du point de puissance maximale (techniques dites MPPT).
4. Etudier la gestion des systèmes, c.à.d. réaliser les optimisations sur des critères de minimisation du coût.

ANNEXES

Annexe

Paramètres de la turbine :

Rayon de l'éolienne : $R = 2.4\text{m}$.

Inertie de l'arbre : $J = 2 \text{ kg.m}^2$.

Vitesse du vent : $v = 7.5 \text{ m/s}$

Coefficient de puissance $C_p : 0.5$

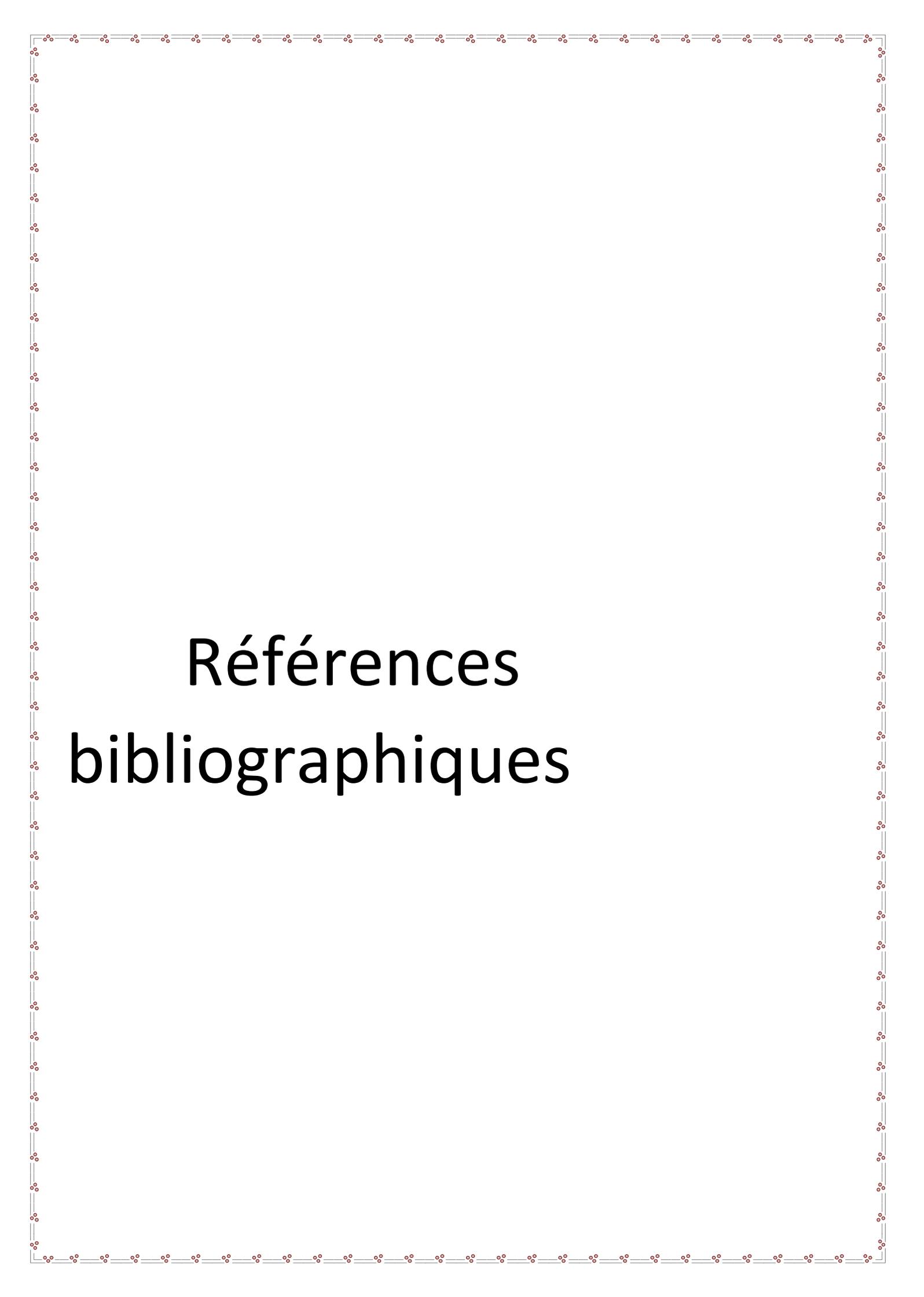
Paramètres du générateur synchrone :

Résistance statorique $R_s = 1.5\Omega$.

Inductance directe $L_{ds} = 0.0058\text{H}$.

Inductance transversale $L_{qs} = 0.0058\text{H}$.

Nombre de paires de pôles $p_s = 4$.



Références bibliographiques

[1] Frédéric POITIERS « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne (machine asynchrone à cage autonome – machine asynchrone à double alimentation relié au réseau) » Thèse de doctorat de l'université de Nantes 2003

[2] Rabia MAMMAD « Etude et simulation de la robustesse d'une commande pour éolienne à base de MADA en présence des incertitudes des paramètres et/ou des perturbations présente dans le réseau électrique

[3] : A. BOYETTE « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne », 2006.

[4] M. SI-BRAHIMI « étude d'un système de conversion de l'énergie éolienne à base de la machine asynchrone » Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2015

[5] : Mohammed MALKI Saïd ALI BELARBI « Etude et Simulation d'un aérogénérateur connecté au réseau (Turbine + MADA + Réseau) en mode continu et discret », 2014

[6] MAZOUZ FARIDA « Commande d'un système éolien à base d'un générateur synchrone à aimants permanents », 2013

[7] REDJEM Radia « Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne », 2009

[8] LOUAR FATEH « Modélisation et simulation d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à base d'une machine synchrone à aimant permanent », 2016

[9] Mme HAMECHA Samira, Ep. BOUREKACHE « Etude et Commande d'une Eolienne à base d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents », 2013

[10] LATRECHE Mohammed Tahar « Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien », 2012

[11] Article_Paris_final « Modélisation et commande d'une génératrice synchrone à aimant permanent pour la production et l'injection de l'énergie offshore dans un réseau

Matlab /Simulink

Sites web :

<https://hal.archives-ouvertes.fr>

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr> (29/10/2015)

<https://www.univ-setif.dz> (2012)