

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique



Université d'EL-Oued
Faculté des Sciences et de Technologie

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

LICENCE ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et de Technologie
Filière : Génie Électrique
Spécialité: Contrôle et Diagnostic des Systèmes Électriques

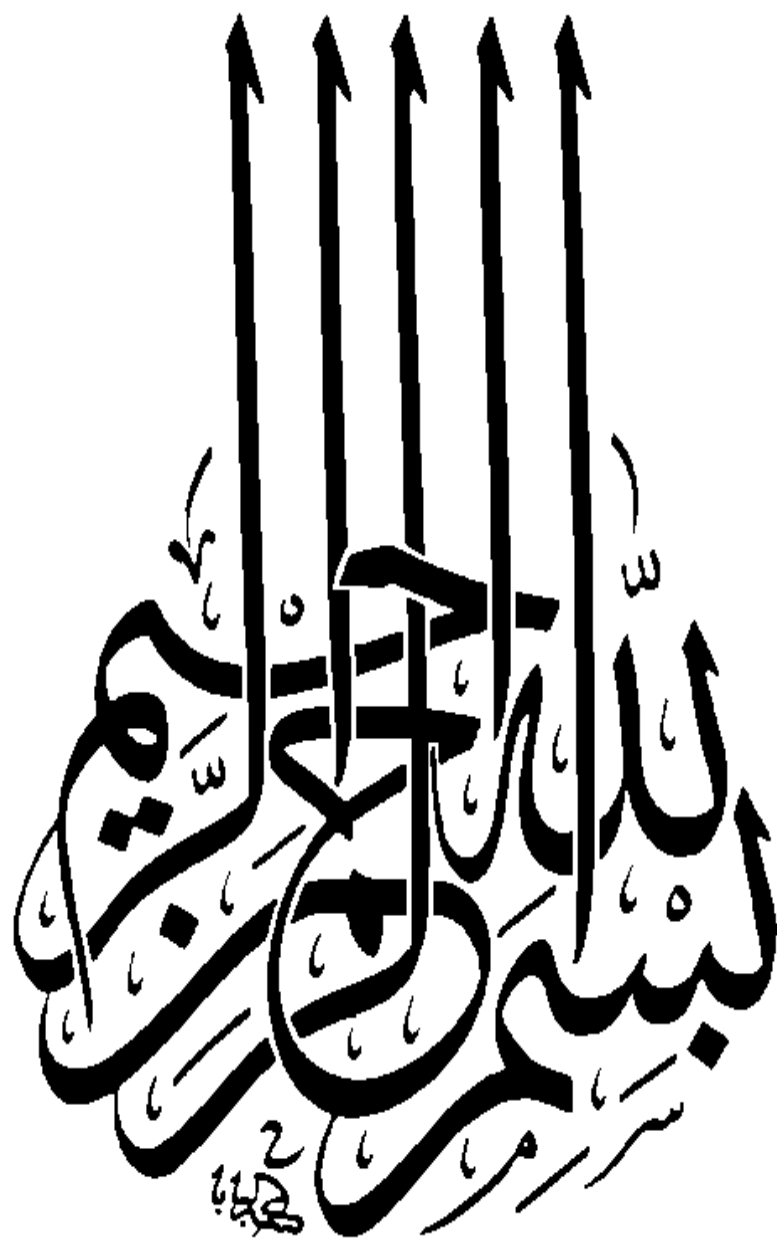
Thème

**Modélisation d'une turbine
éolienne à vitesse variable**

Dirigé par:
Mr. Guediri abdelkarim

Réalisé par:
Kadrine Abderrahmane
Benhamed Abdeghani

Soutenu 03-04 Juin 2014



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

وَنُفِثَ بِفَيْهِ الرِّيحُ وَالسَّحَابُ

الْمُسْكِرُ بَيْنَ السَّمَاءِ وَالْأَرْضِ

لَا يَأْتِ لِقَوْمٍ يَعْقِلُونَ

صَلَّى اللَّهُ عَلَى الْعِصْمَةِ

Remerciements

*Ce travail a été réalisé à l'unité de recherche de matériaux et des énergies
renouvelables*

*(URMER) du département de physique de la faculté des sciences de
l'université D'EL OUED*

*Avant tout, Je remercie notre Dieu le tout puissant de m'avoir donnée la force d'atteindre
mon but et d'accomplir mon travail.*

*Que mes remerciements les plus sincères s'adressent à mon encadreur Monsieur Dr .K.GEDIRI,
professeur à l'université D'EL OUED et directeur de l'URMER, pour sa présence et son
pragmatisme exemplaire qui a donné un
véritable sens à notre travail.*

*Mes remerciements vont également à TOUT LES PROFESSEURS DE l'université
D'EL OUED*

Merci

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A ma mère avec toute mon affection.

A mon père avec toute ma reconnaissance.

A mon grand-père et ma grand-mère que dieu les gardes.

A ma grand-mère que Dieu tout puissant l'accueille dans son vaste paradis

A mes frères et mes sœurs.

A ma famille.

A mes collègues : AYOUB, WALID, WAFÀ, SOFIANE, YOCEUF

A tous mes amis.

A tous ceux qui m'aiment et que j'aime.

Kadrine abderrahmane



Sommaire

Introduction générale.....	1
I. Chapitre I :	
Généralités sur les systèmes éoliennes.	
I.1. Introduction	3
I.2. Vent	3
I.3. Définition de l'énergie éolienne	4
I.4. Principe	4
I.5. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.....	5
I.5.1. Avantages	6
I.5.2. Inconvénients	7
I.6. Différents types des turbines éoliennes	7
I.6.1. Turbines éoliennes à axe vertical	8
I.6.1.1. Type de Savonius	8
I.6.1.2. Type de Darrieus.....	8
I.6.2. Turbines éoliennes à axe horizontal	9
I.6.2.1. Éoliennes lentes	9
I.6.2.2. Éoliennes rapides	10
I.7. Architecture d'une éolienne à axe horizontal	11
- Principaux composants d'une éolienne	11
I.8. Energie cinétique du vent – conversion en énergie mécanique	13
I.8.1. Loi de Betz	13
I.8.2. Production d'énergie mécanique	13
I.9. Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne	15
I.9.1. Système à décrochage aérodynamique "stall"	15
I.9.2. Système d'orientation des pales « <i>Pitch</i> »	15
I.10. Etat de l'art sur la conversion électromécanique	17
I.10.1. Systèmes utilisant la machine asynchrone	17
I.10.1.1. Machine asynchrone à cage d'écureuil	17
I.10.1.2. Machine asynchrone à double stator	18
I.10.1.3. Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance	19
I.10.1.4. Machine asynchrone à double alimentation type "brushless"	20
I.10.1.5. Machine asynchrone à double alimentation type "rotor bobiné"	20
I.10.1.5.1. MADA à énergie rotorique dissipée	21
I.10.1.5.2. MADA – structure de Kramer	22
I.10.1.5.3. MADA – structure de Scherbius avec cycloconvertisseur	22
I.10.1.5.4. MADA – structure de Scherbius convertisseurs MLI	23
I.10.2. Systèmes utilisant la machine synchrone	24
I.10.2.1. Machines synchrones à rotor bobiné	24

I.10.2.2.	Machines synchrones à aimants permanents	24
I.11.	Outil de travail "Simulation"	24
I.12.	Conclusion	26

II. Chapitre II :

Modélisation d'une turbine éolienne avec MPPT

II.1.	Introduction	27
II.2.	Modélisation du vent	27
II.3.	Modélisation d'une turbine éolienne à axe horizontal	28
II.3.1.	Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine	28
II.3.2.	Modélisation de la turbine	30
II.3.3.	Modèle du multiplicateur	32
II.3.4.	Equation dynamique de l'arbre	33
II.4.	Modèle de la turbine en MATLAB/SIMULINK	34
II.5.	Stratégie de commande de la turbine	35
II.6.	Maximisation de la puissance extraite	36
II.6.1.	Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse	36
II.7.	Résultats de Simulation et interprétations.....	38
II.8.	Conclusion	43

Conclusion générale	44
----------------------------------	----

BIBLIOGRAPHIE	45
----------------------------	----

Annexe	47
---------------------	----

Liste de Figures

Figure. I.1	: La naissance du vent.	4
Figure. I.2	: Conversion de l'énergie cinétique du vent.	5
Figure. I.3	: Eolienne type Savonius.	8
Figure. I.4	: Eolienne type Darrieus.	9
Figure. I.5	: Eolienne de pompage - Mauritanie 'Éolienne lentes'.	10
Figure. I.6	: Éolienne à axe horizontal 'rapide'.	10
Figure. I.7	: Principaux composant d'une éolienne.	11
Figure. I.8	: Nacelle.	12
Figure. I.9	: Tube de courant autour d'une éolienne.	13
Figure. I.10	: Coefficient de puissance.	14
Figure. I.11	: Coefficient de puissance pour déférent type éolienne.	14
Figure. I.12	: Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné. ...	15
Figure. I.13	: Flux d'air sur un profil de pale " <i>stall</i> ".	16
Figure. I.14	: Variation de l'angle de calage d'une pale	16
Figure. I.15	: Influence de l'angle de calage sur le coefficient de couple	17
Figure. I.16	: Caractéristique couple-vitesse d'une machine asynchrone.	18
Figure. I.17	: Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau.	18
Figure. I.18	: Machine asynchrone à double stator.	19
Figure. I.19	: Machine asynchrone connectée sur le réseau par l'intermédiaire d'un ensemble redresseur – onduleur.	19
Figure. I.20	: Schéma développé d'un rotor à cage classique et d'un rotor de machine asynchrone "brushless"	20
Figure. I.21	: Machine asynchrone brushless connectée sur le réseau.	20
Figure. I.22	: Machine asynchrone à rotor bobiné	21
Figure. I.23	: Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée	21
Figure. I.24	: Machine Asynchrone à Double Alimentation – structure de Kramer	22
Figure. I.25	: Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scherbius avec cycloconvertisseur	23
Figure. I.26	: Machine asynchrone à double alimentation: structure de Scherbius avec convertisseurs MLI	23
Figure. II.1	: Schéma de la turbine éolienne..	27
Figure. II.2	: Système mécanique de l'éolienne.	29
Figure. II.3	: Modèle mécanique simplifié de la turbine.	30
Figure. II.4	: Caractéristique du coefficient de puissance en fonction de la vitesse relative λ	32
Figure. II.5	: Modèle d'une turbine éolienne.	33
Figure. II.6	: Schéma électrique équivalent de la turbine d'une éolienne	33
Figure. II.7	: Modèle en bloc de la turbine.	34
Figure. II.8	: Caractéristique puissance - vitesse d'une éolienne.	35

Liste des Figures

Figure. II.9 :	Stratégies de commande de la turbine	36
Figure. II.10 :	a. Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse.	37
	b. Modèle de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse en MATLAB/SIMULINK.	37
Figure. II.11 :	Modèle de la turbine avec la Commande en MATLAB/SIMULINK.	37
Figure. II.12 :	Modèle éclaté de la turbine éolienne.	38
Figure. II.13 :	Profil du vent et la vitesse du rotor.	39
Figure. II.14 :	Coefficient de puissance avec un zoom Avec MPPT.	40
Figure. II.15 :	Vitesse mécanique Avec MPPT.	41
Figure. II.16 :	Couple et Puissance électrique produite Avec MPPT.	41
Figure. II.17 :	Coefficient de puissance avec un zoom San MPPT.	42
Figure. II.18 :	Vitesse mécanique San MPPT	42
Figure. II.19 :	Couple et Puissance électrique produite San MPPT.	42

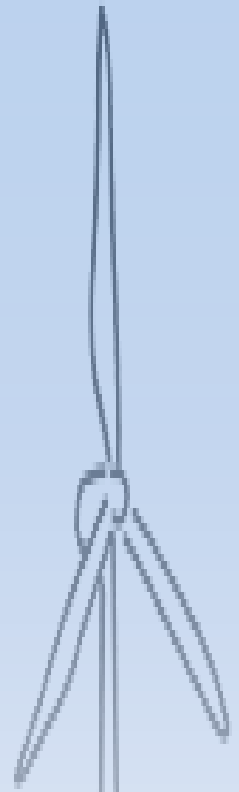
Notations

V_1, V_2	Vitesse du vent respectivement en amont et en aval de l'éolienne
ρ	Densité de l'air à 15°C
m	Masse d'air traversant le rotor éolien en 1s
R	Rayon de la turbine
S	Surface balayée par le rotor de l'éolienne
V	Volume balayée par le rotor de l'éolienne
$P_{aér}$	Puissance extraite par le rotor éolien (aérodynamique)
P_v	Puissance théorique maximale extractible d'un vent non perturbé
C_p	Coefficient de puissance de l'éolienne
λ	Vitesse relative de l'éolienne
β	Angle de calage des pales de la turbine
Ω_1, Ω_2	Vitesse de rotation de l'éolienne respectivement avant et après le multiplicateur
g	Glissement
$\Omega_{turbine}$	Vitesse de la turbine
$\Omega_{turbine_estimée}$	Vitesse mécanique estimée de la turbine
Ω_{mec}	Vitesse mécanique
v	Vitesse du vent
$v_{estimée}$	Vitesse du vent estimée
G	Rapport de multiplication
$I_{turbine}(kg.m^2)$	Moment d'inertie de la turbine
$I_g(kg.m^2)$	Moment d'inertie du rotor de la génératrice
$J(kg.m^2)$	Moment d'inertie totale
$I_{pale}(kg.m^2)$	Moment d'inertie de pale
$I_h(kg.m^2)$	Moment d'inertie de l'arbre
Kb	Elasticité de pale
Kh	Elasticité de l'arbre
Dh	Coefficient de frottement de l'arbre par rapport au multiplicateur
dg	Coefficient de frottement du rotor de la génératrice
f_{pale}	Coefficient de frottement par rapport au support
f	Coefficient de frottement visqueux
db	Coefficient de frottement de pale par rapport à l'air

$\dot{\beta}_{b1}, \dot{\beta}_{b2}, \dot{\beta}_{b3}$	Les vitesses d'orientation de chaque pale
T_{b1}, T_{b2}, T_{b3}	La force de pale dépend de la vitesse de vent appliquée
$E[J]$	L'énergie cinétique
$E_v[J]$	L'énergie cinétique de vent
$C_{aer}[N.m]$	Couple aérodynamique de l'éolienne
$C_{mec}[N.m]$	Couple mécanique total appliqué au rotor de l'éolienne
$C_{vis}[N.m]$	Couple des frottements visqueux
$C_{em}[N.m]$	Couple électromagnétique
$C_{em_ref}[N.m]$	Couple électromagnétique référence
$C_{aer_estimé}[N.m]$	Couple aérodynamique estimé

Introduction

générale



Le problème de tous les jours et dans le monde entier est de répondre à la demande énergétique qui augmente de plus en plus. L'augmentation rapide de l'activité industrielle dans les pays développés et l'investissement des entreprises dans les pays qui assurent un coût de production moins élevé a accru très rapidement la demande mondiale d'énergie. Face à cette demande, toujours croissante de nos jours.

Pour subir aux besoins en énergie de la société actuelle, il est nécessaire de trouver des solutions adaptées et de les diversifier. Actuellement, il ya principalement deux façons possibles d'agir. La première est de diminuer la consommation des récepteurs d'énergie et augmenter la productivité des centrales en améliorant respectivement leur productivité. Une deuxième méthode consiste à trouver et développer de nouvelles sources d'énergie. Des recherches sont en cours dans le domaine de la fusion nucléaire des noyaux atomiques, qui éventuellement, pourraient êtres une solution énergétique du futur, mais l'avenir de cette filière et encore moins son avènement ne sont assurés.

Face à ces problèmes, et pour minimiser l'émission du CO₂ par les centrales thermiques, plusieurs pays se sont tournés vers de nouvelles formes d'énergie dites "renouvelables". Dans ce contexte général, notre étude s'intéresse à la filière éolienne qui semble une des prometteuses avec un taux de croissance mondial très élevé. Pourtant oubliée depuis longtemps, cette source d'énergie inépuisable a connu un développement important depuis le début des années 1990 partout dans le monde.

Le travail que nous avons à réaliser, consiste en une étude sur les différentes parties de centrale éolienne c'est à dire l'étude de la chaîne de conversion éolienne et a travers les différents types des turbines et les machines utilisées dans un système éolien. Pour donner un bon rendement au réseau électrique, on a choisi la turbine axe horizontale rapide.. Ce

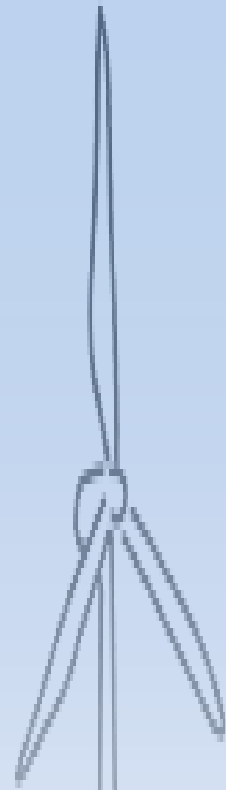
travail est structuré en deux chapitres, ces derniers sont énoncés de la manière suivante :

Le premier chapitre est consacré aux généralités sur la conversion éolienne. Dans cette partie, nous présentons une description des différentes structures des systèmes éoliens en citant les avantages et les inconvénients pour chaque structure pour en terminer par choisir la structure qui sera étudiée.

Dans le deuxième chapitre seront abordées ; par la modélisation de la turbine. Des hypothèses simplificatrices nous faciliteront sa mise en équation pour ensuite valider son modèle et présente les résultats par la simulation sous l'environnement MATLAB/SIMULINK, L'élaboration d'une commande adéquate pour le captage maximum de puissance disponible.

Enfin, ce travail sera terminé par une conclusion générale et quelques perspectives de recherche envisagées.

Généralités
sur
les systèmes
éoliens



Chapitre I

I.1. Introduction

L'intérêt pour l'usage des énergies renouvelables augmente, car les populations sont de plus en plus concernées par les problèmes environnementaux. Parmi les énergies renouvelables, l'énergie éolienne est maintenant largement utilisée [BEN_08].

Depuis l'antiquité, des moulins à vent convertissent le vent en énergie mécanique pour moudre du grain, presser des produits oléifères, battre le métal ou les fibres et pomper de l'eau. Ils seront introduits en Europe par l'Espagne, grâce aux Maures. Il faudra attendre Zénobe Gramme et sa dynamo en 1869 pour que le moulin puisse donner naissance à l'éolienne.

En 1888, Charles F. Brush est le premier à avoir construit une petite éolienne pour alimenter sa maison en électricité, avec un stockage par batterie d'accumulateurs. La première éolienne « industrielle » génératrice d'électricité est développée par le Danois Poul La Cour en 1890, pour fabriquer de l'hydrogène par électrolyse. Les recherches les plus intenses actuellement sur l'utilisation du vent portent sur les éoliennes afin d'augmenter leur rendement en prise sur le vent, résistance aux fluctuations, rendement en production électrique et la meilleure détermination des corridors de vent.

Ce chapitre est une description générale sur l'énergie éolienne, les différents types d'aérogénérateur (éoliennes à axe vertical, et éoliennes à axe horizontal) et en cite les générateurs les plus utilisées.

Avant d'entrer dans les détails de notre mémoire, nous allons parler brièvement de la principale source de l'énergie éolienne.

I.2. Vent

Le vent naît sous l'effet des différences de températures et de pression. Le grand responsable de ce phénomène est le soleil (Figure. I.1.A). Il chauffe les mers et les continents mais pas au même rythme (Figure. I.1.B). Une fois réchauffés, ces derniers chauffent à leur tour les masses d'air qui les surplombent. L'air augmente de volume lorsqu'il est chauffé (Figure. I.1.C), ce qui crée un déplacement des particules de l'air (Figure. I.1.D) et c'est en capturant leur énergie cinétique que les éoliennes se mettent à fonctionner.

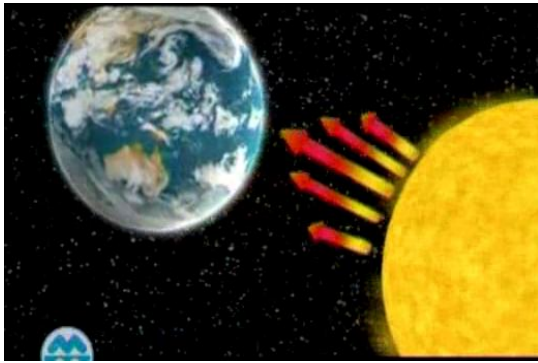


Figure. I.1. A

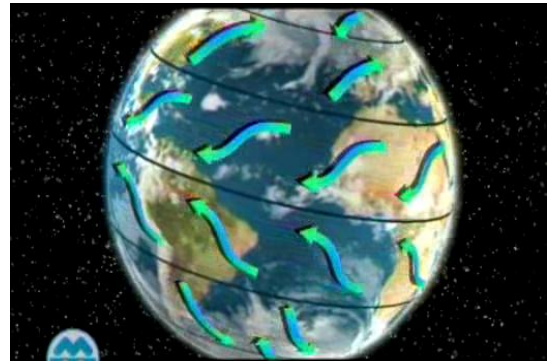


Figure. I.1. B

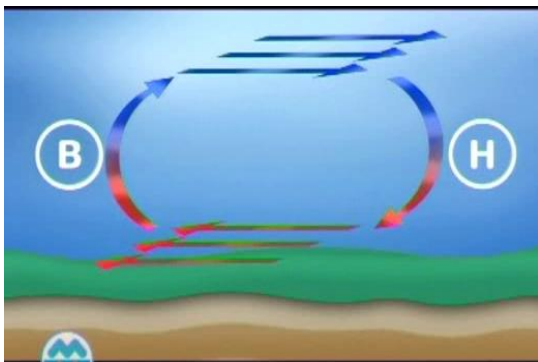


Figure. I.1. C



Figure. I.1. D

Figure. I.1 La naissance du vent

I.3. Définition de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice [POI_03] (Figure. I.2).

I.4. Principe

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 ensuite au réseau électrique [LAV_05].

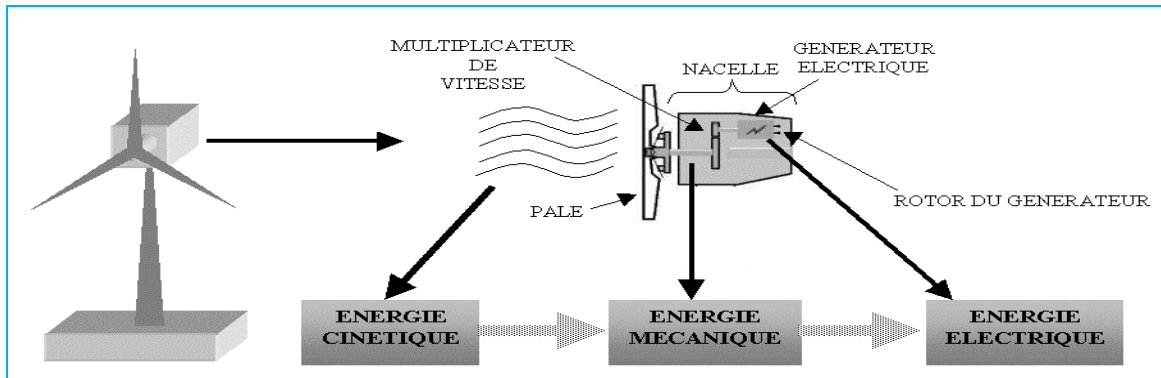


Figure. I.2 Conversion de l'énergie cinétique du vent

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [POI_03].

Les éoliennes sont classées selon leur puissance nominale :

1. Éoliennes de petite puissance: inférieure à 40 kW
2. Éoliennes de moyenne puissance: de 40 à quelques centaines de kW.
3. Éoliennes de forte puissance: supérieure à 1 MW [POI_03].

I.5. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

La croissance de l'utilisation de l'énergie éolienne est fortement liée aux avantages de cette énergie. Afin de palier toute frein à son développement nous devrions étudier les éventuels inconvénients.

I.5.1. Avantages

– L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement :

- La concentration du CO₂ est augmenté de 25% depuis l'ère préindustrielle et on augure qu'elle doublera pour 2050. Ceci a déjà provoqué une augmentation de la température de 0,3 à 0,6°C depuis 1900 et les scientifiques prévoient que la température moyenne augmentera de 1 à 3,5°C d'ici l'an 2100, ce qui constituerait le taux de réchauffement le plus grand des 10000 dernières années.

Toutes les conséquences de ce réchauffement ne sont pas prévisibles, mais ils ont par exemple annoncé qu'il provoquera une augmentation de niveau de la mer de 15 à 95 cm d'ici l'an 2100.

– L'exploitation d'énergie éolienne ne produit pas d'émission de CO₂ :

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est à dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier ;

- L'énergie éolienne ne présente aucun risque comme l'énergie nucléaire et ne produit aucun déchets radioactifs ;

- Les éoliennes en fonctionnement sont facile a arrêté, contrairement aux procédés continus de la plus part des centrales thermiques et nucléaires ;

- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace.

- L'énergie éolienne a d'autre part des atouts économiques certains :

- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux. Ainsi, les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut en plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales ;

- 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 en énergie dans ces pays pour se développer.

L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple. Le coût d'investissement est faible par rapport à celui des centrales à énergies plus traditionnelles. Enfin, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà ;

- La période de haute productivité se situe en hiver (vent plus forts), ce qui correspond à la période de l'année où la demande est plus forte.

I.5.2. Inconvénients

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolienne a quelques désavantages :

- L'impact visuel, ça reste néanmoins un thème subjectif ;
- Le bruit : il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci doit donc être limitée ;
- L'impact sur les oiseaux : certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs. D'autres études disent que les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux, afin que ceux-ci ne se fassent pas attraper par les aéroturbines ;
- La qualité de la puissance électrique : La source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne. Ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs notamment dans les régions à fort potentiel de vent est augmentée ;
- Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classiques : bien qu'en terme de coût, l'éolien puisse sur les meilleurs sites, c'est à dire là où il y a le plus de vent, Concurrencer la plupart des sources d'énergie classique, son coût reste encore plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés ;
- Lorsque la production dépasse la consommation, le stockage est encore onéreux, mais en cas de raccordement de l'éolienne au réseau électrique, le stockage n'est pas nécessaire [MER_07].

I.6. Différents types des turbines éoliennes

Il existe deux grandes catégories d'éoliennes selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice:

- les turbines à axe horizontal
- les turbines à axe vertical [ABD_07].

I.6.1. Turbines éoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles. De nombreuses variantes ont été testées depuis les années vingt, dont beaucoup sans succès, mais deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation [POI_03] (**Le type Savonius, Le type Darrieus**).

I.6.1.1. Type Savonius (du nom de son inventeur, breveté en 1925)

Il est constitué de deux ou plusieurs godets demi-cylindriques qui sont décalés l'un par rapport à l'autre. Le rotor de Savonius est caractérisé par un grand couple de démarrage. Outre son faible encombrement, qui permet d'intégrer l'éolienne aux bâtiments sans en dénaturer l'esthétique, est peu bruyant.

Il démarre à de faibles vitesses de vent voisines de 2 à 3 m/s et présente un couple élevé quoique variant de façon au cours de la rotation.



Figure. I.3 Turbine éolienne type Savonius

I.6.1.2. Type Darrieus

Inventé par l'académicien français Darrieus au cours des années 1920-1935 repose sur l'effet de portance d'un profil soumis à l'action d'un vent relatif. Il existe quatre sortes de rotors de Darrieus: le rotor cylindrique, le rotor tronconique, le rotor à variation cyclique et le rotor parabolique (figure. I.4).

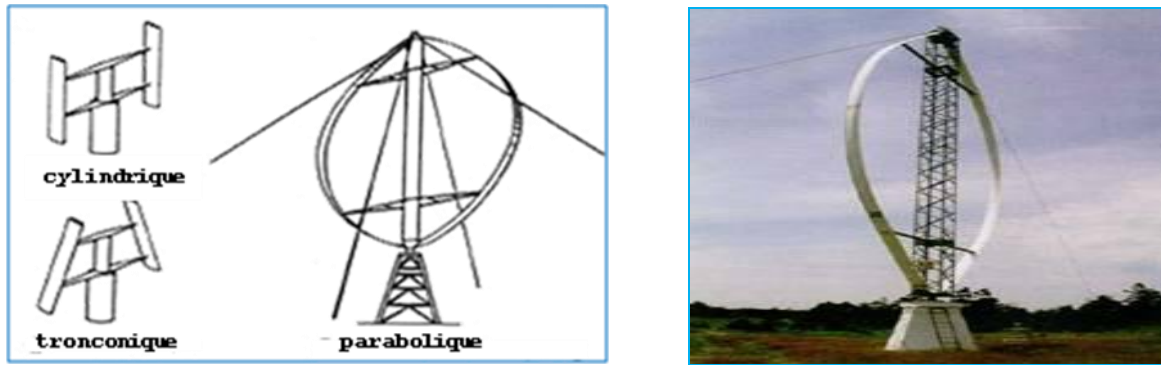


Figure. I.4 Turbine éolienne type Darrieus

Toutes ces machines ont besoin d'être haubanées, c'est-à-dire soutenues par des câbles ou des cordages. Le comportement dynamique de la machine doit tenir compte des modes propres de vibration de tous les organes structuraux, y compris celui des haubans [KHE_07].

I.6.2. Turbines éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de pales profilées de façon aérodynamique à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation [POI_03].

I.6.2.1. Turbines éoliennes à axe horizontal lentes

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur coefficient de puissance atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Ces éoliennes multipales sont surtout adaptées aux vents de faible vitesse. Elles démarrent à vide pour des vents de l'ordre de 2 à 3 m/s et leurs couples de démarrage sont relativement forts. Cependant elles sont moins efficaces que les éoliennes rapides et sont surtout utilisées pour le pompage d'eau [SOU_07].



Figure. I.5 Turbine éolienne de pompage - Mauritanie 'lente'

I.6.2.2. Turbines éoliennes à axe horizontal rapides

Les éoliennes rapides ont un nombre de pales assez réduit, qui varie en général entre 2 et 4 pales. Elles sont les plus utilisées dans la production d'électricité en raison de leur efficacité, de leur poids (moins lourdes comparées à une éolienne lente de même puissance) et de leur rendement élevé. Elles présentent, par contre, l'inconvénient de démarrer difficilement. Leurs vitesses de rotation sont beaucoup plus élevées que pour les machines précédentes et sont d'autant plus grandes que le nombre de pales est faible [SOU_07].



Figure. I.6 Turbine éolienne à axe horizontal 'rapide'

Notre étude se focalise sur les éoliennes rapides ou nous essayerons de donner une description du modèle global.

I.7. Architecture d'une éolienne à axe horizontal

❖ Principaux composants d'une éolienne

Une éolienne rapide est constituée principalement de trois parties: les pales (entre 1 et 3), la nacelle et la tour. Chacune de ces parties doit être minutieusement étudiée et modélisée de façon à obtenir un meilleur rendement et une bonne fiabilité du système ainsi qu'un faible coût d'investissement.

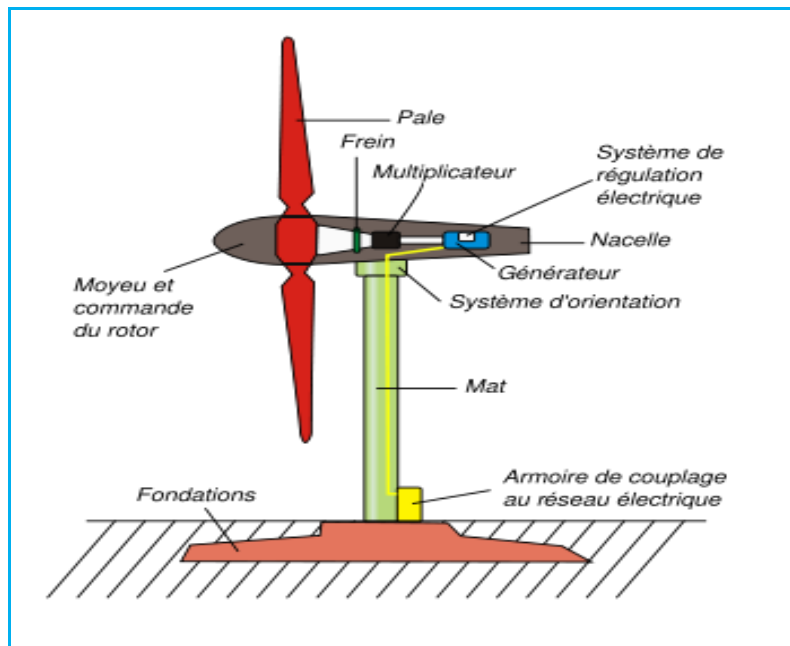


Figure. I.7 Principaux composants d'une éolienne.

- **La tour (mât)** est généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, elle doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité. Un compromis consiste généralement à prendre une tour (mât) de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur (exemple : éolienne NORDEX N90 2,3 MW: diamètre de 90m, mât 80m).
- **La nacelle** regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur. Le frein à disque, différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la

direction du vent). A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne.

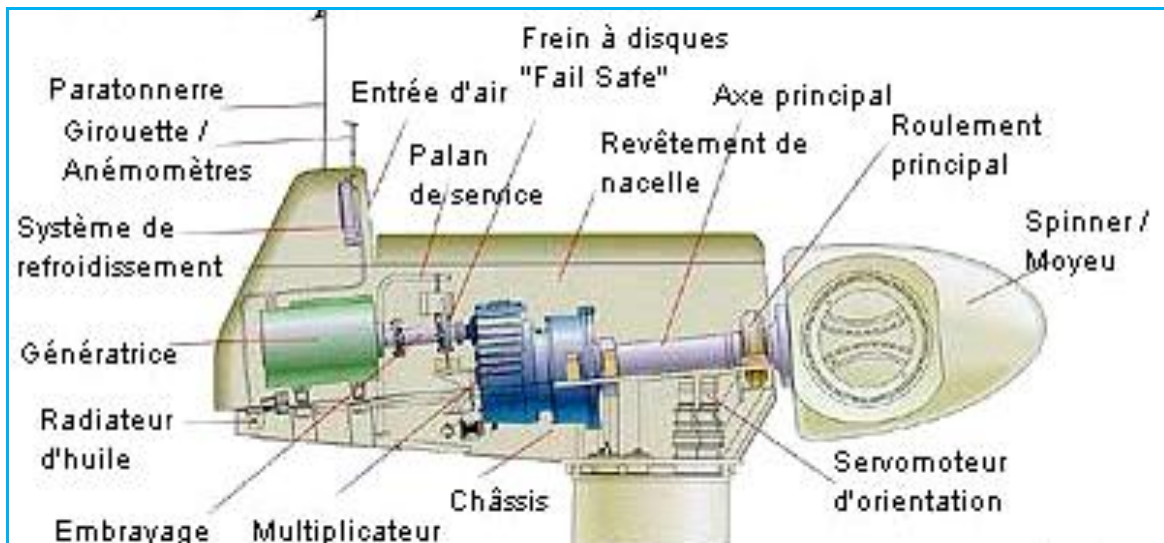


Figure. I.8 Nacelle

- **Le rotor**, formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale (concept danois) étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit.

Les rotors à vitesse fixe sont souvent munis d'un système d'orientation de la pale permettant à la génératrice (généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil) de fonctionner au voisinage du synchronisme et d'être connectée directement au réseau sans dispositif d'électronique de puissance. Ce système allie ainsi simplicité et faible coût.

Les rotors à vitesse variable sont souvent moins coûteux car le dispositif d'orientation des pales est simplifié voire supprimé (La société Jeumont Industrie utilise un rotor à pas fixe). Toutefois, une interface d'électronique de puissance entre le générateur et le réseau ou la charge est nécessaire. Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées (Actuellement, les matériaux composites tels la fibre de verre et plus récemment la fibre de carbone sont très utilisés car ils allient légèreté et bonne résistance mécanique) [POI_03].

I.8. Énergie cinétique du vent – conversion en énergie mécanique

- **Loi de Betz**

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la Figure 1.9 sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval. En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V_2 soit $\frac{V_1+V_2}{2}$, la masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales est:

$$m = \frac{\rho S (V_1 + V_2)}{2} \quad (\text{I.1})$$

La puissance $P_{aér}$ alors extraite s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent (seconde loi de Newton) :

$$P_{aér} = \frac{m (V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (\text{I.2})$$

Soit en remplaçant m par son expression dans (I.1):

$$P_{aér} = \frac{\rho S (V_1 + V_2) (V_1^2 - V_2^2)}{4} \quad (\text{I.3})$$

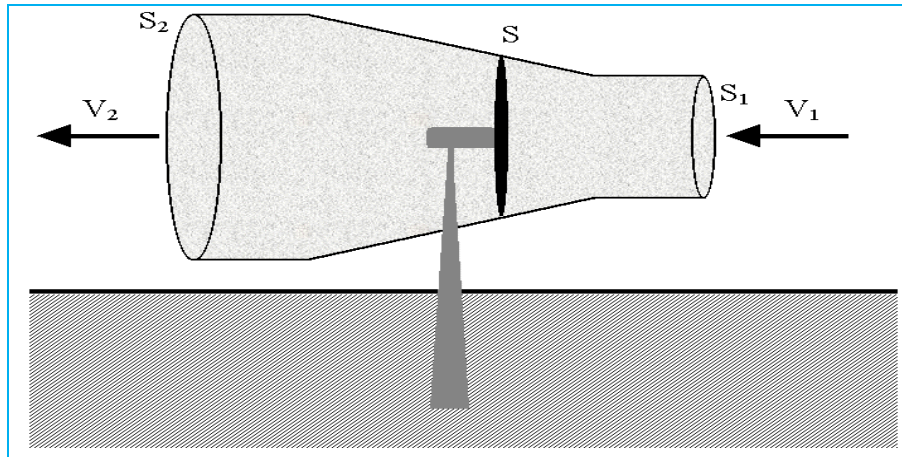


Figure. I.9 Tube de courant autour d'une éolienne

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V_1 , la puissance P_v correspondante serait alors :

$$P_v = \frac{\rho S V_1^3}{2} \quad (\text{I.4})$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est alors :

$$\frac{P_{aér}}{P_v} = \frac{1}{2} \left(1 + \left(\frac{V_1}{V_2} \right) \right) \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^2 \right) = C_p \quad (I.5)$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus (Figure.1.10), on s'aperçoit que le ratio $\frac{P_{aér}}{P_v}$ appelé aussi coefficient de puissance C_p présente un maxima de 16/27 soit 0,59. C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent [POI_03].

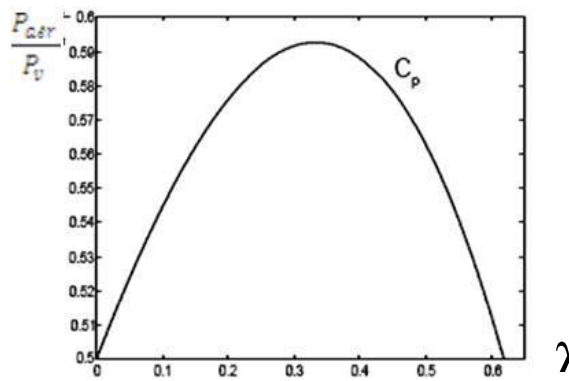


Figure. I.10 Coefficient de puissance

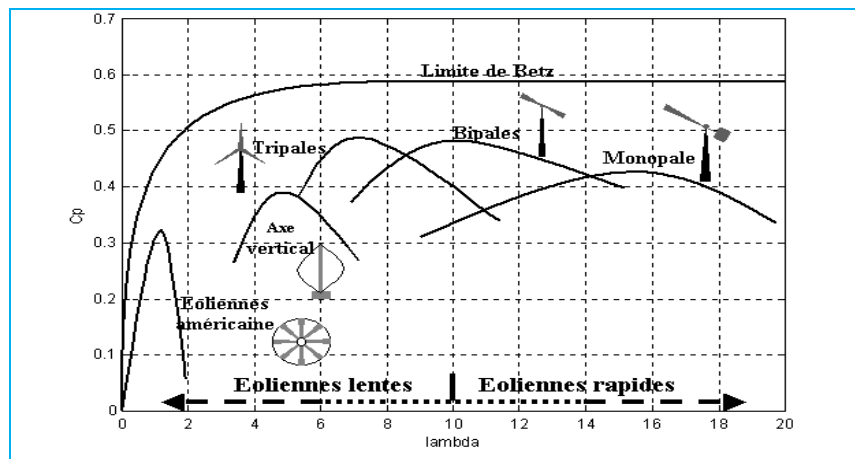


Figure. I.11 Coefficient de puissance pour différents types éoliennes

❖ Production d'énergie mécanique

En combinant les équations (I.1), (I.4) et (I.5), la puissance mécanique $P_{aér}$ disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi :

$$P_{aér} = C_p \cdot P_v = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_1^3 \quad (I.6)$$

$$\text{Avec : } \lambda = \frac{\Omega_1 \cdot R}{V_1} \quad (\text{I.7})$$

Ω_1 : vitesse de rotation avant multiplicateur et R: rayon de l'aérogénérateur.

Compte tenu du rapport du multiplicateur de vitesse K, la puissance mécanique $P_{aér}$ disponible sur l'arbre du générateur électrique s'exprime par :

$$P_{aér} = \frac{1}{2} \cdot C_p \left(\frac{R \cdot \Omega_2}{K \cdot V_1} \right) \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_1^3 \quad (\text{I.8})$$

Avec Ω_2 : vitesse de rotation après multiplicateur.

Cette relation permet d'établir un ensemble de caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses de vent (Figure. I.12).

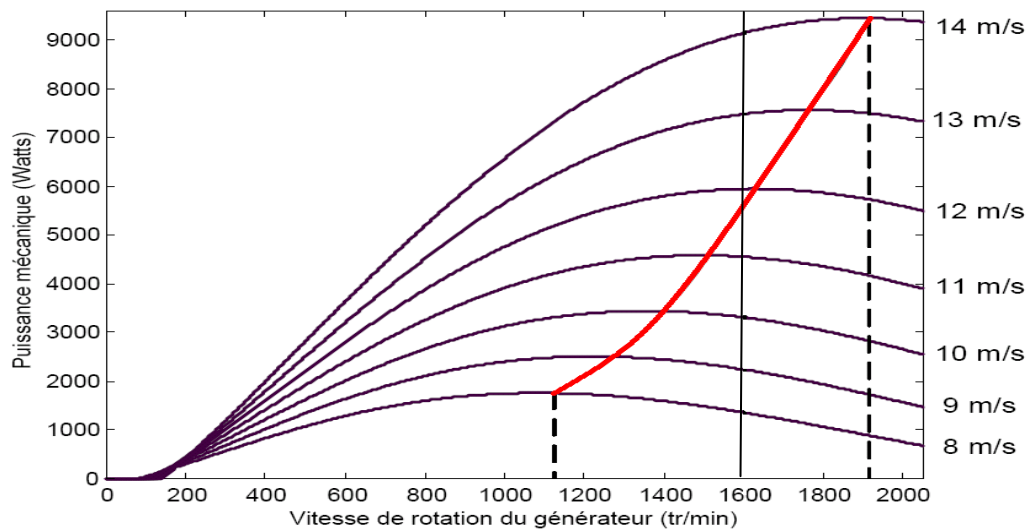


Figure. I.12 Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné

Au vu de ces caractéristiques, il apparaît clairement que si l'éolienne et par conséquent la génératrice fonctionne à vitesse fixe (par exemple 1600 tr/min sur la Figure.I.12) les maxima théoriques des courbes de puissance ne sont pas exploités. Pour pouvoir optimiser le transfert de puissance et ainsi obtenir le maximum théorique pour chaque vitesse de vent, la machine devra pouvoir fonctionner entre 1100 et 1900 tr/min pour cet exemple [POI_03].

I.9. Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne Principe

La vitesse de rotation des pales de l'aérogénérateur ne doit pas dépasser une vitesse maximale car cela pourrait endommager le dispositif de conversion. Différentes méthodes de régulation de la vitesse existent, parmi lesquelles certaines sont basées sur le principe de l'orientation des pales, d'autres sont plus simples et utilisent le principe de décrochage aérodynamique afin de réguler la vitesse [BEN_08].

I.9.1. Système à décrochage aérodynamique "Stall"

La plupart des éoliennes connectées au réseau électrique nécessite une vitesse de rotation fixe pour des raisons de cohérence de fréquence avec le réseau. Le système de limitation de vitesse le plus simple et le moins coûteux est un système de limitation naturelle (intrinsèque à la forme de la pale) dit "Stall". Il utilise le phénomène de décrochage aérodynamique. Lorsque l'angle d'incidence i devient important, c'est à dire lorsque la vitesse du vent dépasse sa valeur nominale V_n , l'aspiration créée par le profil de la pale n'est plus optimale ce qui entraîne des turbulences à la surface de la pale (Figure. I.13) et par conséquent une baisse du coefficient de puissance. Ceci empêche alors une augmentation de la vitesse de rotation [POI_03].

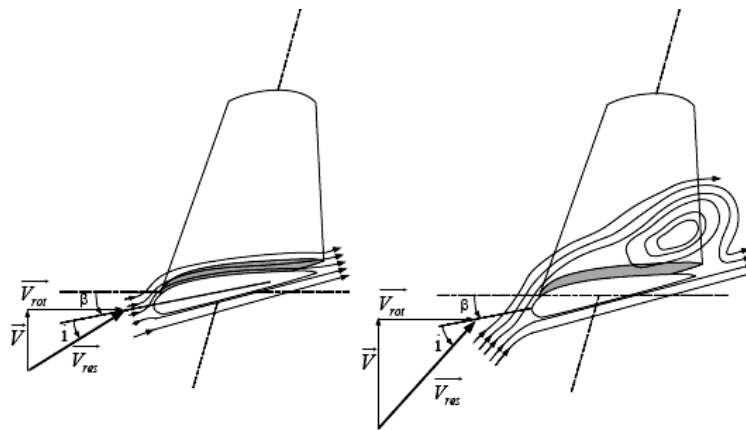


Figure. I.13 Flux d'air sur un profil de pale " Stall"

I.9.2. Système d'orientation des pales « Pitch »

Le système de réglage aérodynamique se base sur le principe de l'augmentation de l'angle de calage (Figure. I.14) ce qui diminue la valeur du facteur de puissance (Figure. I.15) d'où une diminution du rendement de la turbine, ceci empêche l'augmentation de la vitesse de rotation de l'aérogénérateur [BEN_08].

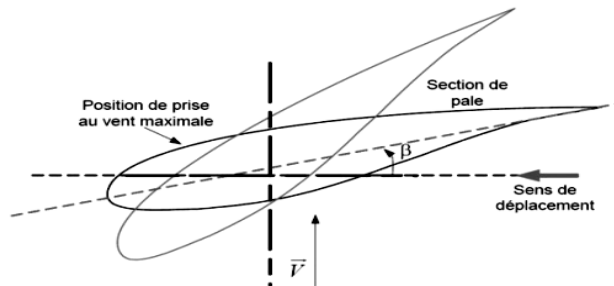


Figure. I.14 Variation de l'angle de calage d'une pale

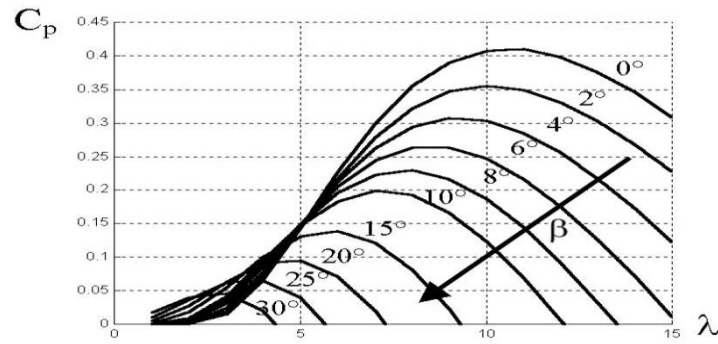


Figure. I.15 Flux d'air sur un profil de pale " Stall "

I.10. État de l'art sur la conversion électromécanique

L'énergie cinétique du vent est convertie en énergie mécanique par l'éolienne. Ensuite, la vitesse de rotation de l'éolienne est adaptée à celle de la génératrice classique (typiquement de 750 à 3000 tr/min) avec un multiplicateur de vitesse. La génératrice a pour rôle de convertir l'énergie mécanique en énergie électrique. Le générateur peut ensuite être lié directement ou indirectement au réseau.

I.10.1. Systèmes utilisant la machine asynchrone

I.10.1.1. Machine asynchrone à cage d'écureuil

Contrairement aux autres moyens traditionnels de production d'énergie électrique où l'alternateur synchrone est largement utilisé, c'est la génératrice asynchrone à cage d'écureuil qui équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde. 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 [POI_03].

Le couple mécanique entraînant (produit par la turbine) tend à accélérer la vitesse de la génératrice. Cette dernière fonctionne alors en hypersynchrone et génère de la puissance électrique sur le réseau. Pour une génératrice standard à deux paires de pôles la vitesse mécanique (Ω_{mec}) est légèrement supérieure à la vitesse du synchronisme $\Omega_s = 1500tr/mn$, ce qui nécessite l'adjonction d'un multiplicateur pour adapter la génératrice à celle du rotor de l'éolienne [AIM_04] (figure. I.16).

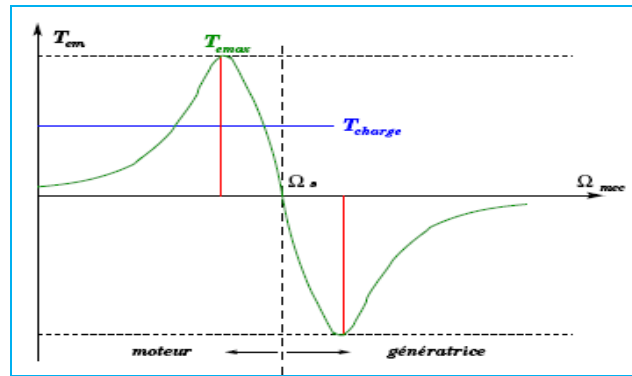


Figure. I.16 Caractéristique couple-vitesse d'une machine asynchrone.

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 Figure. I.17 qui deviennent la seule source de puissance réactive dans le cas d'un fonctionnement autonome de l'éolienne [POI_03].

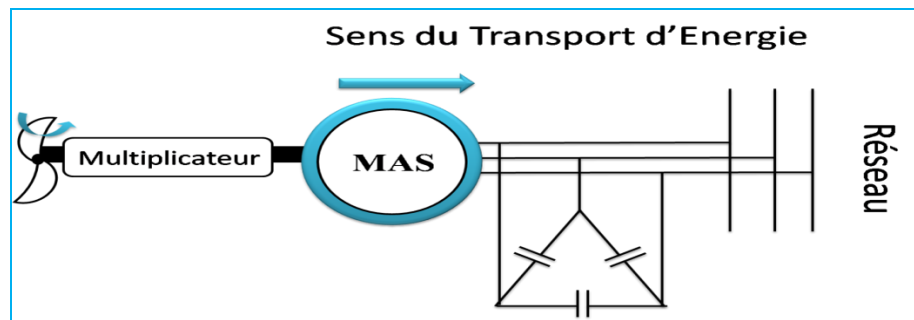


Figure. I.17 Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau

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, et il n'exploite pas la totalité de la puissance théoriquement disponible pour les vitesses de vent élevées.

I.10.1.2. Machine asynchrone à double stator

Pour améliorer le rendement du dispositif précédent, certains constructeurs utilisent un système à base de machine asynchrone à double stator (Figure. 1.18) :

- Un stator de faible puissance à grand nombre de paires de pôles pour les petites vitesses de vent.

-Un stator de forte puissance à faible nombre de paires de pôles permettant de fonctionner aux vitesses de vent élevées.

Ce système reste intrinsèquement un dispositif à vitesse fixe mais possède deux points de fonctionnement différents. Le bruit ainsi engendré par l'éolienne est alors plus faible pour les petites vitesses de vent car l'angle de calage nécessaire à l'orientation des pales atteint des valeurs moins élevées. La présence d'un deuxième stator rend la conception de la machine particulière et augmente le coût et le diamètre de façon non négligeable, ce qui représente une augmentation du poids et de l'encombrement de l'ensemble [POI_03].

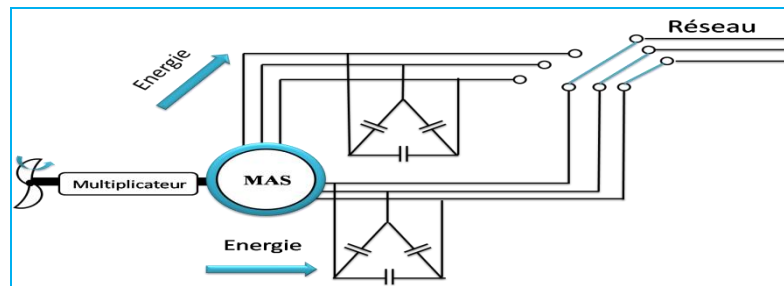


Figure. I.18 Machine asynchrone à double stator

I.10.1.3. Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance

Le dispositif de base est représenté sur la Figure. 1.19. Cette configuration autorise un fonctionnement à vitesse variable sans limite physique théorique. En effet, quelle que soit la vitesse de rotation de la machine, la tension produite est redressée et transformée en tension continue. Le fonctionnement de l'onduleur est alors classique et une commande adéquate permet de délivrer une tension alternative de fréquence fixe correspondant à celle du réseau avec un facteur de puissance unitaire [POI_03].

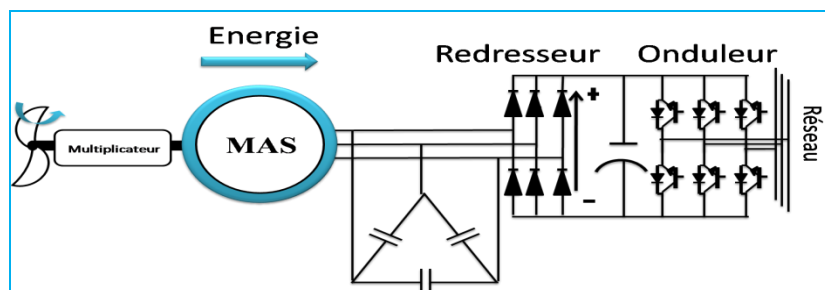


Figure. I.19 Machine asynchrone connectée sur le réseau par l'intermédiaire d'un ensemble redresseur – onduleur

I.10.1.4. Machine asynchrone à double alimentation type "brushless"

Cette machine a la particularité de posséder 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 rotor possède une structure spéciale différente de la cage d'écureuil classique mais tout aussi robuste : il est constitué de plusieurs boucles conductrices concentriques (Figure. I.20) [POI_03].

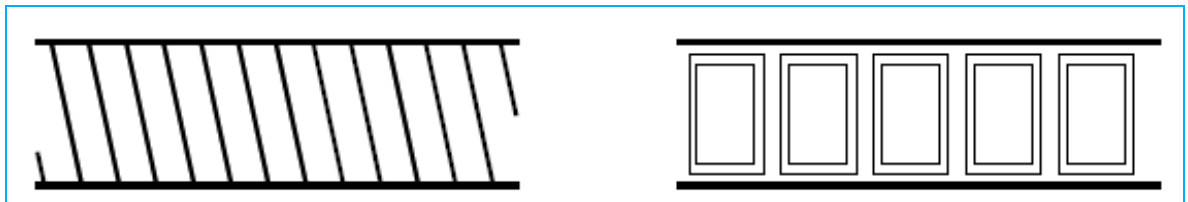


Figure. I.20 Schéma développé d'un rotor à cage classique et d'un rotor de machine asynchrone "brushless"

Cette machine présente l'intérêt d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable à l'instar du dispositif de la (Figure. I.20). En revanche, 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. I.21) [POI_03].

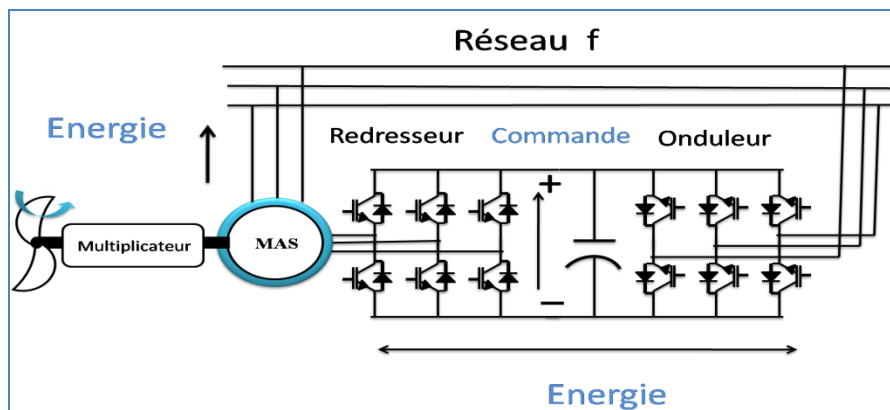


Figure. I.21 Machine asynchrone brushless connectée sur le réseau.

I.10.1.5. Machine asynchrone à double alimentation type "rotor bobiné"

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) avec rotor bobiné présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants. Intégrée dans un système éolien, la machine a généralement son stator connecté au réseau et l'énergie rotorique varie selon différents systèmes décrits ci-dessous. Les convertisseurs utilisés sont alors dimensionnés pour une fraction de la puissance nominale de la machine.

Le surcoût engendré par la présence de bobinages au rotor est alors compensée par l'économie réalisée sur le convertisseur.

Cette configuration fera l'objet d'une étude détaillée dans le chapitre 'III' de ce mémoire.



Figure. I.22 Machine asynchrone à rotor bobiné

I.10.1.5.1. Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée

Cette configuration à vitesse variable est représentée sur la Figure. I.23, le stator est connecté directement au réseau et le rotor est 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 rotorique et de fonctionner à vitesse variable en restant dans la partie stable de la caractéristique couple/vitesse de la machine asynchrone. Le glissement est ainsi modifié en fonction de la vitesse de rotation du moteur [POI_03].

La variation de la vitesse limitée à environ 10% autour de la vitesse de synchronisme par le changement de la résistance rotor.

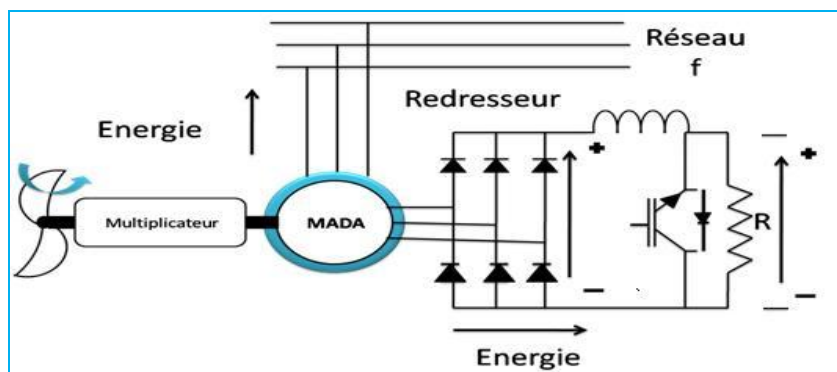


Figure. I.23 Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée

I.10.1.5.2. Machine asynchrone à double alimentation – structure de Kramer

Dans le but de réduire les pertes d'énergie dues à la structure du système précédent, le hacheur et la résistance sont remplacés par un onduleur qui renvoie l'énergie de glissement vers le réseau (structure de Kramer, Figure. I.24) [POI_03].

L'inconvénient de cette structure est que l'asservissement de la vitesse de la machine n'est pas possible. En plus, l'onduleur triphasé utilisé injecte des courants harmoniques qui sont préjudiciables pour la durée de vie des appareillages électriques raccordés sur le réseau. [MER_07]

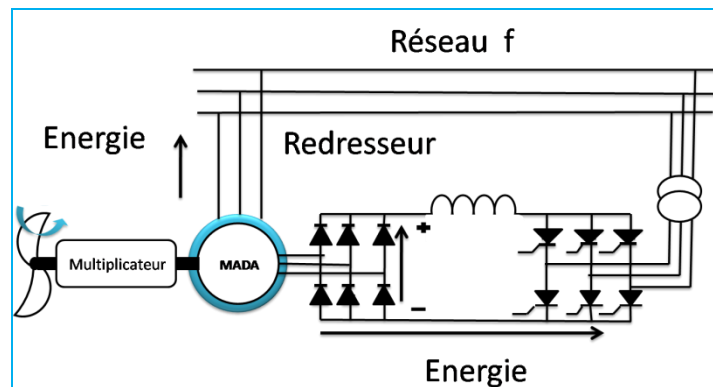


Figure. I.24 Machine Asynchrone à Double Alimentation – structure de Kramer

I.10.1.5.3. Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scherbius avec cycloconvertisseur

Afin d'autoriser un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, l'association redresseur onduleur peut être remplacé par un cycloconvertisseur (Figure. I.25), l'ensemble est alors appelé structure de *Scherbius*.

La plage de variation de vitesse est doublée par rapport à la structure de la Figure. 1.24. En effet si la variation du glissement doit rester inférieure à 30% pour maintenir l'efficacité du système, cette variation peut être positive (fonctionnement hyposynchrone) ou négative (fonctionnement hypersynchrone) [POI_03].

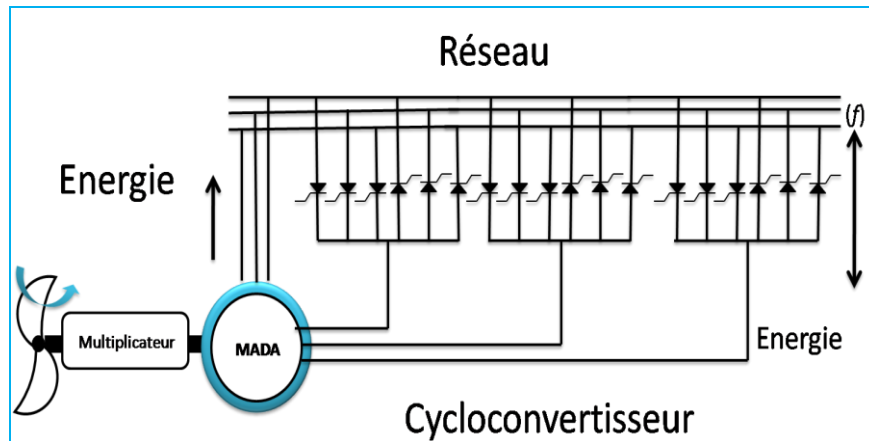


Figure. I.25 Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scherbius avec cycloconvertisseur

I.10.1.5.4. Machine asynchrone à double alimentation: structure de Scherbius avec convertisseurs MLI

Cette configuration (Figure. 1.26) a les mêmes caractéristiques que la structure de Scherbius avec cycloconvertisseur. Toutefois les interrupteurs utilisés ici (transistors IGBT) peuvent être commandés à l'ouverture et à la fermeture et leur fréquence de commutation est plus élevée que celle des GTO.

L'utilisation de ce type de convertisseur permet d'obtenir des allures de signaux de sortie en Modulation de Largeur d'Impulsions dont la modularité permet de limiter les perturbations en modifiant le spectre fréquentiel du signal (rejet des premiers harmoniques non nuls vers les fréquences élevées).

Un tel dispositif a l'avantage de fonctionner à vitesse variable en faisant intervenir un convertisseur de faible puissance. Si le glissement reste inférieur à $\pm 30\%$ autour du synchronisme [POI_03].

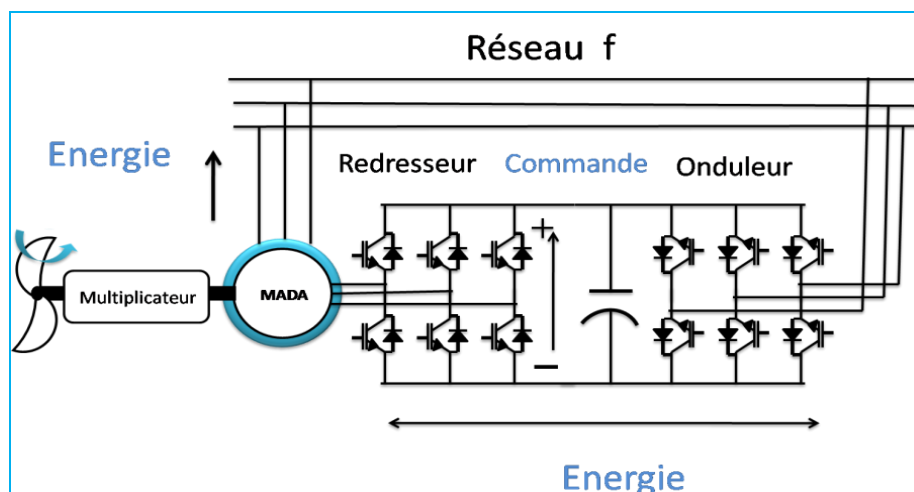


Figure. I.26 Machine asynchrone à double alimentation: structure de Scherbius avec convertisseurs MLI

I.10.2. Systèmes utilisant la machine synchrone

Les machines synchrones sont connues pour offrir des couples très importants à dimensions géométriques convenables. Elles peuvent donc être utilisées en entraînement direct sur les turbines éoliennes (sans multiplicateur mécanique), pour minimiser la maintenance et accroître la fiabilité [MEK_04].

I.10.2.1. Machines synchrones à rotor bobiné : font appel, le plus souvent, à une excitatrice associée à un redresseur tournant, pour éliminer tout contact glissant. Le rotor peut être à pôles lisses ou saillants et est généralement équipé de circuits amortisseurs. Pour certaines applications à forte puissance et à grande vitesse (30 MV et 30 000 tr/min par exemple), on utilise un rotor cylindrique massif. Mais il est possible de s'affranchir de l'application à grande vitesse en utilisant une machine synchrone à aimants permanents basses vitesses à grand nombre de paires de pôles [MEK_04].

I.10.2.2. Machines synchrones à aimants permanents : Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction de 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. L'avantage d'avoir un bon rendement et un bon couple massique, Les inducteurs à aimants à haute énergie permettent de gagner environ 25% de masse par rapport à ceux de type bobiné. Ces qualités sont contre balancées par un coût plus élevé que la MAS. Le convertisseur de fréquence s'impose. C'est pourquoi les machines à entraînement direct sont toutes à vitesse variable.

Mais leur inconvénient principal provient de l'absence de possibilité de réglage du flux d'excitation [MEK_04].

I.11. Outil de travail "Simulation"

Comme on l'a vu auparavant, l'évolution de la technologie de l'énergie éolienne s'est fortement accélérée ces dernières années. La simulation numérique comme outil de conception de nouveaux produits a considérablement contribué à cette accélération. Cet outil informatique permet d'optimiser le fonctionnement et la conception de nouveaux produits ou services. En effet, cette façon de faire évite les nombreux problèmes rencontrés lorsqu'on travaille avec un système réel. Des essais sur le système réel sont évidemment

nécessaires, mais ils sont beaucoup moins longs si ce même système a été auparavant testé et optimisé à l'aide d'un simulateur numérique. Ainsi, ce dernier permet de réduire le cycle de conception d'éléments innovants. La difficulté réside dans la modélisation numérique du système que l'on veut modéliser. Une fois cette tâche ardue réalisée, tout le reste devient beaucoup plus simple.

Le simulateur numérique élaboré ici sur Matlab/Simulink est modulaire, ce qui permet d'étudier les différentes composantes de l'éolienne séparément. Cela dit, il est très important d'étudier le système éolien dans son ensemble car les éléments sont interdépendants. Selon les caractéristiques de l'éolienne examinée, les modules sont assemblés différemment. Si on veut par exemple étudier des fluctuations de la puissance électrique dont la constante de temps est de l'ordre de la seconde, il est inutile de modéliser les dynamiques plus rapides, telles que celles des convertisseurs, qui n'influencent pas ces fluctuations à la sortie [CAM_03].

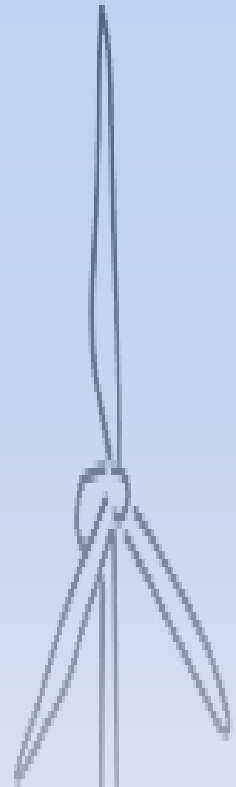
I.12. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné une vue d'ensemble sur les différentes turbines éoliennes utilisées dans l'industrie moderne pour la production d'énergie électrique. Afin d'arriver à une meilleure compréhension du fonctionnement des turbines éoliennes, et après un rappel des notions nécessaires à la compréhension de la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique (loi de Betz), nous avons décrit les différents éléments constitutifs de la turbine (type axe horizontale) ainsi que le mode de régulation de la vitesse de rotation. Enfin on présente les différents générateurs le plus utilisé pour produire de l'électricité dans le monde.

Dans le chapitre suivant, nous allons examiner la modélisation de la turbine à axe horizontale qui est utilisé dans la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

*Modélisation
d'une turbine
éolienne avec MPPT*

Chapitre II



II.1. Introduction:

Comme on l'a vu auparavant, pratiquement toutes les éoliennes sont à axe horizontal car, même si les éoliennes à axe vertical ont été prometteuses dans les années 80 et au début des années 90, leur faible rendement aérodynamique, ainsi que les fluctuations élevées de la puissance électrique produite, les ont écartées du marché

Alors, dans ce chapitre, nous nous intéressons uniquement à la modélisation d'une turbine éolienne à axe horizontal tri-pales (figure. II.1). Tous les modèles ont été développés en vue d'une exploitation par le logiciel Matlab/Simulink, qui permet de mettre en place assez rapidement des modèles ainsi que les lois de commande associées et est bien adapté à la simulation des phénomènes de nature mécanique et électromécanique étudiés ici. [ROG_04], [CAM_03]

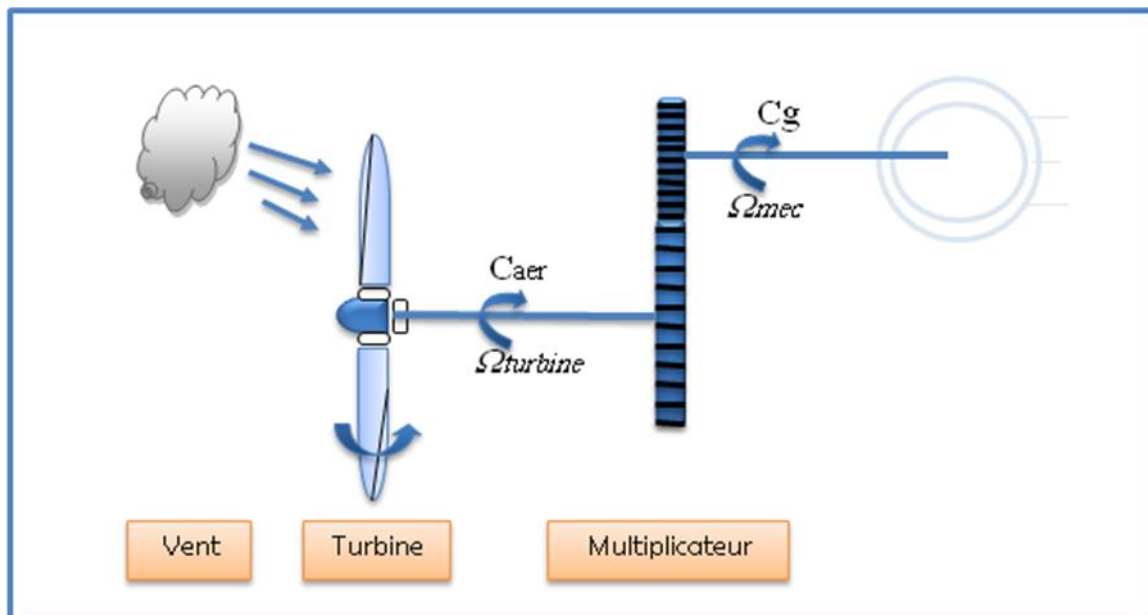


Figure. II.1 Schéma de la turbine éolienne

II.2. Modélisation du vent

La ressource en vent, du point de vue de sa distribution statistique, est primordiale dans un projet éolien et donc déterminante pour le calcul de production de l'électricité et de rentabilité. Les propriétés dynamiques du vent sont capitales pour l'étude de l'ensemble du système de conversion d'énergie car la puissance éolienne, dans les conditions optimales, est au cube de la vitesse du vent. La vitesse du vent est un vecteur tridimensionnel. Néanmoins, la direction du vecteur de vitesse du vent dans l'axe vertical n'a pas d'importance du point de vue de la turbine éolienne car elle n'est pas vue par sa surface active. Par simplification, le

vecteur de vitesse évolue dans le plan horizontal. Les turbines à axe horizontal sont dépourvues de tout dispositif d'orientation des pales (la surface active est toujours en face du vent), alors le modèle du vent comportemental est simplifié considérablement. La vitesse du vent peut être donc modélisée comme une fonction scalaire qui évolue dans le temps :

$$v(t) = f(t)$$

Elle sera modélisée, dans cette étude, sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques:

$$v(t) = A + \sum_{i=1}^N a_i \cdot \sin(b_i \cdot \omega_v \cdot t) \quad (\text{II.1})$$

Nous prendrons comme exemple dans notre modélisation l'équation suivante de vent

$$v(t) = 6.5 + 0.02\sin(0.1047t) + 0.2\sin(0.2665t) + 0.1\sin(1.2930t) + 0.02\sin(3.6645t) \quad (\text{II.2})$$

II.3. Modélisation d'une turbine éolienne à axe horizontal

La modélisation de la turbine consiste à exprimer la puissance extractible en fonction de la vitesse incidente du vent et des conditions de fonctionnement, sa vitesse de rotation en particulier. Cela permettra de connaître le couple éolien appliquée sur l'arbre lent de l'éolienne.

On obtient alors un modèle global composé de trois sous-systèmes [BEN_08]:

- La turbine.
- Le multiplicateur.
- L'arbre.

II.3.1. Hypothèse simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine

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 $\Omega_{turbine}$, relié à un multiplicateur de gain G . Ce multiplicateur entraîne une génératrice électrique (Figure II.2).

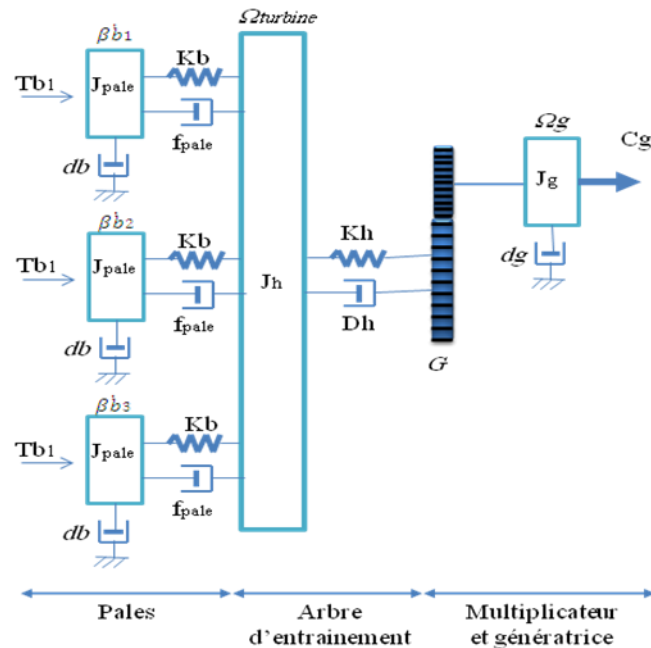


Figure. II.2 Système mécanique de l'éolienne

Les trois pales sont considérées de conception identique et possèdent donc :

- la même inertie J_{pale}
- la même élasticité Kb
- le même coefficient de frottement par rapport à l'air db

Ces pales sont orientables et présentent toutes un même coefficient de frottement par rapport au support f_{pale} . Les vitesses d'orientation de chaque pale sont notées $\dot{\beta}b_1$, $\dot{\beta}b_2$, $\dot{\beta}b_3$. Chaque pale reçoit une force Tb_1 , Tb_2 , Tb_3 qui dépend de la vitesse de vent qui lui est appliquée.

L'arbre d'entraînement des pales est caractérisé par :

- son inertie J_h
- son élasticité Kh
- son coefficient de frottement par rapport au multiplicateur Dh

Le rotor de la génératrice possède :

- une inertie J_g
- un coefficient de frottement dg

Ce rotor transmet un couple entraînant (C_g) à la génératrice électrique et tourne à une vitesse notée Ω_{mec} .

Si l'on considère une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales, et donc une égalité de toutes les forces de poussée ($Tb_1 = Tb_2 = Tb_3$) alors on peut considérer l'ensemble des trois pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la

somme de toutes les caractéristiques mécaniques. De part la conception aérodynamique des pales, leur coefficient de frottement par rapport à l'air (db) est très faible et peut être ignoré. De même, la vitesse de la turbine étant très faible, les pertes par frottement sont négligeables par rapport aux pertes par frottement de la cote de la génératrice.

On obtient alors un modèle mécanique comportant deux masses (Figure II.3) dont la validité (par rapport au modèle complet) a déjà été vérifiée. [AIM_04]

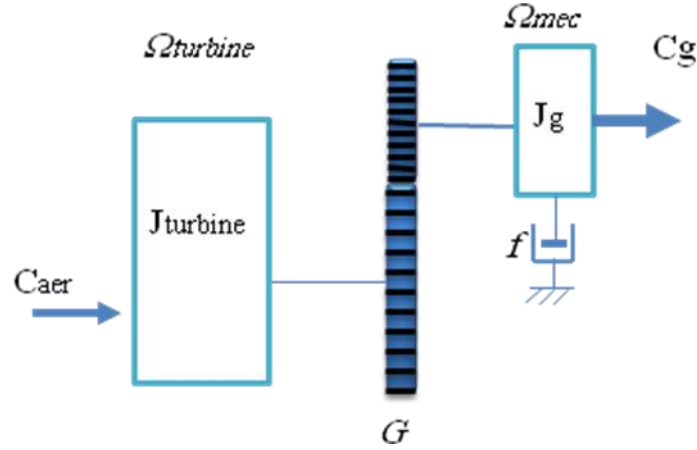


Figure. II.3 Modèle mécanique simplifié de la turbine

II.3.2. 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 (Figure II.1).

L'énergie cinétique d'une masse d'air m (ρV) qui se déplace avec la vitesse v , est:

$$E_v = \frac{1}{2} m v^2 \quad (\text{II.3})$$

On connaît la puissance disponible par dérivation de l'énergie cinétique [LAV_05]

$$P_v = \frac{dE}{dt} \quad (\text{II.4})$$

Si cette énergie pouvait être complètement récupérée à l'aide d'un dispositif ayant la surface S ($S = \pi.R^2$), situé perpendiculairement à la direction de la vitesse du vent, la puissance du vent ou puissance éolienne instantanée serait alors :

$$P_v = \frac{d}{dt} \left[\frac{1}{2} \rho V v^2 \right] \quad (\text{II.5})$$

$$P_v = \frac{d}{dt} \left[\frac{1}{2} \rho (S \cdot x) v^2 \right] = \frac{1}{2} \rho \left(S \cdot \frac{dx}{dt} \right) v^2 \quad (\text{II.6})$$

$\frac{dx}{dt}$: la vitesse de vent v

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S v^3 \quad (\text{II.7})$$

Où

- ρ est la densité de l'air (approx. 1.22 kg.m^3 à la pression atmosphérique à 15°C).
- S est la surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pale.
- v est la vitesse du vent.

En réalité, le dispositif de conversion (la turbine éolienne) extrait une puissance aérodynamique P_{aer} inférieure à la puissance disponible P_v .

$$P_{aer} = C_p \cdot P_v = C_p(\beta, \lambda) \cdot \frac{1}{2} \rho S v^3 \quad (\text{II.8})$$

Le coefficient de puissance C_p , représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne ($\frac{P_{aer}}{P_v}$). Il dépend de la caractéristique de la turbine. [AIM_04]

Ce coefficient varie avec l'angle d'orientation des pales (β) et le ratio de vitesse (λ)

Le ratio de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{R \Omega_{turbine}}{v} \quad (\text{II.9})$$

Où $\Omega_{turbine}$ est la vitesse de la turbine.

Connaissant la vitesse de la turbine, donc le couple aérodynamique directement déterminé par :

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turbine}} = C_p \frac{1}{2} \rho S v^3 \frac{1}{\Omega_{turbine}} \quad (\text{II.10})$$

❖ Coefficient de puissance C_p :

Généralement le coefficient C_p présente par des graphiques. Le coefficient C_p est différent d'une turbine à l'autre, qui est généralement fourni par le fabricant et peuvent être utilisées, pour définir une approximation mathématique. En effet, celle-ci a été développée dans la littérature pour calculer le coefficient C_p . La modélisation peut se faire avec une approximation polynomiale d'ordre N

$$C_p(\lambda) = a_0 + \sum_{i=1}^N a_i \lambda_i \quad (\text{II.11})$$

Dans ce sens. Nous avons donc choisi de modéliser une éolienne de 4 KW, d'où, le coefficient C_p est donné par la formule suivante [MEK_04]:

$$C_p = 7.95633\lambda^5 \cdot 10^{-5} - 17.375\lambda^4 \cdot 10^{-4} + 9.86\lambda^3 \cdot 10^{-3} - 9.4\lambda^2 \cdot 10^{-3} + 6.38\lambda \cdot 10^{-2} + 0.001$$

(II.12)

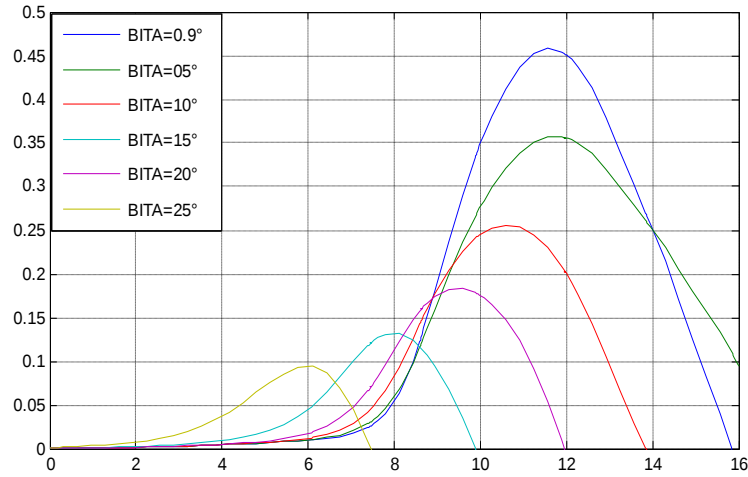


Figure. II.4 Caractéristique du coefficient de puissance en fonction de la vitesse relative λ

On peut remarquer sur la (Figure. II.4) que le coefficient de puissance passe par un maximum pour une valeur particulière du rapport de vitesse que l'on appelle λ_{opt} . Pour laquelle on a coefficient de puissance C_p maximale, et par voie de conséquence une puissance captée maximale. Il est alors possible d'élaborer des lois de commande qui permettent de capter la puissance maximale quelque soit la vitesse du vent jusqu'à la puissance nominale de la génératrice où la puissance extraite est limitée à cette valeur. [DAV_07]

La valeur maximale du coefficient C_p est 0,548 correspond à $\lambda = 6,4$.

II.3.3. Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice (Figure II.1).

Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes :

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \quad (II.13)$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (II.14)$$

II.3.4. Equation dynamique de l'arbre [AIM_04]

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.

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \quad (II.15)$$

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

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (II.16)$$

Où J est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice. Ce couple mécanique prend en compte, le couple électromagnétique C_{em} produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux C_{vis} , et le couple issu du multiplicateur C_g

Le couple résistant du aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux f : $C_{vis} = f \cdot \Omega_{mec}$

En prenant en compte l'inertie et les frottements de paliers la voilure peut être présentée comme dans la figure. II.5

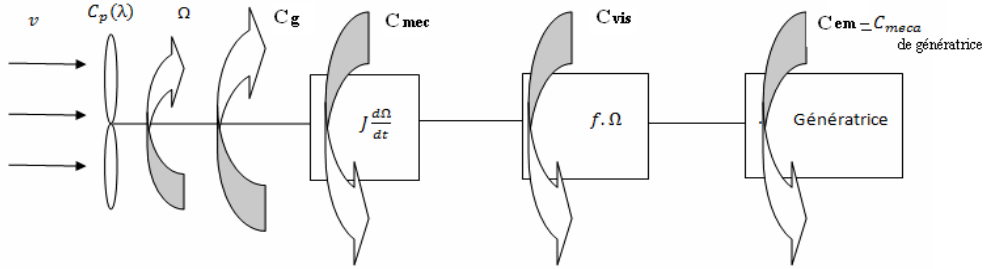


Figure. II.5 Modèle d'une turbine éolienne

L'équivalent électrique d'un tel système inertiel est présenté dans la figure. II.6.

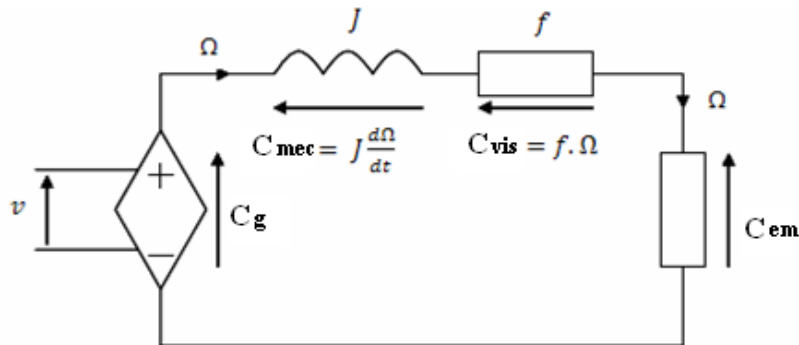


Figure. II.6 Schéma électrique équivalent de la turbine d'une éolienne

L'équation mécanique qui gère un tel ensemble est donnée par :

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis}$$

$$C_g - C_{em} = J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} + f \cdot \Omega_{mec} \quad (II.17)$$

D'où en transfer de LAPLACE on peut obtenir la vitesse :

$$\Omega_{mec} = \frac{1}{Js+f} (C_g - C_{em}) \quad (II.18)$$

II.4. Modèle de la turbine en MATLAB/SIMULINK :

Le modèle de la turbine se déduit aisément de les équations dessus et est représenté sur la Figure. II.7, Figure. II.8

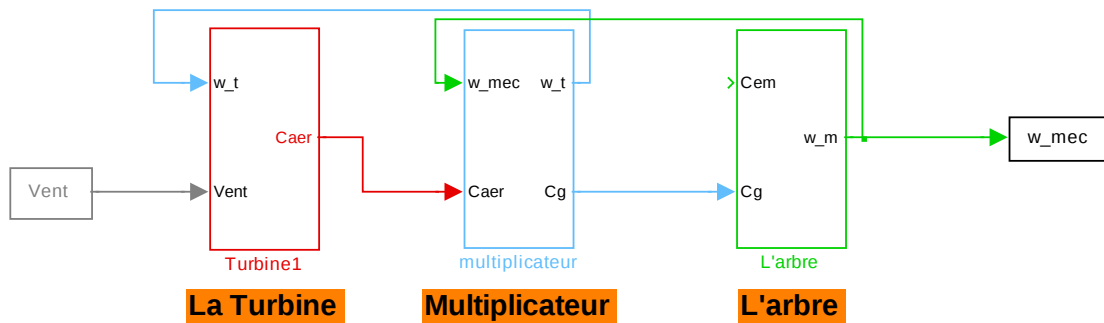


Figure. II.7 Modèle en bloc de la turbine

La turbine génère un couple aérodynamique transmis au multiplicateur. Ce couple peut être calculé à partir des valeurs de la vitesse du vent et la vitesse de rotation de la turbine.

Le multiplicateur transforme la vitesse de la turbine et le couple aérodynamique respectivement en vitesse mécanique et en couple du multiplicateur.

La turbine peut être ainsi commandée par l'action du couple électromagnétique du convertisseur électrique. La vitesse du vent est considérée comme une perturbation.

II.5. Stratégie de commande de la turbine:

Comme il est illustré sur la figure. II.8, on distingue quatre (04) zones principales de fonctionnement.

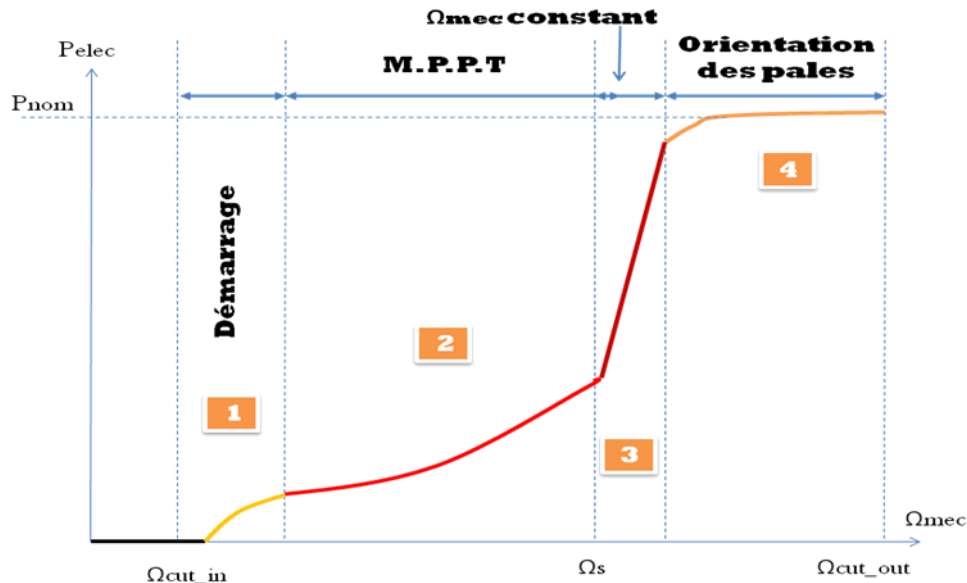


Figure. II.8 Caractéristique puissance - vitesse d'une éolienne

-Zone1 : A partir d'une certaine vitesse minimale nécessaire à l'entraînement de l'aérogénérateur l'éolienne commence à tourner ;

-Zone2 : A partir d'une certaine vitesse seuil de la génératrice (correspondant à un glissement de 30%), un algorithme de commande permettant l'extraction du maximum de puissance du vent (MPPT) est appliqué. On maintient l'angle de calage à sa valeur minimale qui correspond au maximum du coefficient de puissance ;

-Zone3 : Au-delà, l'éolienne fonctionne à vitesse constante. Dans cette zone la puissance atteint jusqu'à 90% de sa valeur nominale ;

-Zone4 : arrivée à la puissance nominale, la vitesse doit être limitée, c'est la phase où intervient la limitation de vitesse par orientation des pales (angle de calage), c'est le «Pitch Control». [MER_07], [AIM_04].

Dans ce qui suit nous sommes intéressés à la zone 2 ou la maximisation de l'énergie électrique extraite, cette opération est réalisée par le contrôle du couple électromagnétique généré.

II.6. Maximisation de la puissance extraite:

En pratique, la vitesse de rotation est contrôlée par le couple électromagnétique, de manière à maximiser la puissance électrique générée, c'est le principe de MPPT. On distingue deux structures de commande [MER_07]:

- Le contrôle par asservissement de la vitesse mécanique;
- Le contrôle sans asservissement de la vitesse mécanique.

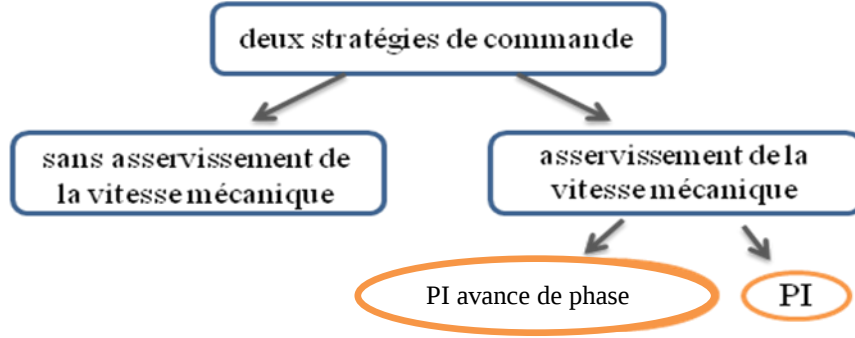


Figure. II.9 Stratégies de commande de la turbine

Il est difficile de mesurer précisément la vitesse du vent qui est de nature une grandeur très fluctuante. Une mesure erronée de la vitesse conduit donc à une dégradation de la puissance captée selon la technique MPPT. C'est pourquoi la plupart des turbines éoliennes sont contrôlées sans asservissement de la vitesse [MER_07], [AIM_04].

II.6.1. Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse

Cette structure de commande repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent. Dans ce cas on obtient :

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} = 0 = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (II.19)$$

Si on néglige l'effet du couple des frottements visqueux, on obtient :

$$C_{em} = C_g \quad (II.20)$$

A partir de la mesure de la vitesse mécanique et la connaissance d'une estimation de la vitesse du vent, on obtient

$$C_{aer} = C_p \frac{1}{2} \rho S \frac{1}{\Omega_{turbine\ estimée}} v_{estimée}^3 \quad (II.21)$$

Avec:
$$v_{estimée} = \frac{\Omega_{turbine\ estimée} \cdot R}{\lambda} \quad (II.22)$$

On fixe le ratio de vitesse à la valeur $\lambda_{c_p \max}$, qui correspond au maximum du coefficient de puissance $C_{p \max}$ et, en regroupant les équations précédentes, on aura l'expression du couple de référence qui est proportionnel au carré de la vitesse de la génératrice.

$$C_{em_ref} = \frac{\rho \pi R^5}{2 G^3} \frac{C_p}{\lambda^3 C_{p \max}} \Omega_{mec}^2 \quad (II.23)$$

La figure. II.10.a, figure. II.10.b représente le schéma bloc et le modèle de maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse.

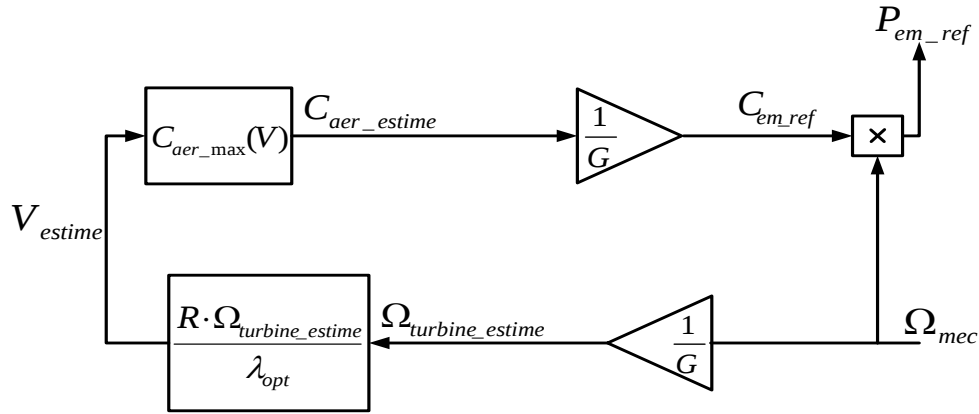


Figure. II.10.a Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse

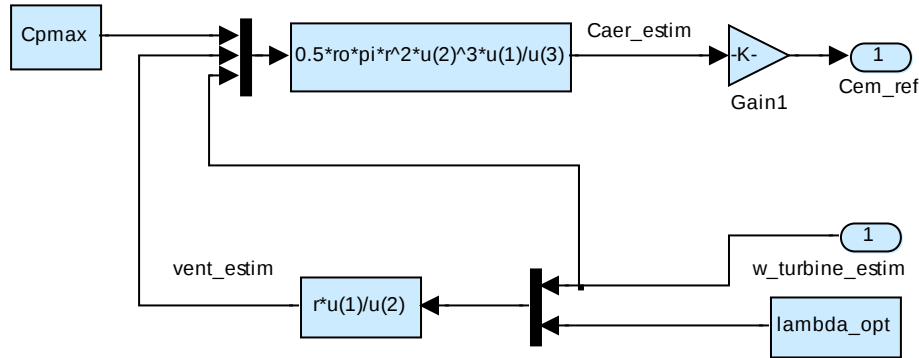


Figure. II.10.b Modèle de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse en MATLAB/SIMULINK

Energie éolienne en Algérie

Les travaux de recherche pour la détermination du potentiel énergétique éolien sont en cours. Ceux-ci permettront l'établissement d'un ATLAS éolien Algérien et de localiser les régions destinées à recevoir les applications des systèmes de conversion éolienne.

Ce potentiel énergétique convient parfaitement pour le pompage de l'eau particulièrement sur les Hauts Plateaux et la Zone Côtière.

Rappelons néanmoins que les premiers résultats montrent que l'Algérie a un régime de vents modérés 2 à 6 m/s; voir carte des vents, figure 2.13, [5].

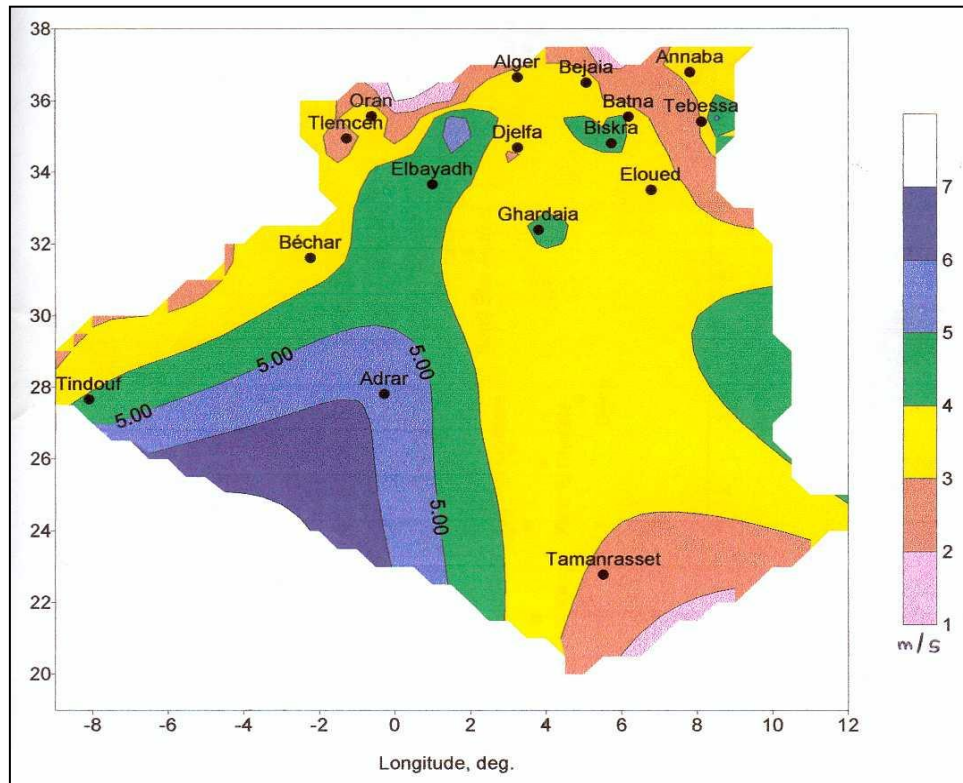


Figure 2.13: Carte préliminaire des vents de l'Algérie Vitesse du vent en (m/s)

II.7. Résultats de Simulation et interprétations

Nous présenterons la Simulation du fonctionnement de la partie mécanique de l'éolienne. Les Simulations sont faites dans l'environnement MATLAB/SIMULINK. Cet environnement nous permet de développer les schémas blocs de régulation et de les associer aux modèles de machine

Nous n'allons pas raccorder l'hélice et le multiplicateur à une génératrice mais simplement observer le couple produit à la sortie du multiplicateur en fonction de l'évolution du vent.

Pour ce faire, Nous avons besoin de la valeur du couple électromagnétique de multiplicateur, couple qui serait imposée par la génératrice en fonction de la puissance qu'elle produit.

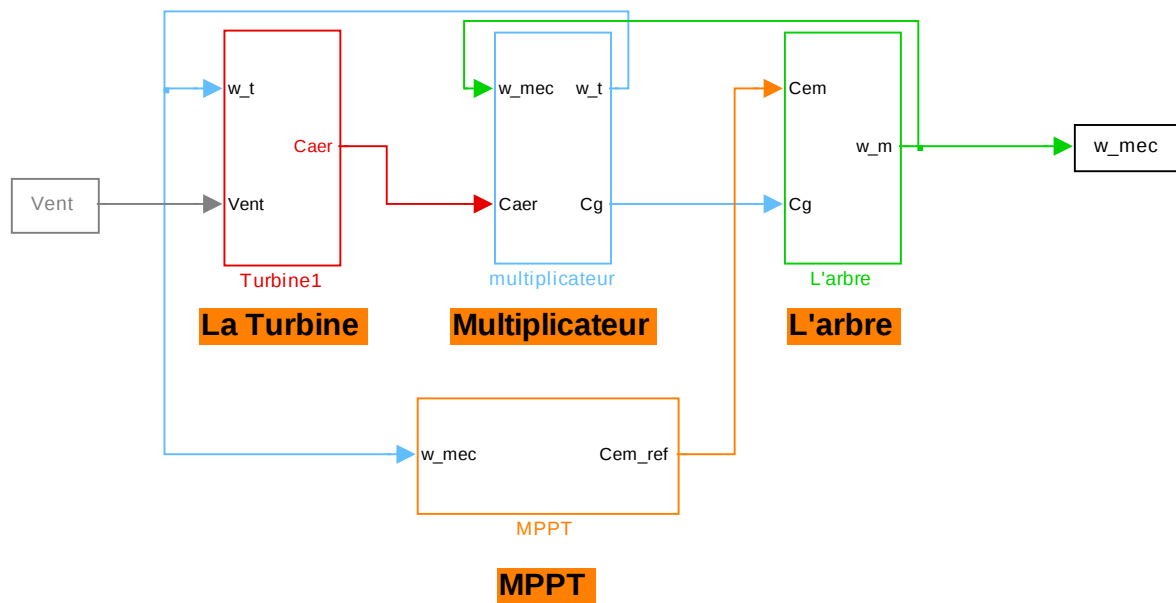


Figure. II.13 Modèle de la turbine avec la Commande en MATLAB/SIMULINK

Nous allons donc nous fixer une couple référence et utiliser le profil de vent de la figure. II.11 pour valider le modèle établi précédemment. Nous observerons l'allure de la Vitesse mécanique et de la puissance de référence en fonction de l'évolution du vent.

Où les composants électriques utilisés donnés en Annexe .



A. Profil du vent :

La figure (II.13) présente le profil du vent qui sera appliqué pour la turbine éolienne.

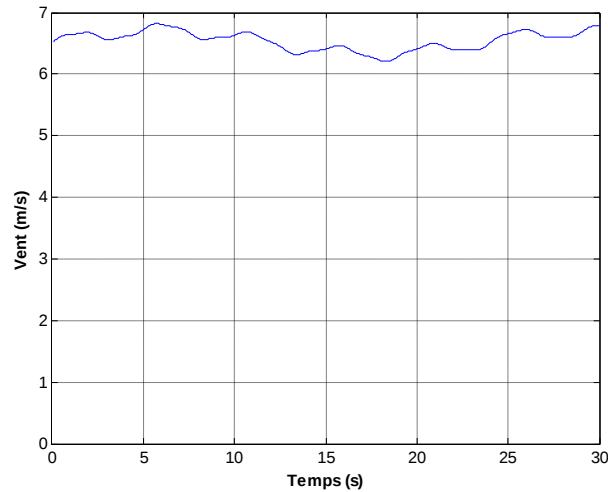


Figure. II.15 Profil du vent

B. Le coefficient de puissance :

La figure (II.14) montre le coefficient de puissance obtenu par le profil du vent présenté sur la figure (II.13).

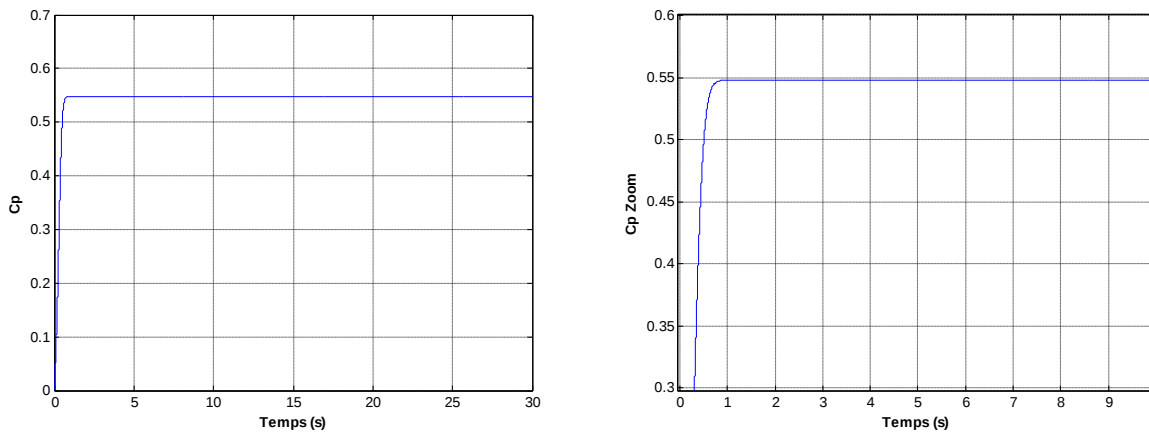


Figure. II.16 Coefficient de puissance avec un zoom

Ce coefficient de puissance est obtenu pour un angle de calage β fixe ($\beta=2^\circ$), qui nous donne un $\lambda_{optimal}$.

On remarque que le C_p atteint une valeur moyenne de 0,54, il cherche à être gardé au maximum possible pour but de maximiser la production, et varie légèrement selon la variation de la vitesse du vent.

C. La puissance électrique et la Vitesse mécanique :

En négligeant les pertes d'origine électrique, la puissance électrique devient égale à la puissance électromagnétique définie par : $(\Omega_{mec} \cdot C_{em})$. Cette puissance -puissance de référence- sera comptabilisée négativement car elle s'oppose à la puissance aérodynamique "pour respecter la convention récepteur de l'ensemble". Lorsque ces deux puissances sont égales, l'éolienne tourne à vitesse constante.

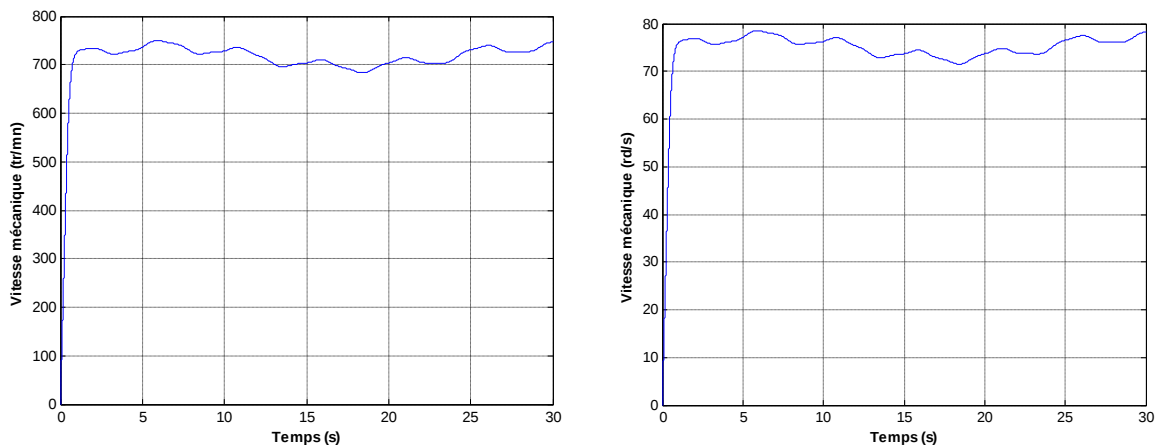


Figure. II.17 Vitesse mécanique

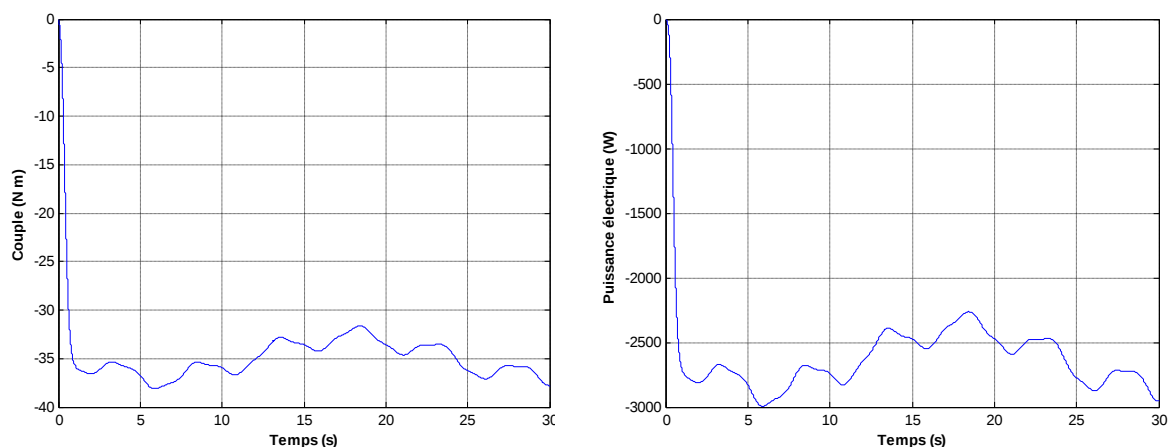


Figure. II.18 Couple et Puissance électrique produite

II.8. Conclusion:

Dans ce chapitre nous avons détaillé une modélisation des différentes parties de la turbine éolienne prenant en compte les caractéristiques du profil de pales, l'angle décalage de celle-ci et le profil de vent utilisé.

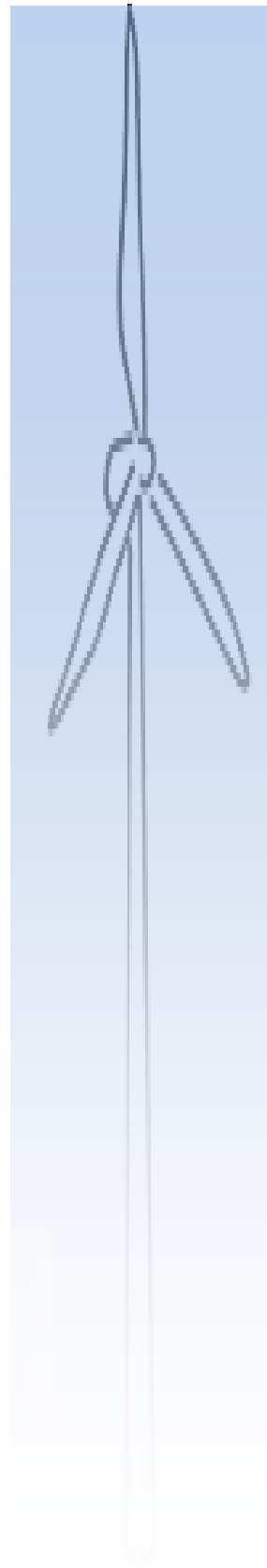
Nous avons modélisé l'ensemble mécanique incluant le multiplicateur, permettant l'interconnexion avec une génératrice qui aura le couple comme entrée et la vitesse comme sortie. Ce modèle permet d'obtenir l'allure du couple et simule un comportement mécanique proche de la réalité tout en étant facilement exploitable pour les simulations. [BOY_06]

Cette partie mécanique est un élément essentiel dans la conversion éolienne. Elle comporte sa propre commande afin de maximiser la puissance extraite du vent par MPPT .

Nous allons maintenant nous intéresser aux autres parties de l'éolienne afin de modéliser l'ensemble et étudier le fonctionnement global du système de conversion d'énergie.

Conclusion

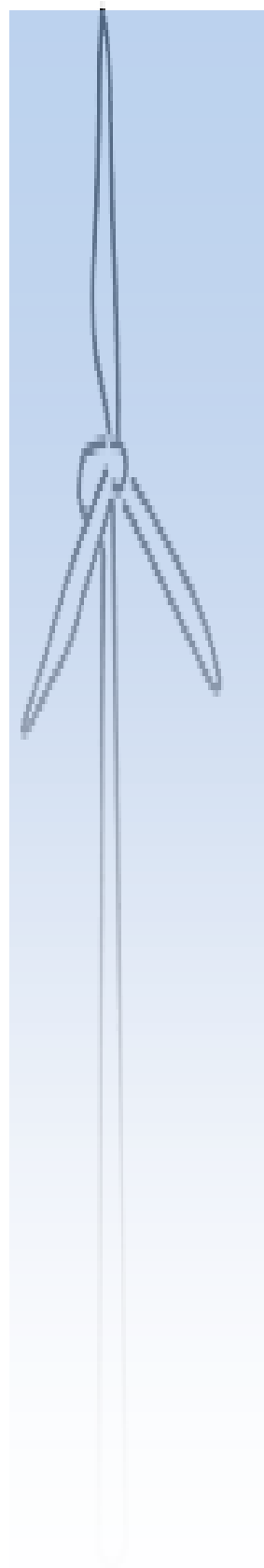
générale



Le travail effectué dans ce mémoire a comme objectif la modélisation de différents composants de la production décentralisée de l'énergie éolienne, et l'étude de différents systèmes de contrôle de la génératrice.

Pour ce faire, on a présenté l'état de l'art sur les différents types d'éoliennes existantes, les différentes génératrices utilisées, notre étude a été orientée vers un système éolien d'axe horizontal de puissance fonctionnant à vitesse variable

Liste
de
Bibliographie



[AIM_04] S. EL-AIMANI, «Modélisation de Différentes Technologies d'Eoliennes Intégrées dans un Réseau de Moyenne Tension», Thèse de Doctorat d'Etat en Electronique et Génie Electrique. Ecole Centrale de Lille (ECL), 2004.

[CAM_03] H. CAMBLONG, «Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable», thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Arts et Métiers de Bordeaux, Décembre 2003.

[MEK_04] N. MEKKAOUI, «Contribution à la Modélisation et à la Commande d'une Mini-Centrale Eolienne à Base de Machines à Induction Simple et Double Alimentée», Mémoire de Magistère, Laboratoire des Systèmes Propulsion-Induction Electromagnétiques LSP-IE Batna, Département d'Electrotechnique, 2004.

[ABD_07] A. ABDELLI, «Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive», Thèses de Doctorat, octobre 2007.

[LAV_05] N. LAVERDURE, «Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires», Thèses de Doctorat, INPG, Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, 2005.

[BOY_06] A. BOYETTE, «Contrôle-Commande d'un Générateur Asynchrone à Double Alimentation avec un système de stockage pour la production Eolienne Thèse de Doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy I, 2006.

[POI_03] F. Poitiers, «Etude et Commande de Génératrice Asynchrones pour l'utilisation de l'Energie Eolienne -Machine asynchrone à cage autonome -Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau», Thèse de Doctorat d'Etat en Electronique et Génie Electrique. Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, 2003.

[ROG_04] V. ROGEZ, «Modélisation Simplifiée de Sources de Production Décentralisée pour des Etudes de Dynamique des Réseaux. Application à l'Intégration d'une Production Eolienne dans un Réseau de Distribution Insulaire.», Thèse de Doctorat, Université d'Artois décembre 2004, France

[SAL_07] G. SALLOUM, «Contribution à La Commande Robuste de La Machine Asynchrone A Double Alimentation, Thèse de Doctorat, École doctorale G.E.E.T, 2007.

[KHE_07] L. KHETTACHE, «Etude et Commande d'un Système Eolien à Base d'une Machine Electrique Double Alimentée», Mémoire de Magistère, Laboratoire d'Electrotechnique de Batna (LEB), Département d'électrotechnique, 2007.

[DAV_07] A. DAVIGNY, «Participation aux Services Système de Fermes d'éoliennes à Vitesse Variable Intégrant du Stockage Inertiel d'énergie», Thèse de Doctorat, Département de formation doctorale en génie électrique, Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance de Lille, 2007.

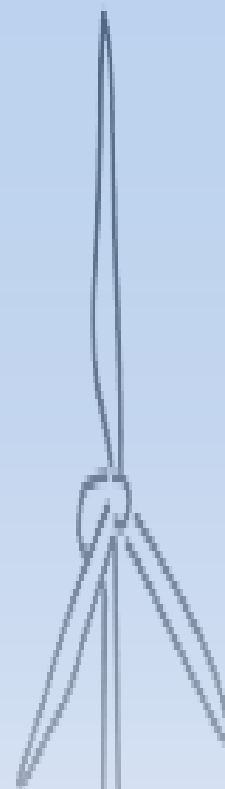
[MER_07] F. MERRAHI, «Alimentation et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (Application à l'énergie éolienne)», Mémoire de Magistère, Ecole Nationale polytechnique, Département du Génie Electrique, Laboratoire de commande des processus, ENP d'Alger 2007.

[SOU_07] A. MOUSSA SIDDO, I. SOUMANA NOUHOU, «Etude du Générateur Asynchrone pour L'utilisation dans La Production de L'énergie Eolienne», Projet de Fin d'Etude, Ecole Nationale Polytechnique, Département de Génie Electrique, 2007.

[BEN_08] Y. A. BENCHERIF, «Modélisation et commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation pour la production de l'énergie éolienne», Projet de Fin d'Etude, Ecole Nationale Polytechnique, Département du Génie Electrique, El Harrach, Alger, 2008.

[AZA_08] R. AZAIZIA, «Etude et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation Alimentée Par un Convertisseur Multi niveaux», Mémoire de Magistère, Département Automatisation des Procédés Industriels et Electrification, Laboratoire de recherche sur l'électrification des entreprises industrielles (LREEI), BOUMERDES 2008.

Annexes



Annexe A :*Paramètres utilisés***A.1. Les valeurs nominales :**

4 kW ; 220/380 V ; 50 Hz ; 15/8.6 A ; 1455 tr /min

A.2. Paramètres de la turbine éolienne utilisée :

- Nombre de pales = 3.
- Rayon de la surface balayée par les pales : $R = 3\text{m}$.
- Gain du multiplicateur : $G = 5.4$.
- Densité de l'air à 15°C : $\rho = 1.225 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

A.3. Constantes mécaniques :

- Moment d'inertie de la turbine $J_{\text{turbine}} = 0.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$.
- Coefficient de frottement visqueux : $f = 0.001 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} / \text{rd}$.