

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



Centre Universitaire d'EL-Oued
Institut des Sciences et de Technologies

Mémoire de Fin d'Etude
Présenté pour l'obtention du diplôme de

LICENCE ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et de Technologies

Filière: Génie Électrique

Spécialité: *Réseaux Electriques*

Thème

**Techniques d'Extraction du Maximum de la
Puissance Utile d'une Eolienne à Vitesse
Variable**

Dirigée par:

-TIR Zoheir

Réalisée par:

-Bouamra Dhia Elhak
-Beddi Nasser

Soutenu le 10 Juin 2012

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A ma mère : BELAID Saida avec toute mon affection.

A mon père : BOUAMRA Rachid avec toute ma reconnaissance.

A mon grand-père et ma grand-mère

mes oncles, mes tantes, leurs conjoints ainsi que leurs enfants,

A tous les membres de ma grande famille

A mes frères : MOATEZ – SAIF - HAMMOUDI

A mes sœurs : SOUHAILA - RAOUA

A tout les enseignants et les profs qui m'ont appris durant toutes mes années d'étude et tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.

A tous mes collègues de la promotion 2012 plus spécialement

"Bouamra Dhia Elhak"

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A ma mère : WALLABI Khadidja avec toute mon affection.

A mon père : BEDDI Bachir avec toute ma reconnaissance.

A mon grand-père et ma grand-mère

mes oncles, mes tantes, leurs conjoints ainsi que leurs enfants,

A tous les membres de ma grande famille

A mes frères et mes sœurs

*A tout les enseignants et les profs qui m'ont appris durant toutes mes
années d'étude et tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.*

A tous mes collègues de la promotion 2012 plus spécialement

"Beddi Nacer"

Remerciements

Au nom d'Allah, le Tout - Miséricordieux, le Très - Miséricordieux

La louange est à Allah l'unique et la paix et le salut sur celui qui n'a point de messager après lui et sur sa famille, ses compagnons et tous ceux qui suivent son chemin jusqu'au jour de la résurrection.

*Avant tous, nous remercions Dieu le tout puissant qui nous donne le courage
Et la patience pour réaliser ce travail, malgré toutes les difficultés rencontrées.*

Nous commençons par notre promoteur

Monsieur TIR zoheir

Qui nous a donné l'occasion de travailler sur le sujet passionnant, et pour sa confiance, tous ses conseils et critiques sur le plan scientifique qui nous permet de bien orienter nos recherches.

Des remerciements vont également à tous ceux et celles qui nous ont apporté, de près ou de loin, orientation, soutien et aide dans la réalisation et la concrétisation de ce travail

Enfin une pensée pleine de reconnaissance à tous les enseignants du Faculté des Sciences Et Technologies d'EL-OUED, pour leurs efforts et leur collaboration lors de notre cursus

*« Tout ce que je sais, c'est que je ne sais rien »
Platon*

Table des Matières

INTRODUCTION GENERALE	1
------------------------------------	----------

Chapitre I

Généralité sur les systèmes d'énergie éolienne

NO TABLE OF CONTENTS ENTRIES FOUND.

Chapitre II

Modélisation et simulation de la turbine éolienne

NO TABLE OF CONTENTS ENTRIES FOUND.

NO TABLE OF CONTENTS ENTRIES FOUND.

Liste des Figures

No table of figures entries found.
No table of figures entries found.

Liste des symboles

V : Vitesse du vent	$\Omega_{\text{turbine-estime}}$: Vitesse mécanique estimée de la turbine
C_{aer} : Couple aérodynamique de l'éolienne	V_{estime} : Vitesse du vent estimée
β : Angle d'orientation des pales	$J_g = (\text{kg.m}^2)$: Moment d'inertie du rotor de la génératrice
R : Rayon de la pale	$C_{\text{aer-estime}}$: Couple aérodynamique estimé
Ω_{turbine} : Vitesse angulaire de la turbine	$C_{\text{em-ref}}$: Couple électromagnétique reference
C_g : Couple résistant (issu du multiplicateur)	V_1, V_2 : Vitesse du vent respectivement en amont et en aval de l'éolienne
Ω_{mec} : Vitesse mécanique de la génératrice	E_v : l'énergie cinétique de vent
G : Gain du multiplicateur	E : l'énergie cinétique
C_g : Couple entraînant de la génératrice	K : Gain de la boucle de retour du contrôle indirect
ρ : Masse volumique de l'air en température ambiante ($15 \pm C$)	
S : Surface circulaire balayée par la turbine ($S = \pi \cdot R^2$)	
λ : Ratio de vitesse	
J_{turbine} : Inertie de la turbine	
C_{mec} : Couple mécanique total appliqué au rotor de l'éolienne	
C_{em} : Couple électromagnétique	
C_{vis} : Couple des frottements visqueux	
f : Coefficient des frottements visqueux	
J : Inertie totale sur l'arbre	
P_{mec} : Puissance mécanique fournie par l'arbre	
C_p : Coefficient de puissance de la turbine	
P_v : Puissance de l'éolienne	
P_{aer} : La puissance aérodynamique	
P_{elec} : Puissance électrique générée par l'éolienne	
MPPT : Maximum Power Point tracking	
M : Masse d'air traversant le rotor éolien en 1s	

Introduction Générale

L'intense industrialisation des dernières décennies et la multiplication des appareils domestiques électriques ont conduit à des besoins en énergie électrique considérables. Face à cette demande, toujours croissante de nos jours, les pays industrialisés ont massivement fait appel aux centrales nucléaires. Cette source d'énergie présente l'avantage indéniable de ne pas engendrer de pollution atmosphérique contrairement aux centrales thermiques, mais le risque d'accident nucléaire, le traitement et l'enfouissement des déchets sont des problèmes bien réels qui rendent cette énergie peu attractive pour les générations futures.

Face à ces problèmes, et de façon à limiter l'emploi de centrales nucléaires, plusieurs pays sont tournés vers une nouvelle forme d'énergie dite "renouvelable", cette énergie est l'énergie éolienne. Elle apparaît clairement en bonne place, non pas en remplacement des sources conventionnelles, mais comme énergie d'appoint complémentaire à l'énergie nucléaire. [1]

Notre étude sera divisé en deux chapitre :

Dans le premier chapitre, on présentera une généralité sur l'énergie éolienne, principaux composants d'une éolienne horizontale et aussi les différents types d'éoliennes, dans ce chapitre on va citer le principe de la conversion de l'Energie cinétique du vent en énergie mécanique et nous aurons présenté aussi les stratégies de commande de la turbine et leurs techniques d'extraction du maximum de la puissance.

Dans le second chapitre nous allons faire la modélisation du vent et d'une turbine éolienne à axe horizontal en considération les hypothèses simplificatrices et nous clôturerons ce chapitre par de résultats de simulation qui traduits le fonctionnement de la turbine.

Chapitre I

Généralité sur les systèmes d'énergie éolienne

I.1 Introduction

Depuis l'avènement des moulins à vent jusqu'aux premiers aérogénérateurs, la technologie des aéromoteurs (ou capteurs éoliens) a connu une évolution fulgurante surtout ces dernières décennies ; notamment dans le domaine de la production d'énergie électrique. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal) et leurs structures sont de plus en plus performantes. Outre leurs caractéristiques mécaniques, nous nous intéressons à l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique. En effet, il existe deux types d'éoliennes à savoir les éoliennes à axe vertical et les éoliennes à axe horizontal. Ainsi dans ce qui suit nous allons énoncer en première partie une généralité sur les différents types d'éoliennes, ensuite nous allons intéresser plus particulièrement aux éoliennes rapides à axe horizontal qui sont non seulement les plus répandues, mais aussi les plus efficaces, [2].

I.2. Historique :

Le vent est engendré par les variations de la densité et de la pression de l'air, dues au réchauffement inégal de la terre par le soleil, et par la rotation de la terre; il s'agit donc d'une ressource naturelle renouvelable. Le vent causé par le mouvement de l'air contient une grande quantité d'énergie. Les moulins à vent ont servi pendant des milliers d'années à capturer une partie de cette énergie pour accomplir différents travaux utiles. Les premiers moulins à vent étaient à axe vertical. Ils ont été employés dans les montagnes d'Afghanistan pour moudre des grains depuis le 7ème siècle avant Jésus Christ. Ce type de moulins est constitué d'un arbre et de lames horizontaux tournant dans le plan vertical. A partir de la Perse et du moyen Orient, les moulins à vent à axe horizontal se sont répandus à travers les pays méditerranéens et l'Europe Centrale. Le premier moulin à vent à axe horizontal est apparu en Angleterre vers 1180, en France en 1190 en Allemagne en 1222 et au Danemark en 1259. En Europe, les performances des moulins à vent ont été constamment améliorées entre le 12ème et le 19ème siècle. Vers 1800, environ 20000 moulins à vent étaient en service en France, et au Pays Bas 90% de l'énergie utilisée dans l'industrie provenait du vent. Vers la fin du 19ème siècle, des moulins à vent d'un rotor de 20 à 30 mètres de diamètre étaient présents en Europe. Ils étaient utilisés non seulement pour moudre des grains mais aussi pour le pompage d'eau.

L'industrialisation a mené à la disparition progressive des moulins à vent, même si en 1904 l'énergie éolienne fournissait encore 11% de l'énergie industrielle hollandaise et l'Allemagne avait plus de 18000 unités installées. [2].

Par ailleurs, la construction d'éoliennes multiples ne se développe pas sur le vieux continent mais en Amérique où elle apparaît en 1870. Elle conquiert tout le pays et revient en Europe, lieu de sa conception, en 1876, où elle s'implante alors, sous le nom de moulin américain.

Il ne fait aucun doute que les moulins à vent ont connu dans le passé, un grand succès. Ils ont fourni à L'homme l'énergie mécanique qui manquait à l'époque, à la réalisation de ses desseins. Mais avec l'invention de la machine à vapeur, du moteur à explosion et du moteur diesel, le développement de l'électricité, leur exploitation est négligée et souvent abandonnée. L'utilisation du vent semble par conséquent de plus en plus délaissée et son avenir très compromis. [2]

Cependant l'histoire réserve parfois des surprises, car après la crise pétrolière de 1974, avec la diminution du stock mondial en hydrocarbure et surtout la crainte d'une pollution de plus en plus envahissante et destructive pour l'environnement, l'énergie éolienne revient au premier plan de l'actualité et connaît un développement galopant. On cherche surtout à l'utiliser pour produire de l'énergie électrique suivant le principe exploité dans toutes les centrales électriques conventionnelles. Ainsi la demande mondiale d'éoliennes connaît une croissance rapide depuis une quinzaine d'années ; la majorité de la demande découle du souci d'aménager des centrales électriques utilisant des combustibles « moins polluants ». On aménage maintenant des parcs à éoliennes multiples produisant plusieurs mégawatts. Au cours des dix dernières années, la

puissance typique de génération d'électricité pour une seule éolienne est passée d'environ 100 kW à 2 MW ou davantage. Entre 1995 et la fin de 2003, environ 76% des nouvelles connections d'aérogénérateurs au réseau étaient installées en Europe. Les pays les plus avancés dans l'énergie éolienne sont : l'Allemagne avec une puissance installée de 14609 MW, le Danemark 3110 MW, l'Espagne 6202 MW, la Hollande 912 MW et le reste des pays européens 3873 MW. La puissance installée : en Amérique du nord est de 6677 MW, en Amérique du sud et centrale 139 MW, en Asie 3034 MW, en Afrique et au Moyen Orient 150 MW [2]. Avec certains projets d'énergie éolienne développés (au large des côtes), de grandes centrales éoliennes fournissent de l'électricité dans certaines parties du monde, à un prix aussi concurrentiel que celui de l'énergie produite par les installations conventionnelles (par ex. : les centrales nucléaires et les centrales thermiques au mazout ou au charbon).

I.3. Présentation du système éolien :

I.3.1 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'un générateur (Fig.I.1).

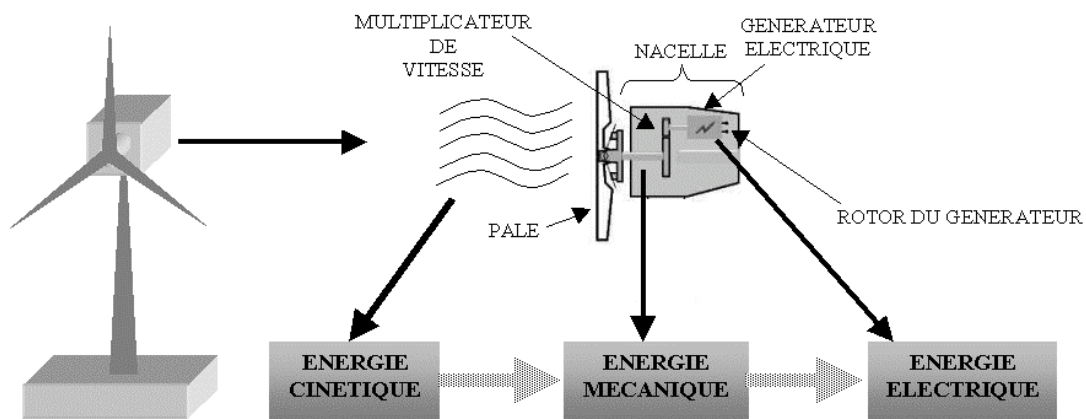


Fig. I. 1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.

I.3.2 Principaux composants d'une éolienne :

Une éolienne est généralement constituée de trois éléments principaux : la tour ou mat, la nacelle et l'ensemble rotor-pales.

I.3.2.1. La tour :

C'est un élément porteur, généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, il doit être le haut possible pour éviter les perturbations près du sol. La tour a une forme d'un tronc en cône où à l'intérieur sont disposés les câbles de transport d'énergie électrique, les éléments de contrôle, les appareillages de connexion au réseau de distribution ainsi que l'accès à la nacelle, [1].



Fig. I. 2 : la tour

I.3.2 .2. La nacelle :

Elle regroupe tout le système de transformation de l'énergie éolienne en énergie électrique et divers actionneurs de commande, [1], (Fig.I.3) :

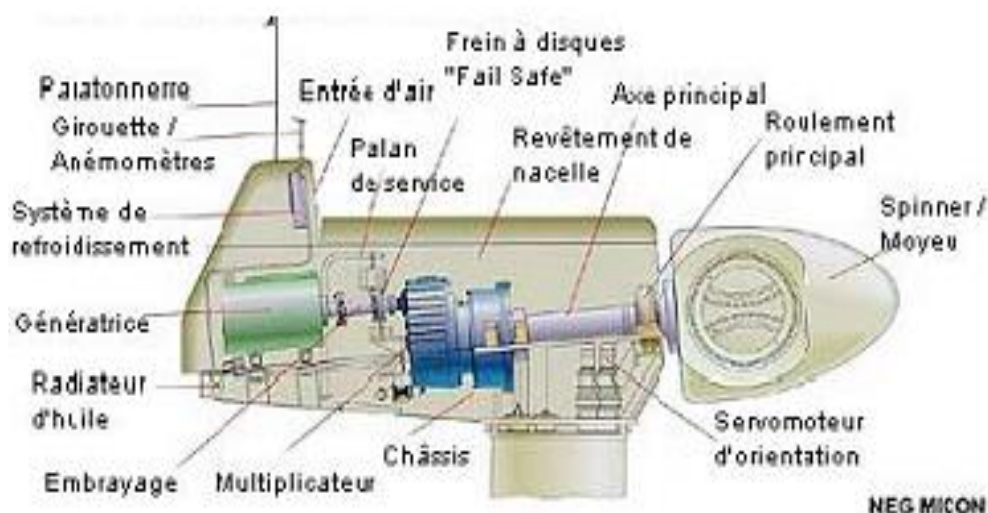


Fig. I. 3 : La nacelle.

a) Arbre lent :

Il relie le moyeu au multiplicateur et contient un système hydraulique permettant le freinage aérodynamique en cas de besoin, [1].

b) Un multiplicateur :

Il adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique (qui est généralement entraîné aux environs de 1500tr/min). Ce multiplicateur est muni d'un frein mécanique à disque actionné en cas d'urgence lorsque le frein aérodynamique tombe en panne ou en cas de maintenance de l'éolienne, [1].

c) le système de refroidissement :

Il comprend généralement un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice et un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur. Il existe un certain type d'éoliennes comportant un refroidissement à l'eau [1].

d) la génératrice :

La fonction première de la génératrice est de transformer l'énergie mécanique disponible sur l'arbre de sortie du multiplicateur en énergie électrique. Cette fonction peut être réalisée au moyen de deux types de machines: une génératrice asynchrone ou alors une génératrice synchrone. De plus un convertisseur de puissance associe éventuellement à la génératrice selon le type (direct ou indirect) de connexion au réseau [1].

e) Anémomètre :

Les signaux électriques émis par l'anémomètre sont utilisés par le système de contrôle-commande de l'éolienne pour la démarrer lorsque la vitesse du vent atteint la valeur seuil. De même le système de commande électrique arrête automatiquement l'éolienne si la vitesse du vent est supérieure à la valeur maximale pour assurer la protection de l'éolienne, [1] .

f) le système de contrôle-commande :

Il comporte un ordinateur qui surveille en permanence l'état de l'éolienne tout en contrôlant le dispositif d'orientation à titre d'exemple en cas de surchauffe du multiplicateur ou de génératrice, le système arrête automatiquement l'éolienne et le signale à l'ordinateur de l'opérateur via un modem téléphonique [1] .

I.3.2.3. Le rotor et les pales :

Le rotor de l'aérogénérateur est constitué de pales qui sont elles-mêmes montées sur un moyeu. Le rôle essentiel du rotor est de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Le rendement maximal du rotor est d'environ 59%(limite de Betz). Le nombre des pales a relativement peu d'influence sur les performances d'une éolienne .Plus le nombre de pale est grand plus le couple de démarrage sera grand et plus la vitesse de rotation sera petite. Les turbines uni et bipales ont l'avantage de peser moins, mais elles produisent plus de fluctuations mécaniques. Elles ont un rendement énergétique moindre, et sont plus bruyantes puisque elles tournent plus vite .Elles provoquent une perturbation visuelle plus importante de l'avis des paysagistes. De plus, un nombre pair de pales doit être évité pour des raisons de stabilité.

La pale est une pièce techniquement difficile à réaliser car elle doit obéir à certaines règles géométriques concernant le profil aérodynamique, mais elle doit aussi être fabriquée avec un matériau suffisamment résistant à une force de pression exercée par le vent et aux agressions extérieures telles que la pollution ou certaines particules qui se trouvent dans l'air.

Les pales sont réalisées en fibre de verre ou en matériaux composites comme la fibre de carbone qui est légère et résistante, [1] .



Fig. I. 4: Le rotor et les pales

I.3.2.4. Le moyeu :

C'est le support des pales, il doit être capable de supporter des à-coups importants, surtout au démarrage de l'éolienne, ou lors de brusques changements de vitesse du vent. C'est pour cette raison que le moyeu est entièrement moulé et non réalisé par soudure[1] .

I.3.3- Les différents types d'éoliennes :

I.3.3 .1-Les 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 [3] :

- Le rotor de Savonius (du nom de son inventeur, breveté en 1925) dont le fonctionnement est basé sur le principe de "traînée différentielle" utilisé dans les anémomètres : les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensité différente, il en résulte alors un couple moteur entraînant la rotation de l'ensemble.

L'effet est ici renforcé par la circulation d'air entre deux demi-cylindres qui augmente le couple moteur (Figure 1-2A).

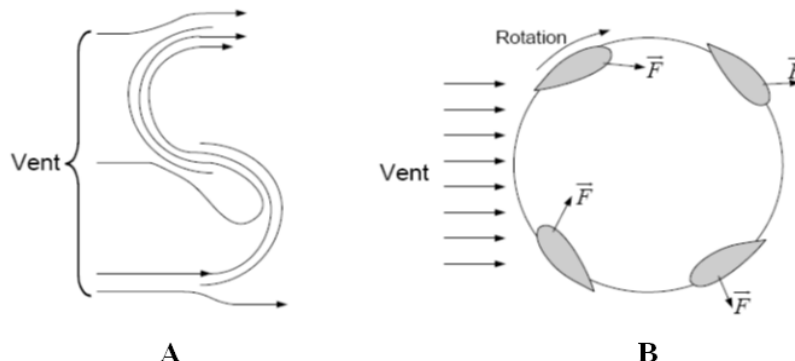


Fig. I. 5 : Principe du rotor de Savonius et de l'incidence variable.

- Les éoliennes à variation cyclique d'incidence dont la structure la plus répandue est celle de Darrieus (ingénieur français qui déposa le brevet au début des années 30). Leur fonctionnement

est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles (Fig. I. 6-B) est soumis à des forces de direction et d'intensité variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif. Ces forces sont créées par la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil et de la vitesse du vent. Cela signifie que la rotation du dispositif ne peut pas s'amorcer d'elle-même. Lorsqu'elle est à l'arrêt, l'éolienne doit donc être lancée par un dispositif annexe (montage d'une éolienne Savonius sur le même rotor ou utilisation de la génératrice en moteur).

Même si quelques grands projets industriels ont été réalisés, les éoliennes à axe vertical restent toutefois marginales et peu utilisées voire actuellement abandonnées. En effet la présence du capteur d'énergie près du sol l'expose aux turbulences et au gradient de vent ce qui réduit son efficacité. Elles sont de plus exposées à des problèmes d'aéroélasticité dus aux fortes contraintes qu'elles subissent. Enfin la surface qu'elles occupent au sol est très importante pour les puissances élevées [3].

I.3.3 .2.Les éoliennes à axe horizontal :

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement 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. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien [3].

Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité.

Notons cependant que certains travaux défendent la viabilité du rotor vertical en réalisant des études multi-critères [3].

Les concepts abordés dans la suite de cette étude se limiteront uniquement au cas des éoliennes à axe horizontal.

I.4. Energie cinétique du vent-conversion en énergie mécanique :

I.4.1. Loi de Betz :

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la Fig.I .6 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 , soit $(V_1+V_2)/2$ la masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales en une seconde est [3]:

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

La puissance P_m 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) :

$$P_m = \frac{m(V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (1.2)$$

Soit en remplaçant m par son expression dans (1.1):

$$P_m = \frac{\rho S (V_1 + V_2) (V_1^2 - V_2^2)}{4} \quad (1.3)$$

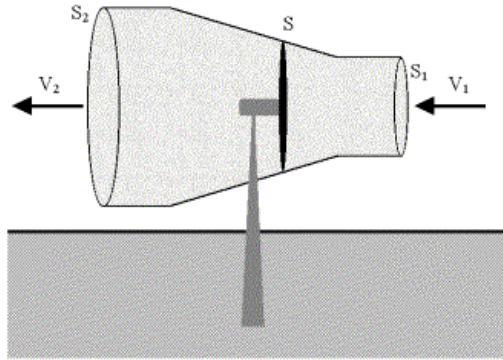


Fig. I. 7: Tube de courant autour d'une éolienne.

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V_1 , la puissance P_{mt} correspondante serait alors

$$P_{mt} = \frac{\rho S V_1^3}{2} \quad (1.4)$$

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

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left(1 + \left(\frac{V_1}{V_2}\right)\right) \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right)}{2} \quad (1.5)$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus (Fig.I.7), on s'aperçoit que le ratio P_m/P_{mt} 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.

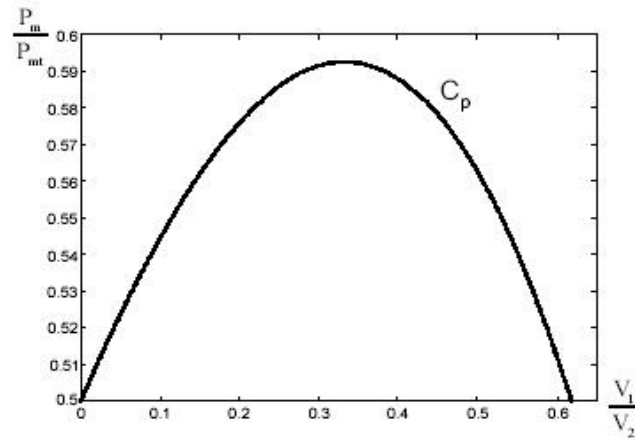


Fig. I. 8: Coefficient de puissance.

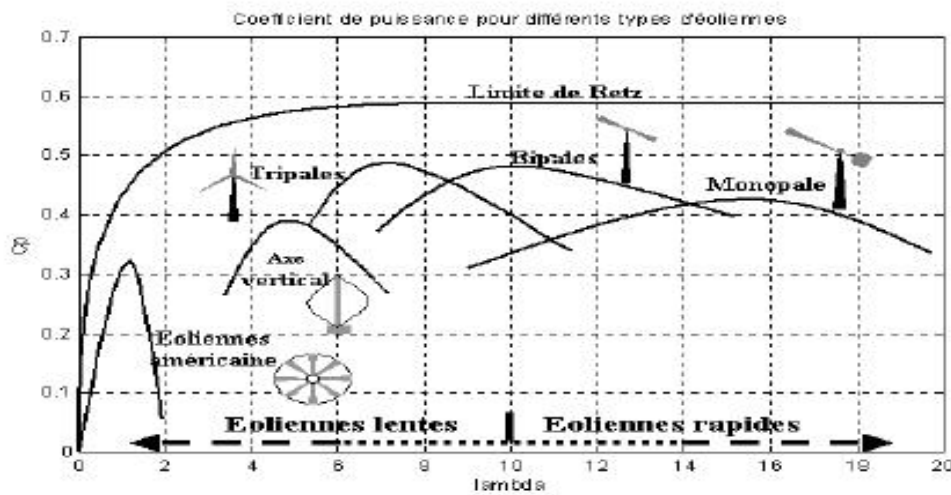


Fig. I. 9 : Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes.

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 (Fig.I.8) atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Les éoliennes à marche rapide sont beaucoup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique.

Elles possèdent généralement entre 1 et 3 pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation, les pales peuvent atteindre des longueurs de 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts. Les éoliennes tripales sont les plus répandues car elles représentent un compromis entre les vibrations causées par la rotation et le coût de l'aérogénérateur. De plus, leur coefficient de puissance (Fig.I.8) atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente.

Elles fonctionnent rarement au dessous d'une vitesse de vent de 3 m/s [3].

I.4.2. Production d'énergie mécanique :

En combinant les équations (1.1), (1.4) et (1.5), la puissance mécanique P_m disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi :

$$P_m = \frac{P_m}{P_{mt}} \cdot P_{mt} = C_p \cdot P_{mt} = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (1.6)$$

Avec:

$$\lambda = \frac{\Omega_1 R}{V_1} \quad (1.7)$$

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

$$P_{mg} = \frac{1}{2} C_p \left(\frac{\Omega_2 R}{K V_1} \right) \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (1.8)$$

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 (Fig.I.9) [3].

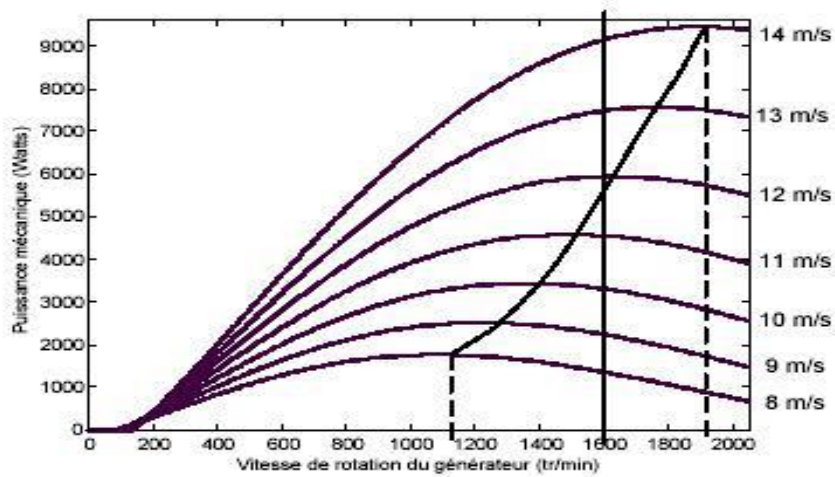


Fig. I. 10: Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donnée.

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 Fig.I.9) 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/mn pour cet exemple, [3] .

I.5. Stratégie de commande de la turbine:

Comme il est illustré sur la figure. II.8, on distingue quatre (04) zones principales de fonctionnement, [6].

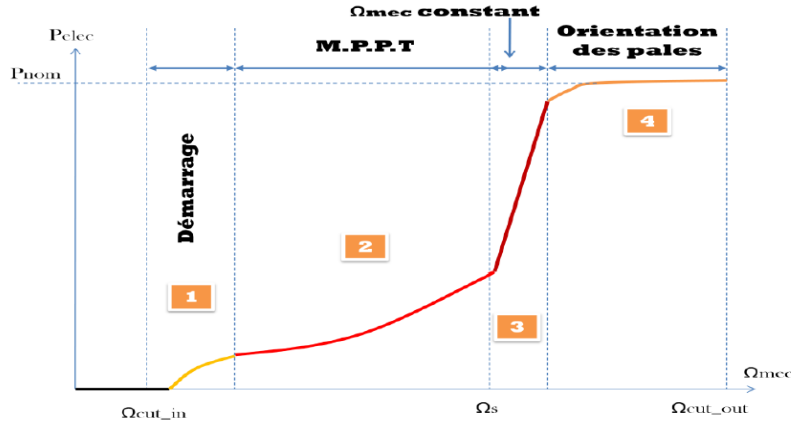


Fig. I. 11: Caractéristique puissance - vitesse d'une éolienne

-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» [6].

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.

I.6. Techniques d'extraction du maximum de la puissance :

I.6.1. Bilan des puissances :

Cette puissance peut être essentiellement maximisée en ajustant le coefficient C_p . Ce coefficient étant dépendant de la vitesse de la génératrice (ou encore du ratio de vitesse λ), l'utilisation d'une éolienne à vitesse variable permet de maximiser cette puissance. Il est donc nécessaire de concevoir des stratégies de commande permettant de maximiser la puissance électrique générée (donc le couple) en ajustant la vitesse de rotation de la turbine à sa valeur de référence quel que soit la vitesse du vent considérée comme grandeur perturbatrice. En régime permanent, la puissance aérodynamique P_{aer} diminuée des pertes (représentées par les frottements visqueux) est convertie directement en puissance électrique, [4]. (Fig I.11)

$$P_{elec} = P_{aer} - P_{pertes} \quad (1.9)$$

La puissance mécanique stockée dans l'inertie totale J et apparaissant sur l'arbre de la génératrice (P_{mec}) est exprimée comme étant le produit entre le couple mécanique (C_{mec}) et la vitesse mécanique (Ω_{mec}).

$$P_m = C_{mec} * \Omega_{mec} \quad (1.10)$$

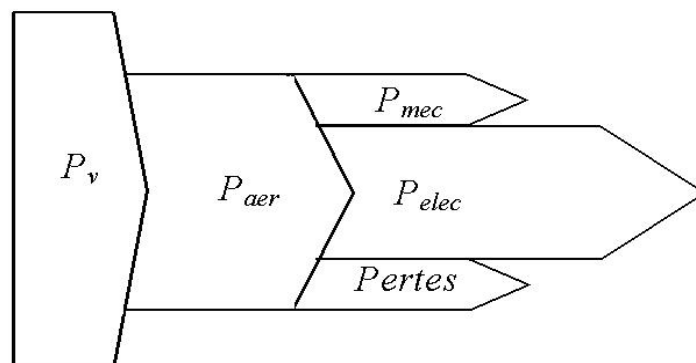


Fig. I. 12: Diagramme de conversion de puissance

Dans cette partie, nous présenterons différentes stratégies pour contrôler le couple électromagnétique (et indirectement la puissance électromagnétique convertie) afin de régler la vitesse mécanique (Fig.I.12) de manière à maximiser la puissance électrique générée. Ce principe est connu sous la terminologie Maximum Power Point Tracking (M.P.P.T.) et correspond à la zone 2 de la caractéristique de fonctionnement de l'éolienne. On distingue deux familles de structures de commande qui sont maintenant expliquées [4]. (Fig.I.12) :

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



Fig. I. 13: Stratégies de commande de la turbine étudiée

I.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une définition de l'énergie éolienne et Principaux composants d'une éolienne et nous avons présenté aussi Les différents types d'éoliennes (axe vertical , axe horizontal) et energie cinétique du vent-conversion en énergie mécanique (loi de Betz , production d'énergie mécanique) et nous avons présenté aussi la stratégie de commande de la turbine et les techniques d'extraction du maximum de la puissance.

Dans le prochain chapitre on complétera l'étude par la Modélisation et la simulation de la turbine éolienne

Chapitre II

Modélisation et simulation de la turbine éolienne

II.1 Introduction

Comme on l'a vu dans le chapitre précédent, pratiquement toutes les éoliennes sont à axe horizontal. Alors, dans ce chapitre, nous nous intéressons uniquement à la modélisation d'une turbine éolienne de ce dernier en tri-pales. Tous les modèles ont été développés en vue d'une exploitation par le logiciel Matlab/Simulink,

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, [6] :

$$v(t) = f(t) \quad (2.1)$$

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

$$v(t) = A + \sum_{n=1}^i (a_n \cdot \sin(b_n \cdot \omega_v \cdot t)) \quad (2.2)$$

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

$$v(t) = 6.5 + 0.02\sin(0.1047t) + 0.2\sin(0.2665t) + 0.1\sin(1.2930t) + 0.02\sin(3.6645t)$$

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 [6]:

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

II.4. Hypothèses 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 Ω_{turbine} qui est relié à un multiplicateur de gain G. Ce multiplicateur entraîne une génératrice électrique (Fig. II.2).

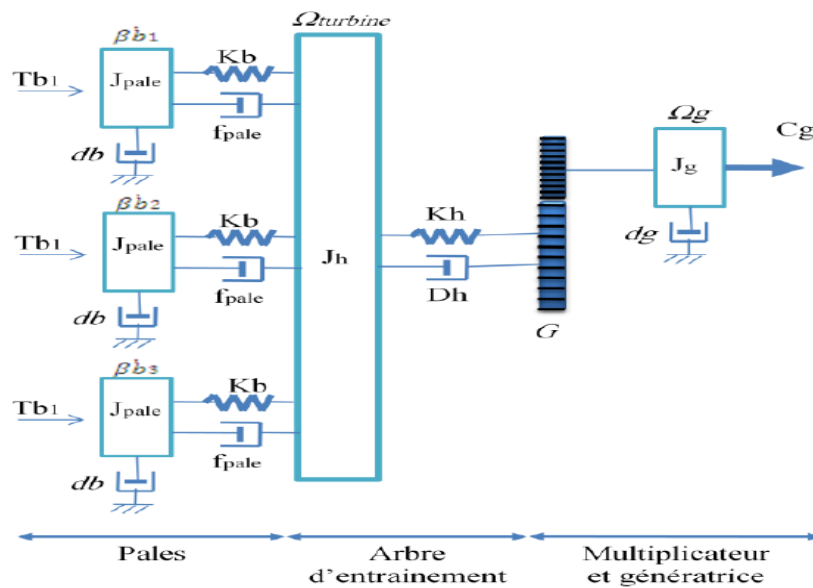


Fig. II. 1: Système mécanique de l'éolienne

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

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

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 β_{b1} , β_{b2} , β_{b3} . Chaque pale reçoit une force T_{b1} , T_{b2} , T_{b3} 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 K_h
- son coefficient de frottement par rapport au multiplicateur D_h

Le rotor de la génératrice possède :

- une inertie J_g
- un coefficient de frottement d_g

Ce rotor transmet un couple entrainant (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 ($T_{b1} = T_{b2} = T_{b3}$) 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 plus la conception aérodynamique des pales, leur coefficient de frottement par rapport à l'air (d_b) est très faible et peut être ignoré. De même, la vitesse de la

turbine étant très faible, les pertes par frottement sont négligeable par rapport aux pertes par frottement du coté de la génératrice.

On obtient alors un modèle mécanique comportant deux masses (Fig. II.2) dont la validité (par rapport au modèle complet) a déjà été vérifiée [4].

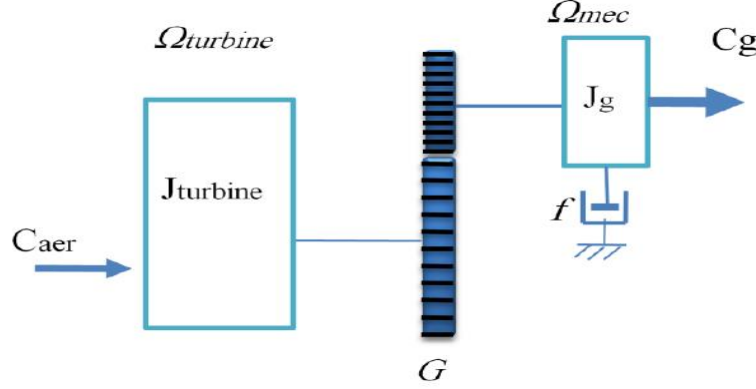


Fig. II. 2 : Modèle mécanique simplifié de la turbine

II.5. 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.1).

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

$$E_v = \frac{1}{2} m v^2 \quad (2.3)$$

On connaît la puissance disponible par dérivation de l'énergie cinétique [6]

$$P_v = \frac{dE}{dt} \quad (2.4)$$

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 :

$$P_v = \frac{d}{dt} \left[\frac{1}{2} \rho V v^2 \right]$$

$$P_v = \frac{d}{dt} \left[\frac{1}{2} \rho (S \cdot x) v^2 \right] = \frac{1}{2} \rho \left(S \cdot \frac{dx}{dt} \right) v^2 \quad (2.5)$$

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

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S v^3 \quad (2.6)$$

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

$$P_{aer} = C_p \cdot P_v = C_p(\beta, \lambda) \cdot \frac{1}{2} \rho S v^3 \quad (2.7)$$

Le coefficient de puissance C_p , représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne (P_{aer}/P_v). Il dépend de la caractéristique de la turbine[6].

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 :

$$\lambda = \frac{R \Omega_{turbine}}{v} \quad (2.8)$$

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

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turbine}} = C_p \frac{1}{2} \rho S v^3 \frac{1}{\Omega_{turbine}} \quad (2.9)$$

* 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

$$C_p(\lambda) = a_0 + \sum_{i=1}^N a_i \lambda_i \quad (2.10)$$

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 [6]:

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

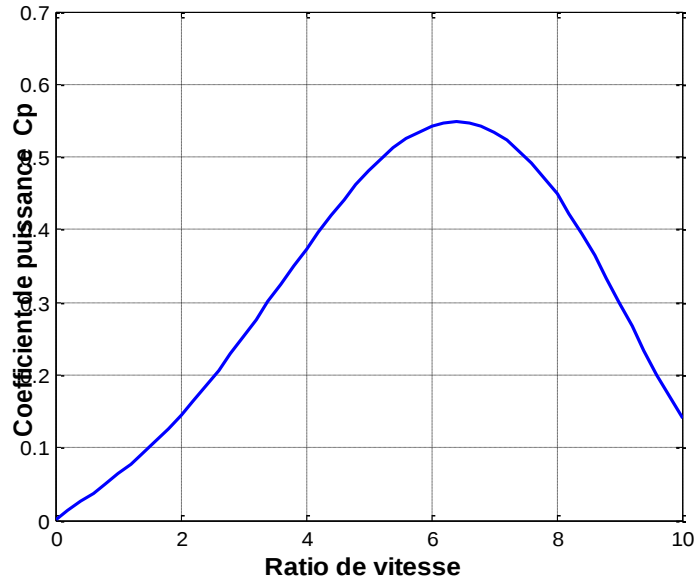


Fig. II.3 : Caractéristique du coefficient de puissance en fonction de la vitesse relative λ

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, [6].

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

II.6. Modèle du multiplicateur :

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice (Fig. II.1). Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes :

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \quad (2.11)$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (2.12)$$

II.7. 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.

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \quad (2.13)$$

Il est à noter que l'inertie du rotor de la génératrice est très faible par rapport à l'inertie de la turbine reportée par cet axe. A titre illustratif, pour une éolienne Vestas de 2MW, une pale a une longueur de 39m et pèse 6.5 tonnes [5]. 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 :

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (2.14)$$

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

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (2.15)$$

Le couple résistant du aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux f :

$$C_{vis} = f \cdot \Omega_{mec} \quad (2.16)$$

II.8. 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 à partir de l'équation dynamique de la turbine on obtient [7] :

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} = 0 = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (2.17)$$

Si on néglige l'effet du couple des frottements visqueux, on obtient, [8] :

$$C_{em} = C_g \quad (2.18)$$

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

$$C_{aer-estimé} = C_p \frac{1}{2} \rho S \frac{1}{\Omega_{turbine_estimée}} v^3_{estimée} \quad (2.19)$$

Avec:

$$v_{estimée} = \frac{\Omega_{turbine_estimée} \cdot R}{\lambda} \quad (2.20)$$

On fixe le ratio de vitesse à la valeur (λ_{cpmax}) qui correspond au maximum du coefficient de puissance (C_{pmax}) 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[6] .

$$C_{em_ref} = \frac{\rho \pi R^5}{2 G^3} \frac{C_p}{\lambda^3 C_{p_max}} \Omega_{mec}^2 \quad (2.21)$$

II.9. 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

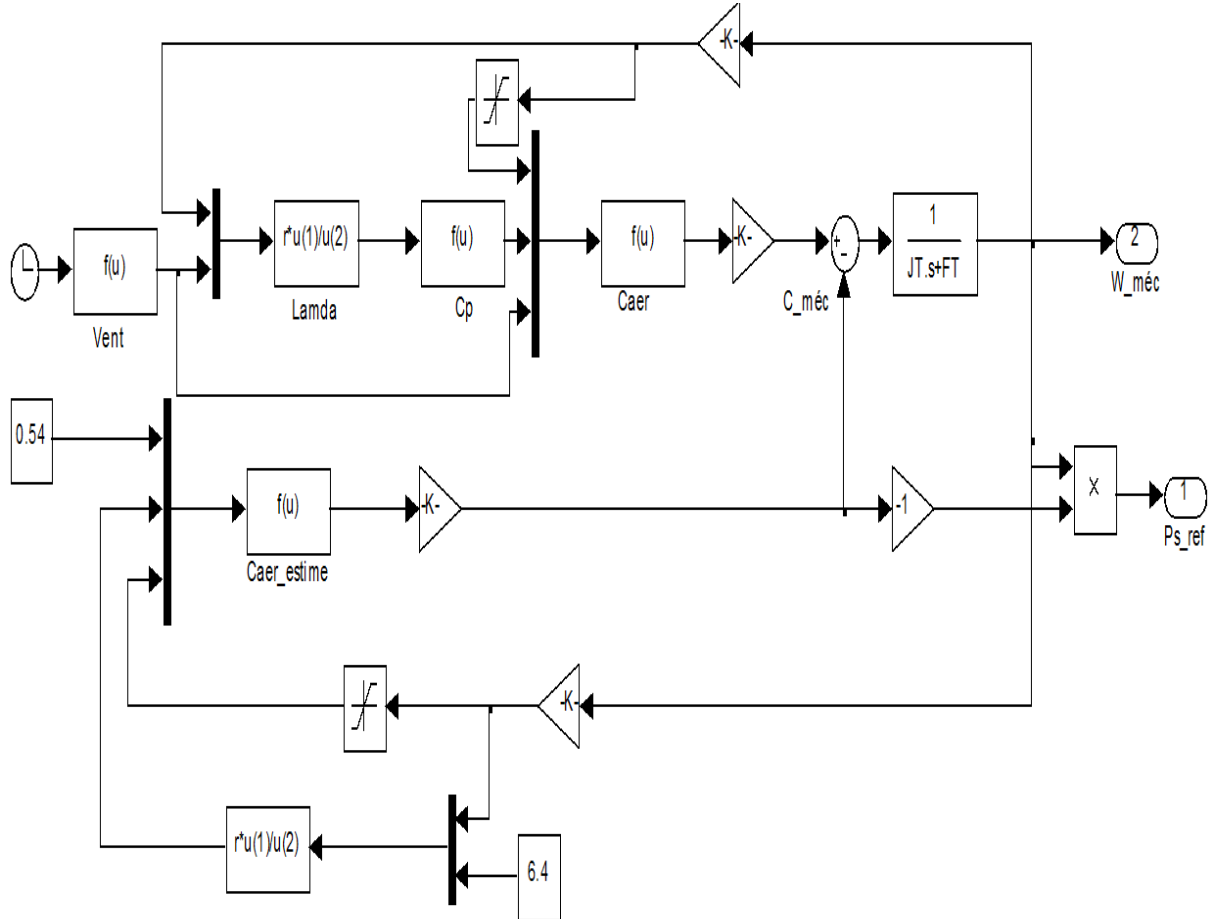


Fig. II. 4: Schéma de simulation de la turbine éolienne

II.10. Résultats obtenus :

Nous présenterons la Simulation du fonctionnement de la partie mécanique de l'éolienne. Les Simulations sont faites dans l'environnement MATLAB/SIMULINK. Ces résultats obtenus basées sur la structure de commande sans asservissement de la vitesse Nous n'allons pas raccorder l'hélice et le multiplicateur à une génératrice mais simplement observer la vitesse, couple et la puissance produite le sortie du multiplicateur en fonction de l'évolution du vent.

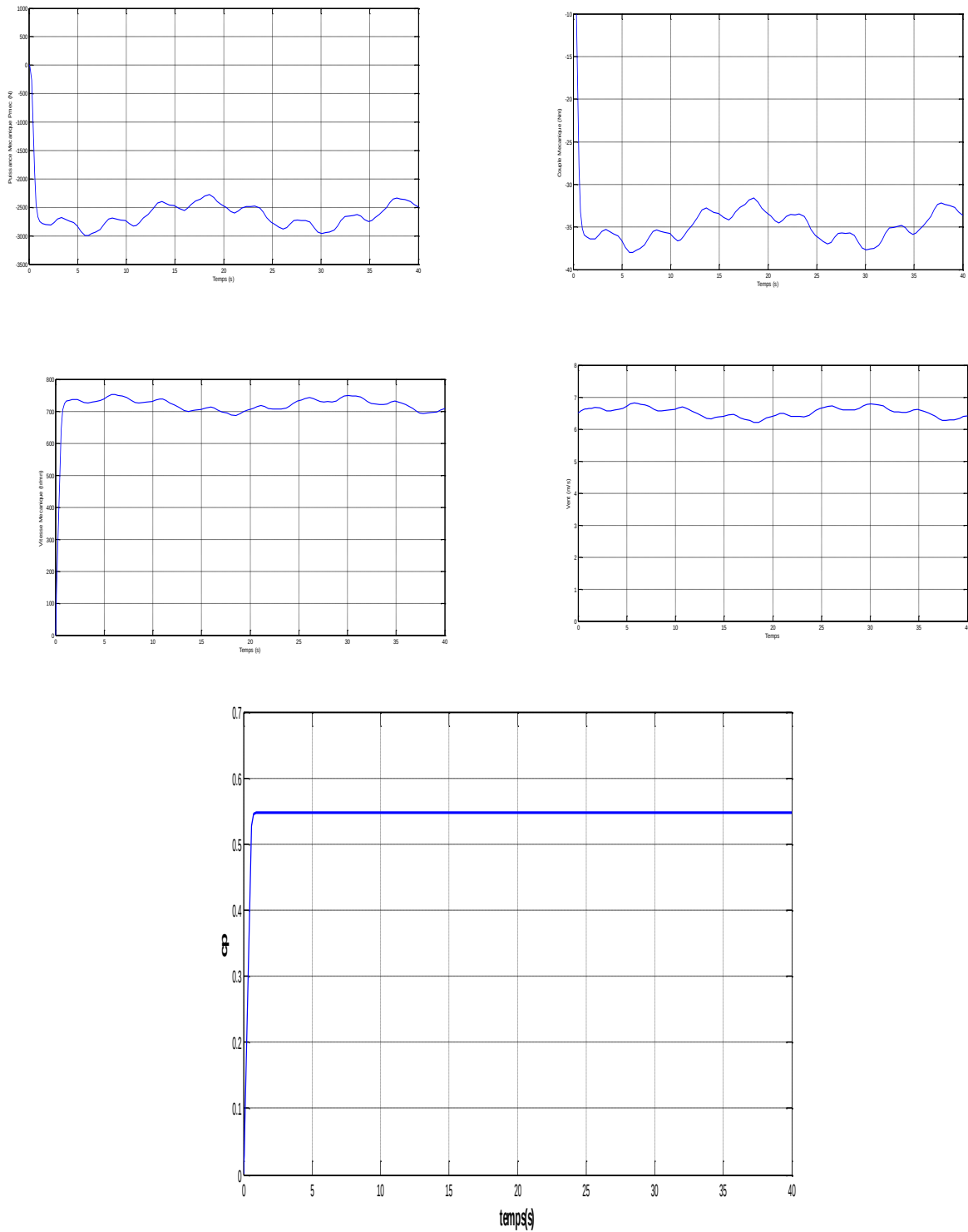


Fig. II. 5 : Courbes caractéristiques de la turbine éolienne, (V_v , W_{mec} , P_{mec} , C_{mec} , C_p)

l'angle de calage β elle est constant tout le long de simulation à la valeur 2° , On remarque que La puissance mécanique $P_{mec-ref}$, il comme étant d'une puissance de référence pour la machine à entrainer, ce dernier elle exige la machine de poursuite à l'aide de la technique qu'on a utilisé.

II.6.CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation du vent et d'une turbine éolienne à axe horizontal avec des hypothèses simplificatrices, aussi nous avons implanté la maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse et on a clôturé ce chapitre par les résultats de simulation et leurs interprétations.

Conclusion Générale

Le but de ce mémoire reste l'exploration des possibilités d'étudier la turbine d'une éolienne. Pour cela on a traité les aspects qui englobent le développement d'un tel système : généralité sur les systèmes éoliens, et en fin, la modélisation de la turbine

Dans le contexte d'énergie éolienne une généralité des systèmes d'énergie éolienne est présentée dans le premier chapitre. La production de l'énergie éolienne est de plus en plus importante et alors de nouvelles constructions apparaissent. Cette évolution dynamique est surtout visible dans le domaine du grand éolien grâce au développement de nouvelles technologies telles que les matériaux de construction, l'électronique de puissance et les techniques de commande. Le pouvoir politique est aussi dans une grande partie motrice de développement durable.

Notre étude nous a permis de réaliser une modélisation d'une turbine. Cette modélisation se démarque principalement par l'approche différente qui a été faite à la partie mécanique qui fait appel aux calculs aérodynamiques pour déterminer les relations liant la vitesse du vent, le couple et la vitesse de l'hélice.

Le premier chapitre nous a permis de dresser un panel des solutions électrotechniques possibles pour la production d'énergie électrique grâce à des turbines éoliennes. Après un rappel de notions fondamentales nécessaires à la compréhension du système de conversion de l'énergie éolienne.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des performances obtenues de la turbine, puissance mécanique, couple mécanique, coefficient de puissance et vitesse mécanique en fonction de la vitesse du vent.

Travaux Cités

- [1] SAKI ALI . BELAIDI MOURAD "Etude d'un Générateur Asynchrone dans La Production d'Energie Electrique par Eolienne", Mémoire de fin d'étude, Ecole Nationale Polytechnique, EL-HARRACH, ALGER, juin 2006

- [2] MOUSSA SIDDO ABDOLAZIZ, "Etude du Générateur Asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne", mémoire de fin d'étude, Ecole Nationale Polytechnique, El-Harrach, Algérie, 2007.

- [3] FREDERIC POITIERS "étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne -Machine asynchrone à cage autonome-Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau" Thèse de Doctorat.. Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes . 19 décembre 2003.

- [4] SALMA EL AIMANI "modélisation de différentes technologies d'éoliennes integrees dans un reseau de moyenne tension" Thèse de Doctorat préparée dans le laboratoire L2EP de l'Ecole Centrale de Lille sous la direction du Professeur Benoît Robyns 2005.

- [5] NAOUEL HAMDI " Modélisation et commande des génératrices éoliennes". Thèse de magister L'Université de Constantine, 2008.

- [6] CHERIFE HAKIMA, SLIMANI KARIMEN, LAICHE SARA"(Modélisation d'une Centrale Éolienne" mémoire de fin d'étude CENTRE UNIVERSITAIRE D'EL OUED Juin 2010.

- [7] BOUHEDDA ALI "(contribution à l'étude de systèmes de commande d'une eolienne" Thèse de magister Université mouloud mammeri tizi-ouzou"(07/07/2011)

- [8] LAMRI LOUZE "(Production décentralisée de l'énergie électrique : Modélisation et contrôle d'une génératrice asynchrone auto excitée" Thèse de magister UNIVERSITE MENTOURI-CONSTANTINE, 2010

Annexe Les valeurs nominales de la turbine

- 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 : $\rho = 1.225\text{ kg.m}^{-3}$
- Moment d'inertie de la turbine $J_{\text{turbine}} = 0.2\text{ kg.m}^2$.
- Coefficient de frottement visqueux : $f = 0.001\text{ N.m.s/rd}$.