

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE POLYTECHNIQUE



Département de Génie Électrique  
Laboratoire de Commande des Processus

MÉMOIRE

présenté pour obtenir le diplôme de

MAGISTER EN AUTOMATIQUE

Option : Automatique des Systèmes Industriels

Thème

---

## Conception, modélisation et commande d'une éolienne à axe vertical

---

Préparé par **Nadjet ZIOUI**

Dirigé par **M. Omar STIHI**

Présenté devant le jury

F. BOUDJEMA	Professeur à l'ENSP	Président
M. HADDADI	Professeur à l'ENSP	Examineur
H. CHEKIREB	Maître de conférences à l'ENSP	Examineur
R. ILLOUL	Chargé de cours à l'ENSP	Examineur
O. STIHI	Chargé de cours à l'ENSP	Rapporteur

Année Universitaire 2007 / 2008

ENP Rue des frères OUDDAK Hassen Badi BP 182, 16200 - EL - Harrach - Alger



---

# DEDICACES

---

*Je dédie ce travail à toute personne qui m'aime vraiment.*

---

# REMERCIEMENTS

---

*Je tiens, avant tout, à remercier les membres du jury d'avoir bien voulu accepter d'examiner et d'évaluer ce travail.*

*Mes vifs remerciements s'adressent à mon promoteur Monsieur STIHL, pour m'avoir orientée, conseillée et dirigée durant ce travail.*

*Je tiens également à remercier Messieurs BENBRAIKA, BENNOUR, HADDADI, ZEHANA et SMAILI pour leur aide.*

*Je n'oublierai de remercier le personnel de prêt de la Bibliothèque Centrale de l'Ecole Nationale Polytechnique pour le travail formidable qu'ils font.*

*Je remercie, enfin, toute personne ayant contribué de près ou de loin à la concrétisation de ce travail.*

---

## ملخص

---

إن الهدف من هذا العمل هو تصميم مولد هوائي ذو محور عمودي، و تحديد أمثله الرياضية بهدف التحكم فيه.

ينقسم العمل إلى ثلاثة أجزاء رئيسية. نتعرض في أولها إلى وصف تاريخي موجز و آخر ما توصل إليه في ميدان تصميم المولدات الهوائية.

في الجزء الثاني، نقدم تصميم الجهاز و نقوم بتجزئته إلى عدة أجزاء لغرض تمثيلها رياضياً. و نقوم باستعمال الأمثلة الرياضية المتحصل عليها من أجل تحديد قوانين التحكم في المولد الهوائي و محاكاة اشتغاله. لننتهي بتحليل النتائج المحصل عليها.

**الكلمات الأساسية:** تصميم، مولد هوائي، محور عمودي، تمثيل، محاكاة، تحكم.

---

## Résumé

---

Le but principal de ce travail est la conception d'une éolienne à axe vertical et la détermination de ses différents modèles mathématiques afin de la commander.

Le travail se divise en trois parties principales. Nous présentons en premier lieu un bref historique, et l'état de l'art de la conception des éoliennes. Dans une deuxième partie, nous présentons la conception et la modélisation du système. Nous subdivisons le système global en plusieurs parties élémentaires dont nous déterminons les modèles mathématiques. Ces modèles sont utilisés dans la troisième partie pour la synthèse des lois de commande, et la simulation du fonctionnement du système. Nous terminons, enfin, par une analyse des résultats obtenus.

**Mots clés :** Conception, éolienne, axe vertical, modélisation, simulation, commande.

---

# Abstract

---

The aim of this work is the design of a vertical axis wind turbine and the determination of its mathematical models in order to control it.

The work is divided into three principal parts. We, first, expose a brief historic, and the state of art of the wind turbines' design. In the second part, we present the design and the modelling of the system. We subdivide the total system into several elementary parts and we determine their mathematical models. These models are used in the third part for the synthesis of the control laws, and the simulation of the system's function. Finally, we analyse the obtained results.

**Key words:** Design, wind turbine, vertical axis, modelling, simulation, control.

---

# TABLE DES MATIERES

---

<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>1</b>
<b>PARTIE I      Motivations et état de l'art .....</b>	<b>3</b>
<b>I.1.    Un peu d'historique .....</b>	<b>4</b>
<b>I.2.    Sur les éoliennes .....</b>	<b>6</b>
I.2.1. Sur les topologies des éoliennes .....	6
I.2.2. Sur les génératrices utilisées .....	9
I.2.3. Sur les convertisseurs d'électronique de puissance utilisés .....	13
<b>I.3.    Motivations .....</b>	<b>14</b>
<b>I.4.    Sur l'actualité des éoliennes .....</b>	<b>17</b>
<b>PARTIE II      Conception et modélisation .....</b>	<b>21</b>
<b>II.1.    Description générale du système étudié ....</b>	<b>22</b>
<b>II.2.    Etude et conception des différentes parties             du système .....</b>	<b>24</b>
II.2.1. Les composantes physiques du système global .....	24
II.2.2. Le pourquoi des choix adoptés .....	27
<b>II.3.    Modélisation .....</b>	<b>28</b>

II.3.1. Modèle du système aérodynamique	28
II.3.2. Modèle du système de couplage mécanique .....	30
II.3.3. Modèle de la génératrice et de son système de pilotage .....	32
II.3.4. Les actionneurs .....	38
II.3.5. Validation du modèle .....	39
<b>II.4. Réalisation d'un prototype .....</b>	<b>41</b>
 <b>PARTIE III Simulations, commande et résultats .....</b>	<b>45</b>
<b>III.1. Objectifs de commande .....</b>	<b>46</b>
<b>III.2. Génération des entrées .....</b>	<b>47</b>
<b>III.3. Méthodes de commande utilisées .....</b>	<b>48</b>
III.3.1. Commande dans la zone2 .....	49
III.3.2. Commande dans la zone3 .....	51
<b>III.4. Simulations et analyse des résultats .....</b>	<b>53</b>
 <b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>65</b>
 <b>ANNEXES .....</b>	<b>67</b>
Annexe 1. Théorie de Betz .....	68
Annexe 2. Conception du système aérodynamique .....	69
Annexe 3. Méthodologie du « Backsteeping »	71
Annexe 4. Transformation de Park .....	73
Annexe 5. Détermination du flux de l'aimant permanent de la Machine Synchrone à Aimant Permanent .....	75
 <b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>76</b>

---

# LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

---

## FIGURES

### PARTIE I.

<b>Fig. I.1</b> <i>Quelques exemples d'éoliennes</i> .....	6
<b>Fig. I.2.</b> <i>Les configurations les plus utilisées actuellement pour les aéro-générateurs</i> .....	8
<b>Fig. I.3.</b> <i>Structure du convertisseur back to back</i> .....	14
<b>Fig. I.4.</b> <i>Carte des vents en Algérie selon le Ministère des Energies et des Mines</i> .....	16
<b>Fig. I.5.</b> <i>Kite Wind Generator</i> .....	18
<b>Fig. I.6.</b> <i>M. A. R. S.</i> .....	19
<b>Fig. I.7.</b> <i>Hovering Wing Turbine</i> .....	20

### PARTIE II.

<b>Fig. II.1.</b> <i>Schéma descriptif de l'éolienne sujet de notre étude</i> .....	23
<b>Fig. II.2</b> <i>Principe de la tuyère à profil variable</i> <i>Fig. II.2.a. Cas où le rapport des surfaces peut être inférieur à 1</i> <i>Fig. II.2.b. Cas où le rapport entre les surfaces est supérieur ou égal à 1</i> <i>Fig. II.2.c. Vue d'en haut de la tuyère</i> .....	24
<b>Fig. II.3.</b> <i>Rotor de Savonius avec ses dimensions</i> .....	25
<b>Fig. II.4.</b> <i>Schéma en bloc de tous les sous-systèmes de notre éolienne</i> .....	28
<b>Fig. II.5.</b> <i>Schéma en bloc du sous système « Rotor de Savonius »</i> .....	29
<b>Fig. II.6.</b> <i>Variations du coefficient de puissance en fonction de la vitesse</i>	

spécifique .....	30
<b>Fig. II.7.</b> <i>Approximation du système mécanique par deux masses reliées par un arbre .....</i>	31
<b>Fig. II.8.</b> <i>Schéma en bloc de l'arbre et de la boîte à vitesse .....</i>	31
<b>Fig. II.9.</b> <i>Schéma en bloc de la génératrice et de l'onduleur .....</i>	32
<b>Fig. II.10.</b> <i>Schéma d'Ischenberg équivalent à une machine à pôles lisses en fonctionnement linéaire .....</i>	33
<b>Fig. II.11.</b> <i>Diagramme vectoriel indiquant les différentes grandeurs physiques du schéma d'Ischenberg .....</i>	33
<b>Fig. II.12.</b> <i>Définition des courants et tensions du bus continu .....</i>	36
<b>Fig. II.13.</b> <i>Schéma simplifié pour modéliser l'étage redresseur .....</i>	36
<b>Fig. II.14.</b> <i>Écoulement uniforme d'un fluide parfait incompressible à travers un canal à section variable .....</i>	38
<b>Fig. II.15.</b> <i>Structure du banc d'essai en boucle ouverte .....</i>	40
<b>Fig. II.16.</b> <i>Rotor du prototype .....</i>	41
<b>Fig. II.17.</b> <i>Équilibrage du rotor.....</i>	42
<b>Fig. II.18.</b> <i>Les roulements à billes montés sur les plaques rectangulaires .....</i>	42
<b>Fig. II.19.</b> <i>Réalisation de la tuyère .....</i>	43

## PARTIE III.

<b>Fig. III.1.</b> <i>Schéma de base pour la régulation de la vitesse angulaire dans la zone2 .....</i>	51
<b>Fig. III.2.</b> <i>Schéma de base pour la régulation de la vitesse angulaire dans la zone3 .....</i>	53
<b>Fig. III.3.</b> <i>Schéma de principe de la commande de notre éolienne .....</i>	53
<b>Fig. III.4.</b> <i>Vitesses de vent qui attaquent le système global, lors du fonctionnement dans la zone2 .....</i>	54
<b>Fig. III.5.</b> <i>Courbe de puissance optimale fonction de la vitesse de vent .....</i>	55
<b>Fig. III.6.</b> <i>Stratégie de commande pour notre éolienne .....</i>	55
<b>Fig. III.7.</b> <i>Couples électromagnétiques mesuré et de référence, lors d'un fonctionnement dans la zone2 .....</i>	56

<b>Fig. III.8.</b> <i>Vitesses angulaires mesurée et de référence, lors d'un fonctionnement dans la zone2</i> .....	57
<b>Fig. III.9.</b> <i>Evolution du coefficient de puissance, lors d'un fonctionnement dans la zone2</i> .....	57
<b>Fig. III.10.</b> <i>Composante id du courant de ligne, lors d'un fonctionnement dans la zone2</i> .....	58
<b>Fig. III.11.</b> <i>Composante iq du courant de ligne, lors d'un fonctionnement dans la zone2</i> .....	58
<b>Fig. III.12.</b> <i>Vitesses de vent qui attaquent système global, lors du fonctionnement dans la zone3</i> .....	59
<b>Fig. III.13.</b> <i>Vitesses angulaires mesurée et de référence, lors d'un fonctionnement dans la zone3</i> .....	60
<b>Fig. III.14.</b> <i>Couple électromagnétique mesuré et de référence, lors d'un fonctionnement dans la zone3</i> .....	60
<b>Fig. III.15.</b> <i>Evolution du coefficient de puissance, lors d'un fonctionnement dans la zone3</i> .....	61
<b>Fig. III.16.</b> <i>Commande de rapport de surfaces, lors d'un fonctionnement dans la zone3</i> .....	61
<b>Fig. III.17.</b> <i>Composante id du courant de ligne, lors d'un fonctionnement dans la zone3</i> .....	62
<b>Fig. III.18.</b> <i>Composante iq du courant de ligne, lors d'un fonctionnement dans la zone3</i> .....	62

# TABLEAUX

## PARTIE I.

<b>Tab. I.1.</b> <i>Les avantages et inconvénients des types de génératrices les plus utilisées dans la génération de l'énergie éolienne</i> .....	12
--	----

---

# NOTATIONS

---

## PARTIE I

$f_c$	Fréquence de travail pour un transistor IGBT (Hz)
$I_{\max}$	Courant maximum traversant un transistor IGBT (A)
$V_{\max}$	Tension maximale aux bornes d'un transistor IGBT (V)

## PARTIE II

$A_e$	Section à l'entrée de la tuyère ( $m^2$ )
$A_s$	Section à la sortie de la tuyère ( $m^2$ )
$A_{wr}$	La surface balayée par le rotor de la turbine ( $m^2$ )
$B_m \omega$	Approximation linéaire des forces de frottement au niveau de la génératrice
$C$	La capacité du bus continu (F)
$C_p$	Coefficient de puissance
$d$	Diamètre du fût ( $m$ )
$D$	Diamètre du rotor ( $m$ )
$d_a, d_b$ et $d_c$	Rapports cycliques (durées de fermeture par rapport à la période de commutation).
$e$	Distance d'inter calage entre deux demi fûts ( $m$ )
$\underline{E} = (e_a \ e_b \ e_c)^T$	Vecteur des f.e.m induites dans la génératrice (V)
$f$	La fréquence du réseau électrique (Hz)
$H$	Hauteur du fût et du rotor ( $m$ )

$\underline{I} = (i_a \ i_b \ i_c)^T$	Vecteur des courants statoriques (A)
$i_{ca}$	Courant traversant le bus continu (A)
$i_d, i_q$	Les courants statoriques dans la base $d-q$ (A)
$i_{dc}$	Courant en provenance du redresseur (A)
$i_l$	Courant allant vers l'onduleur (A)
$\underline{I}_r = (i_{ar} \ i_{br} \ i_{cr})^T$	Courant allant vers le côté réseau électrique (A)
$J$	La constante d'inertie totale du système mécanique
$J_G$	La constante d'inertie du rotor de la génératrice
$J_{wr}$	La constante d'inertie du rotor de la turbine
$k$	Le rapport de multiplication de la vitesse de rotation
$L$	L'inductance statorique (H)
$L_{sd}, L_{sq}$	L'inductance du stator dans le repère $d-q$ (H)
$p$	Le nombre de paires de pôles de la machine, on le prend égal à 1
$P_{\max}$	La puissance maximale extraite (watts)
$P_{wt}$	La puissance mécanique totale extraite du vent (watts)
$R$	Le rayon de la turbine (m)
$R_s$	La résistance statorique ( $\Omega$ )
$S_a, S_b$ et $S_c$	Les positions des switches : 1 pour la position fermée, 0 pour la position ouverte.
$U_a$	La tension alternative à la sortie du convertisseur back to back (V)
$U_{ag}$	La tension alternative triphasée à la sortie de la génératrice (V)
$u_{dc}$	La tension du bus continu (V)
$V = (v_a \ v_b \ v_c)^T$	La tension aux bornes de la génératrice (V)
$v_d, v_q$	Les tensions statoriques dans la base $d-q$ (V)
$V_w$	La vitesse du vent (m/sec)
$w$	Rapport des sections d'entrée et de sortie de la tuyère
$\varphi$	Le déphasage angulaire entre f.e.m et courant (rad)
$\lambda$	La vitesse spécifique
$\theta_m$	La position angulaire du rotor de la génératrice (rad)

$\rho$	La densité de l'air ( $Kg/m^3$ )
$\tau_{el}$	Le couple électromagnétique ( $N.m$ )
$\tau_{wr}$	Le couple mécanique ( $N.m$ )
$\omega = p \frac{d\theta_m}{dt}$	La vitesse angulaire du rotor de la génératrice ( $rad/sec$ )
$\omega_{wr}$	La vitesse angulaire du rotor de la turbine ( $rad/sec$ )
$\Psi_m$	Le flux de l'aimant permanent. La méthode pour sa détermination est Donnée ( <i>Weber</i> )
$\Psi_{md}$	Le flux de l'aimant permanent exprimé dans la base $d-q$ ( <i>Weber</i> )

### PARTIE III

$e_1, e_2$ et $e_3$	Erreurs de poursuite
$i_{nom}$	Courant nominal
$K_1, K_2, K_3, K'_1, K'_2$ et $K'_3$	Constantes négatives pour ajuster les dynamiques désirées
$(u_1 \ u_2)^T$	Vecteur de commande
$V_1, V_2$ et $V_3$	Fonctions candidates de Liapunov
$V_{wa}$	La valeur moyenne de la vitesse du vent ( $m/sec$ )
$V_{wg}(t)$	La composante rafale de la vitesse du vent ( $m/sec$ )
$V_{wr}(t)$	La composante rampe de la vitesse du vent ( $m/sec$ )
$V_{wt}(t)$	La composante perturbation de la vitesse du vent ( $m/sec$ )
$w_{max}$	Rapport de surfaces maximal
$(x_1 \ x_2 \ x_3)^T$	Vecteur d'état
$\tau_{NOM}$	Couple électromagnétique nominal
$\omega_{MAX}$	Vitesse angulaire maximale



---

# INTRODUCTION GENERALE

---

Le but principal de ce travail est de concevoir une éolienne à axe vertical, en étudier les différentes composantes, puis établir les modèles mathématiques dans le but de commander le système global.

Notre travail comporte trois parties principales:

Une première partie où l'on évoquera un bref historique de l'évolution des éoliennes. On explicitera les motivations qui nous ont poussés à opter pour un tel thème et un tel sujet. On verra, également les tendances actuelles et les solutions les plus utilisées de nos jours en matière de génératrices et de l'électronique de puissance utilisées. Cette partie nous permettra de situer notre travail, et nous éclairera sur les différents choix que nous adopterons lors de la conception de notre système.

La deuxième partie traitera de la modélisation. Il s'agira, d'abord, de définir les différentes parties de l'éolienne, de fixer un choix de conception pour chaque sous-système, en le justifiant, puis développer les différents modèles mathématiques régissant le fonctionnement de chaque sous-système. Après validation de ces modèles, ceux-ci seront utilisés pour synthétiser les lois de commande, dans la troisième partie.

Dans cette dernière partie, on exposera nos objectifs de commande, et on établira les différents régimes de fonctionnement de l'éolienne, tout en précisant, et en développant une commande relative à chaque régime de fonctionnement.

Ces commandes seront, par la suite simulées, et les résultats seront analysés.

---

# PARTIE I

---

## Motivations et état de l'art

<b>Introduction</b> .....	<b>4</b>
<b>I.1. Un peu d'historique</b> .....	<b>4</b>
<b>I.2. Sur les éoliennes</b> .....	<b>6</b>
I.2.1. Sur les topologies des éoliennes .....	6
I.2.2. Sur les génératrices utilisées .....	9
I.2.3. Sur les convertisseurs d'électronique de puissance utilisés .....	13
<b>I.3. Motivations</b> .....	<b>14</b>
<b>I.4. Sur l'actualité des éoliennes</b> .....	<b>17</b>
<b>Conclusion</b> .....	<b>20</b>

## Introduction

Dans cette partie, nous allons voir l'historique des éoliennes, ainsi que leurs évolutions. Nous aborderons les aspects techniques et les différentes solutions adoptées au jour d'aujourd'hui, en matière de l'électronique de puissance, ainsi que des génératrices utilisées dans le domaine éolien. Comme nous évoquerons quelques dernières nouveautés dans la matière.

Nous exposerons également les motivations qui nous ont poussés à opter pour ce sujet de mémoire.

### I.1. Un peu d'historique [1], [20], [35]

L'énergie éolienne est l'énergie cinétique du vent transformée en énergie mécanique (moulin à vent) ou électrique à l'aide d'un aérogénérateur (éolienne). C'est une énergie renouvelable qui tire son nom d'Éole, Dieu du vent dans la Grèce antique. [35]

La conquête de l'énergie éolienne ne date pas d'hier. L'histoire nous apprend que les moulins à vent existaient déjà dès la plus haute antiquité, en Perse, en Irak, en Egypte et en Chine. Hammourabi, roi de Babylone, avait conçu, paraît-il, dix-sept siècles avant Jésus-Christ, le projet d'irriguer la riche plaine de Mésopotamie à l'aide de l'énergie éolienne. Les moulins utilisés à l'époque dans cette région étaient vraisemblablement à axes verticaux et sans doute analogues à ceux dont les ruines subsistent sur le plateau iranien.

Trois siècles avant Jésus-Christ, l'égyptien Héro d'Alexandrie représente dans une étude consacrée à la pneumatique, un moulin à axe horizontal à quatre pales qui alimente en air comprimé un orgue. Faut-il en déduire que ceux-ci étaient très répandus en Egypte ? Il est difficile de le dire. On peut toutefois affirmer, sans crainte d'être démenti, que la partie orientale du bassin méditerranéen constitue avec la Chine, où seules les machines à axe vertical étaient connues, le berceau des aéromoteurs.

C'est seulement au moyen Age que les moulins à vent font leur apparition en Italie, en France puis en Espagne et au Portugal. On les rencontre un peu plus tard, en Grande-Bretagne, en Hollande et en Allemagne. Certains auteurs suggèrent que leur introduction en Europe est due aux Croisés revenus du Moyen-Orient. Ce n'est pas impossible. Les machines employées ici, de type à axe horizontal, comportent quatre ailes placées en croix. Elles servent principalement à moudre du grain et surtout du blé. La Hollande les utilise, à partir de 1350, pour l'assèchement des polders. Elles sont accouplées alors à des roues à godets ou à des vis d'Archimède qui peuvent élever l'eau jusqu'à cinq mètres. On les emploie également pour

extraire de l'huile des noix et des graines, pour scier du bois, pour transformer les vieux chiffons en papier, pour la préparation des poudres en couleur entrant dans la composition des teintures et pour la fabrication du tabac à priser qui remplaçait la cigarette autrefois.

L'éolienne lente de type multi pale n'apparaît que bien plus tard, au dix-neuvième siècle. On trouve cependant dans l'ouvrage « Schaulplatz der Wasser Kunst » (Revue des arts hydrauliques) de Leupold Jacob imprimé à Leipzig, en 1724, le projet d'une éolienne à huit pales, autorégulatrice qui entraîne par l'intermédiaire d'un vilebrequin une pompe à piston. Les pales pivotent autour d'un axe de rotation propre et s'effacent par vent très fort. Malgré cela, la construction de l'éolienne multi pale ne se développe pas sur le vieux continent mais en Amérique où elle apparaît à partir de 1870. Elle conquiert tout le pays et revient en Europe, pays de sa conception, en 1876, où elle s'implante alors, sous le nom de moulin américain.

A l'aube du vingtième siècle, les premières éoliennes rapides entraînant des générateurs électriques font leur apparition en France puis se répandent dans le monde. Leur invention est l'œuvre de l'Académicien français Darrieus. [1]

Ce n'est qu'à la fin du XIXème siècle, lorsque l'électricité pris son essor, que l'aérogénérateur électrique fit ses premiers pas. Au Danemark, Poul La Cour fut, sans doute, le pionnier, il a associé une turbine éolienne à une dynamo en 1891. En France, contrairement à ce que la situation actuelle pourrait laisser penser, les recherches allèrent bon train dans les années 1920 (éolienne bipale de 20 m de diamètre, compagnie CEM) puis dans les années 1950-60 (tripale de 30 m et génératrice synchrone de 800 kW à Nogent le Roi, bipale de 35 m et génératrice asynchrone de 1 MW à Saint Rémy des Landes). En 1941, une éolienne bipale de 1250 kW (machine synchrone) était expérimentée aux USA dans le Vermont. En 1978, les Danois, aujourd'hui leaders dans le domaine, réalisèrent une machine tripale de 54 m pour une puissance de 2 MW. Les nombreuses réalisations expérimentales (notamment en Californie) et leurs avatars permirent de perfectionner les turbines, les systèmes de freinage d'urgence, les pylônes et les divers dispositifs de contrôles et d'obtenir des aérogénérateurs viables et compétitifs à la fin du XXème siècle.

C'est principalement la crise pétrolière de 1974 qui relança les études et les expériences, cette fois à plus grande échelle : l'expérience californienne a été la première à grande échelle (le « Wind-rush ») au début des années 80, notamment avec des turbines de moyenne puissance (55 kW) et grâce à une incitation fiscale très volontariste. On passa ainsi de 144 machines (pour un total de 7MW) en 1981, à 4687 machines (386 MW) en 1985. Mais c'est vers la fin des années 1980 que le marché des systèmes raccordés au réseau électrique a réellement décollé en Europe, dans le reste des USA et également en Asie et en Afrique du

Nord. En Europe, les leaders furent les Danois, principalement à cause de leurs faibles ressources énergétiques classiques, aujourd'hui, ils conservent une très large avance au niveau mondial (plus de la moitié des systèmes éoliens vendus). [20]

## I.2. Sur les éoliennes [1], [4]

De façon générale et selon la direction de l'axe des éoliennes, ces dernières se répartissent en deux catégories principales (Fig.I.1)

- Eoliennes à axe horizontal
- Eoliennes à axe vertical

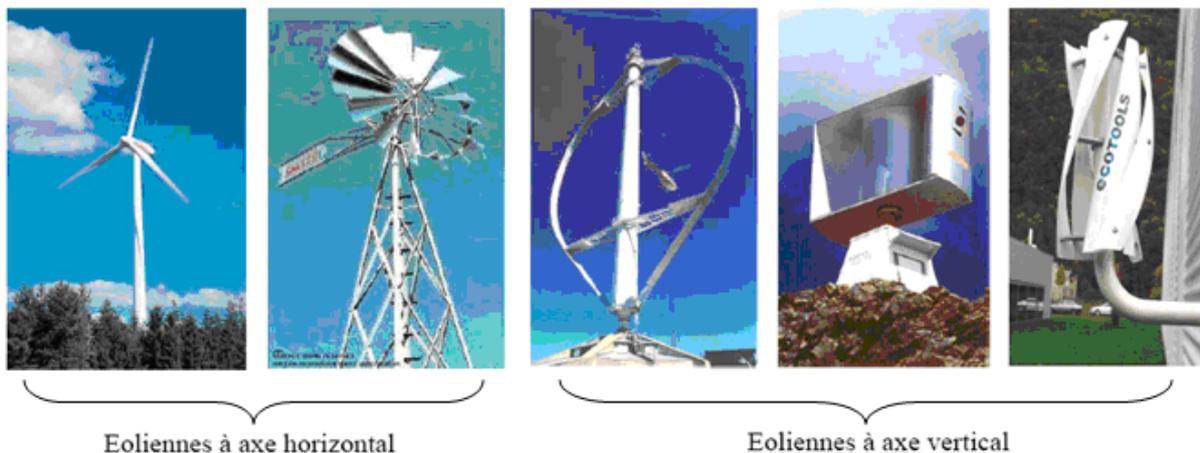
Dans la première catégorie, on distingue : les moulins à vent classiques, les éoliennes lentes et les éoliennes rapides. Plusieurs études ont été développées pour ce type d'éoliennes, et de nombreux dispositifs de régulation ont été élaborés.

Pour les éoliennes à axe vertical, on trouve plusieurs modèles : les machines à traînée différentielle, celles à écran, celles à clapets battants, celles à pales tournantes et celles à variation cyclique, à aubes fixes et à aubes mobiles.

Les solutions technologiques dans le domaine éolien sont de plus en plus innovatrices. Nous présentons dans cette partie ce qui se fait d'actualité dans le domaine, et nous mettrons en évidence les configurations les plus utilisées de nos jours, ainsi que les tendances actuelles en matière de génératrices et dispositifs de l'électronique de puissance adoptés.

### I.2.1. Sur les topologies des éoliennes [4], [40]

Selon la puissance générée, on peut trouver trois sortes d'éoliennes : celles générant une puissance entre 100Watts et 36Kw, il s'agit des petites éolienne domestique. Avec une



**Fig. I.1** Quelques exemples d'éoliennes

puissance générée entre 36KW et 250KW, l'éolienne est considérée comme étant de moyenne puissance, valeurs au delà desquelles on parle d'éoliennes à grande puissance.

Du point de vue vitesse de rotation, on classifie les éoliennes en deux catégories : à vitesse fixe et à vitesse variable.

La première configuration, à savoir celle fonctionnant à vitesse fixe était la première à avoir été adoptée, dans les années 90. Les caractéristiques des aérogénérateurs à vitesse fixe sont :

- Utilisation de machines à induction (à cage d'écureuil par exemple)
- Connexion directe avec le réseau électrique
- Présence d'un soft starter
- Compensation de la puissance réactive avec des condensateurs

Ces aérogénérateurs sont conçus pour un fonctionnement à une vitesse de rotation donnée.

Les avantages de ce type de fonctionnement sont la simplicité du système électrique correspondant, sa robustesse grâce à l'évitement des fréquences de résonance et sa fiabilité prouvée, sans oublier le coût de réalisation assez faible.

Ses inconvénients sont la consommation en énergie réactive non contrôlée, les vibrations mécaniques et le control limité de la qualité de puissance. Du fait du fonctionnement à vitesse fixe, les fluctuations dues aux variations de vitesse de vent sont directement transmises à travers le couple mécanique vers la puissance électrique au réseau, ce qui conduit à des pertes en ligne considérables.

Quant aux éoliennes fonctionnant à vitesse variable, et depuis ces quelques dernières années, elles sont devenues le type prédominant parmi les installations éoliennes actuelles.

Les éoliennes à vitesse variable sont conçues de sorte à extraire un maximum de puissance dans une large gamme de vitesses de vent. Grâce au caractère variable de la vitesse, on peut de façon continue extraire un maximum de puissance, tout en compensant les fluctuations de couple mécanique, en gardant ce dernier relativement constant.

La configuration des éoliennes à vitesse variable est typiquement caractérisée par

- Une génératrice synchrone ou à induction
- Un bloc de conversion de puissance afin de relier la génératrice au réseau électrique, et de commander la vitesse de la génératrice de sorte à absorber les fluctuations du couple.

Les avantages des éoliennes à vitesse variable sont donc un accroissement de l'énergie captée et donc un rendement énergétique plus élevé, une amélioration de la qualité de

puissance et une réduction des contraintes mécaniques dues aux oscillations du couple mécanique.

Les inconvénients sont les pertes dans les composants électroniques, l'encombrement dû aux composants utilisés ainsi qu'un coût de réalisation relativement élevé.

Les installations éoliennes standard sont représentées dans la figure (Fig. I.2.). Elles sont comme suit :

**Type A.** Il s'agit d'une configuration à vitesse fixe, elle comporte une génératrice à induction à cage d'écureuil connectée au réseau électrique à travers un transformateur. A cette configuration on ajoute des condensateurs en vue de diminuer la puissance réactive absorbée. La connexion au réseau électrique se fait grâce à un soft-starter.

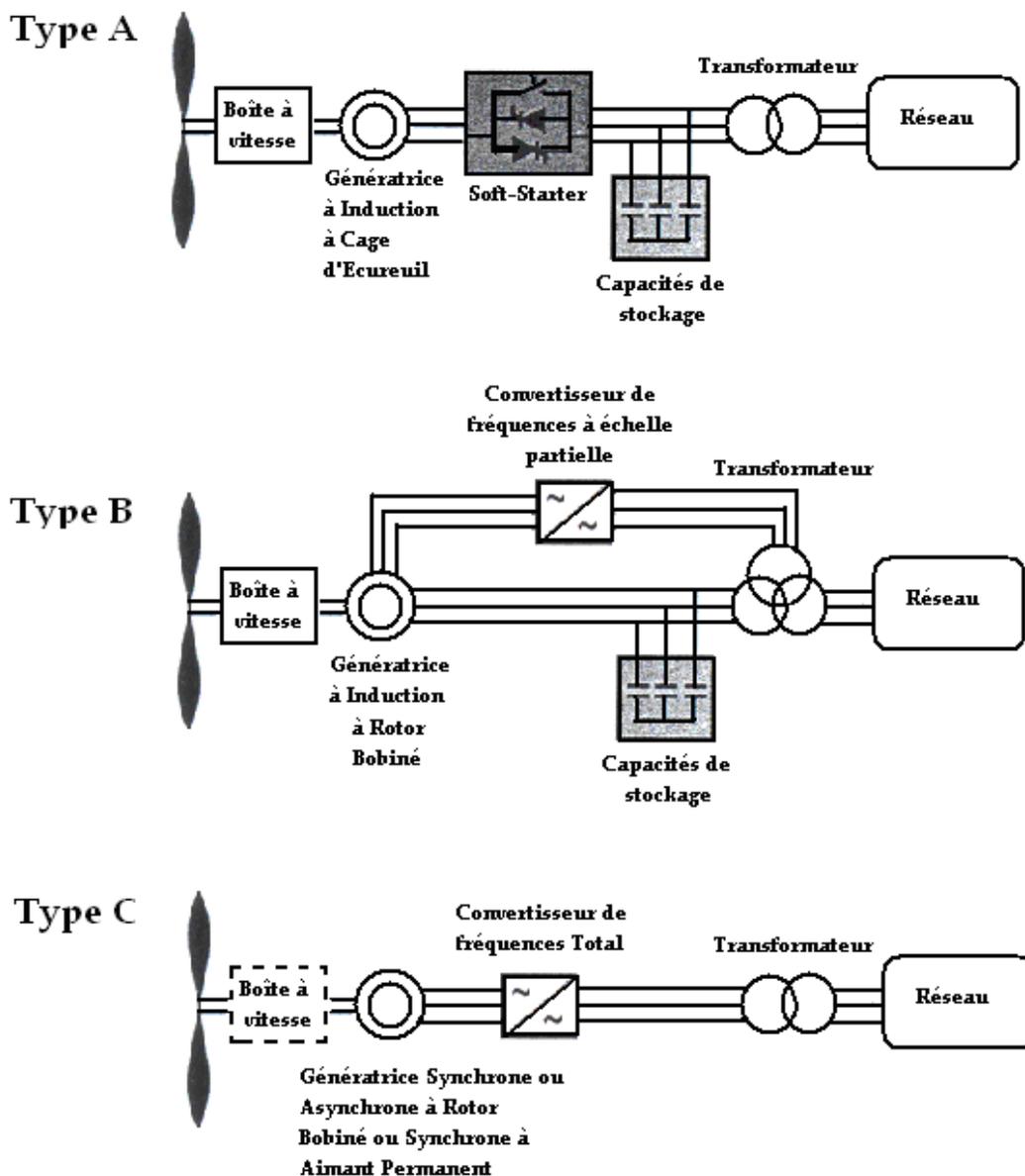


Fig. I.2. Les configurations les plus utilisées actuellement pour les aérogénérateurs

Type B. Connue sous le nom de configuration à génératrice à double alimentation, cette alternative présente une génératrice à induction à rotor bobiné avec une variation limitée de la vitesse. Elle utilise un convertisseur de fréquence partiel qui assure la compensation de la puissance réactive, et la connexion au réseau électrique

Type C. Cette configuration présente une variation totale de la vitesse de la turbine avec une génératrice connectée au réseau électrique à travers un convertisseur de fréquence à pleine échelle. Ce dernier permet la compensation de la puissance réactive en plus de la connexion au réseau électrique. Les génératrices utilisées peuvent être synchrones ou asynchrones, à rotor bobiné ou synchrones à aimant permanent. Certains types de cette configuration peuvent se passer de la boîte à vitesse (multiplicateur).

### **I.2.2. Sur les génératrices utilisées**

De nos jours, la demande en courant électrique compatible avec le réseau peut être satisfaite grâce aux convertisseurs de fréquence, que la génératrice soit à courant alternatif ou à courant continu.

Plusieurs types de génératrices peuvent être utilisées dans la conception des éoliennes

- Asynchrones : à cage d'écureuil, à rotor bobiné ou à double alimentation
- Synchrones : à rotor bobiné ou à aimant permanent
- Autres types de génératrices : générateur à haute tension, à reluctance variable ou à flux transversal.

En considérant le control de vitesse comme critère de classification, les trois types d'aérogénérateurs prédominants sont illustrés dans la figure (Fig. I.2).

Nous présentons dans le tableau (Tab. I.1) les avantages et les inconvénients relatifs à chaque type de génératrices, ce tableau permettra, selon besoins et moyens, de faire un choix lors de la conception.

Les autres types de génératrices peuvent être utilisés, notamment les génératrices à haute tension qui présentent l'avantage de se passer des transformateurs, et les inconvénients d'être chères, de nécessiter des systèmes de sécurité relativement complexes et de présenter des performances pas sûres à long terme.

Les génératrices à flux transversal, dont le fonctionnement est similaire à celui des machines à aimant permanent, présentent un rapport couple/kg intéressant, au prix des fuites magnétiques et du facteur de puissance qui diminue même lors de fonctionnement optimal.

Par ailleurs, la génératrice à reluctance variable présente une structure mécanique simple et robuste, une grande efficacité, un prix réduit ainsi qu'une possibilité de se passer de la boîte

à vitesse. Néanmoins, elle nécessite un convertisseur pour la gestion totale de la puissance, elle est moins efficace que les génératrices à aimant permanent, et présente un facteur de puissance inférieur à celui des génératrices asynchrones.

Les machines à courant continu (MCC) présentent une excellente marge de variation de la vitesse de rotation, une bonne réponse dynamique, une excellente capacité de surcharge, un faible coût de l'ensemble variateur + machine, une tenue en température élevée ainsi qu'une rotation très régulière grâce à son grand nombre de lames. Elles sont néanmoins chères et ont un grand poids. Elles s'usent rapidement en cas d'usage intensif (traction ferroviaire, production industrielle...), les balais doivent être changés régulièrement et le collecteur rectifié à une fréquence plus faible ce qui augmente le coût de maintenance. Elles présentent également un risque de pollutions électromagnétique (les étincelles sont des arcs très perturbateurs), sonore (le frottement des balais produit du bruit) et une pollution due à des particules (l'usure produit de la poussière). Sans oublier le danger qu'elles présentent en milieux explosifs (à cause des étincelles, toutefois le collecteur peut être en enceinte pressurisée). [26], [19]

		Avantages	Inconvénients
Génératrice Asynchrone	A cage d'écureuil	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Simplicité mécanique</li> <li>- Grande efficacité</li> <li>- Nécessite peu de maintenance</li> <li>- Prix bas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ajout d'un système de démarrage</li> <li>- Nécessite un courant réactif pour la magnétisation du stator, ainsi qu'un système pour compenser la puissance réactive</li> <li>- Fonctionnement à vitesse fixe</li> <li>- Fluctuations transmises au réseau électrique</li> <li>- Nécessite une boîte à vitesse</li> <li>- Ne peut avoir une excitation séparée (pas d'aimant permanent et pas d'autonomie)</li> <li>- Présence d'un couple agissant sur le rotor (dû au glissement de vitesse qui augmente avec la charge)</li> </ul>
	A rotor bobiné	Opti Slip induction generator	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Glissement variable pour minimiser les fluctuations des couple et puissance (causées par les rafales)</li> <li>- Simple</li> <li>- Fiable</li> <li>- Ne nécessite pas de bagues (commande optique)</li> </ul>

		<b>Doublement alimentée</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Différence de fréquences (mécanique - électrique) compensée par le convertisseur</li> <li>- Contrôle des puissances active et réactive séparément</li> <li>- Peut être magnétisée par le réseau électrique ou par son propre rotor</li> <li>- Peut générer sa propre puissance réactive</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Coût élevé</li> <li>- La machine doit produire de la puissance réactive en cas de défaut de fonctionnement</li> <li>- La gamme des vitesses dépend de l'investissement économique au dépend de l'efficacité</li> <li>- Nécessite l'utilisation des bagues</li> </ul>
<b>Génératrice synchrone</b>	<b>A rotor bobiné</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ne nécessite pas la compensation de la puissance réactive</li> <li>- Possibilité de se passer de la boîte à vitesse (grâce à l'augmentation du nombre de pôles)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Chère</li> <li>- Volumineuse par rapport à une génératrice synchrone de même puissance</li> <li>- Nécessite un convertisseur pour gérer toutes les plages de puissances</li> </ul>
	<b>A aimant permanent</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Excitation indépendante</li> <li>- Grande efficacité</li> <li>- Grand facteur de puissance</li> <li>- Génération de la puissance à n'importe quelle vitesse</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Matériau aimant permanent cher et difficile à travailler</li> <li>- Nécessité de système de commande sur une large plage de puissance</li> <li>- Nécessite le refroidissement de l'aimant permanent qui perd ses propriétés avec l'augmentation de température</li> </ul>

**Tab. I.1.** Les avantages et inconvénients des types de génératrices les plus utilisées dans la génération de l'énergie éolienne

### I.2.3. Sur les convertisseurs d'électronique de puissance utilisés

Les éoliennes à vitesse variable requièrent des systèmes électroniques pour ajuster la tension et la fréquence au réseau électrique.

Les éléments basiques de la conversion d'énergie sont la diode (vannes incontrôlables), et les switches (interrupteurs) électroniques (vannes contrôlables) : transistors et thyristors.

Le thyristor classique n'est commandé qu'à l'allumage, il s'éteint quand le courant qui le traverse s'annule (inversion de la direction du courant). Alors qu'avec les transistors et les thyristors commandés à l'allumage et à l'extinction, on peut choisir librement le moment d'interruption du courant (moyennant le gate).

Les dispositifs commandables, les plus utilisés sont les *Thyristors Gate Turn Off*, *Integrated Gate Commutated Thyristors*, *Bipolar Junction Transistors*, *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistors* et *Insulated Gate Bipolar Transistors*.

Le choix de l'un des composant plutôt qu'un autre se fait selon la tension maximale à ses bornes, le courant maximal qui le traverse, la plage de fréquence de son fonctionnement ainsi que les dispositifs de pilotage requis.

De nos jours, le dispositif le plus utilisé est le transistor IGBT. Il nécessite peu de dispositifs de pilotage. Certains IGBT présentent, à titre indicatif, les caractéristiques suivantes

$$\begin{cases} V_{\max} = 6000V \\ I_{\max} = 1200A \\ f_c = 5 \rightarrow 100kHz \end{cases}$$

L'électronique de puissance ne cesse de progresser et elle est de plus en plus utilisée dans l'amélioration des performances des éoliennes, en raison des composants qui sont de plus en plus fiables, robustes et performants, ainsi que du rapport qualité prix qui ne cesse de croître. Les éléments de l'électronique de puissance utilisés dans le domaine éolien sont

1. Le soft starter : C'est un élément simple et pas cher, utilisé dans les installations à vitesse fixe. Il est composé de deux thyristors connectés de façon antiparallèle, chacun à une phase. Il sert à connecter la turbine progressivement au réseau électrique, en agissant sur l'angle d'allumage  $\alpha$ , afin d'éviter une augmentation brusque du courant qui risque de créer des perturbations sur le réseau.
2. Les capacités : Elles sont utilisées dans les turbines à vitesse fixe ou à vitesse à variation limitée. Elles servent à compenser la puissance réactive consommée par le générateur.

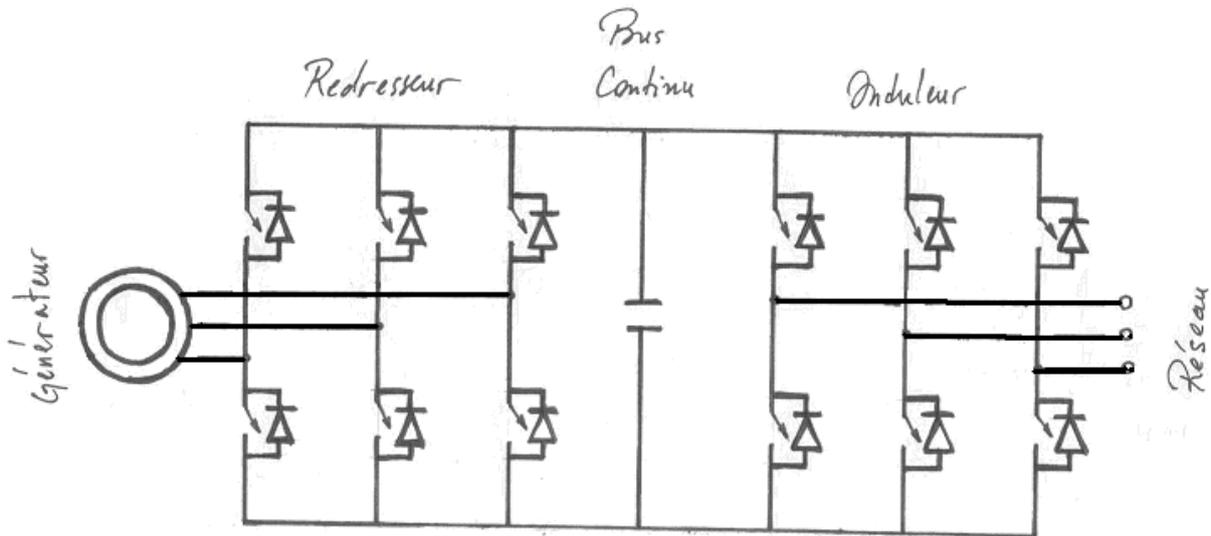


Fig. I.3. Structure du convertisseur back to back

### 3. Les redresseurs et onduleurs

Un convertisseur de fréquence classique se compose de :

- Redresseurs (AC - DC)
- Dispositifs de stockage d'énergie (capacités)
- Onduleur (DC - AC, avec commande en tension et en fréquence)

Durant ces dernières années plusieurs topologies de convertisseurs ont été étudiées et développées dans le but d'utilisation dans le domaine éolien

- Convertisseur back to back
- Convertisseur multi niveaux
- Convertisseur Tandem
- Convertisseur matriciel
- Convertisseur résonnant

Notons que la structure back to back (Fig. I.3) est la solution la plus utilisée actuellement en mode triphasé.

## I.3. Motivations [33], [34]

La consommation des énergies fossiles nous pousse à produire d'avantage de gaz à effet de serre, et de gaz carbonique en particulier.

L'effet de serre modifie et perturbe le climat et l'équilibre de notre planète, et nuit considérablement à notre environnement, et il ne cesse de s'accroître avec une rapidité inquiétante. La lutte contre ce phénomène de nos jours est un objectif très important, et

l'utilisation des énergies renouvelables va dans ce sens, en particulier l'énergie éolienne, qui s'avère être dans ce domaine très prometteuse.

L'amélioration des éoliennes et de leur technologie reste un grand champ ouvert à la recherche et au développement.

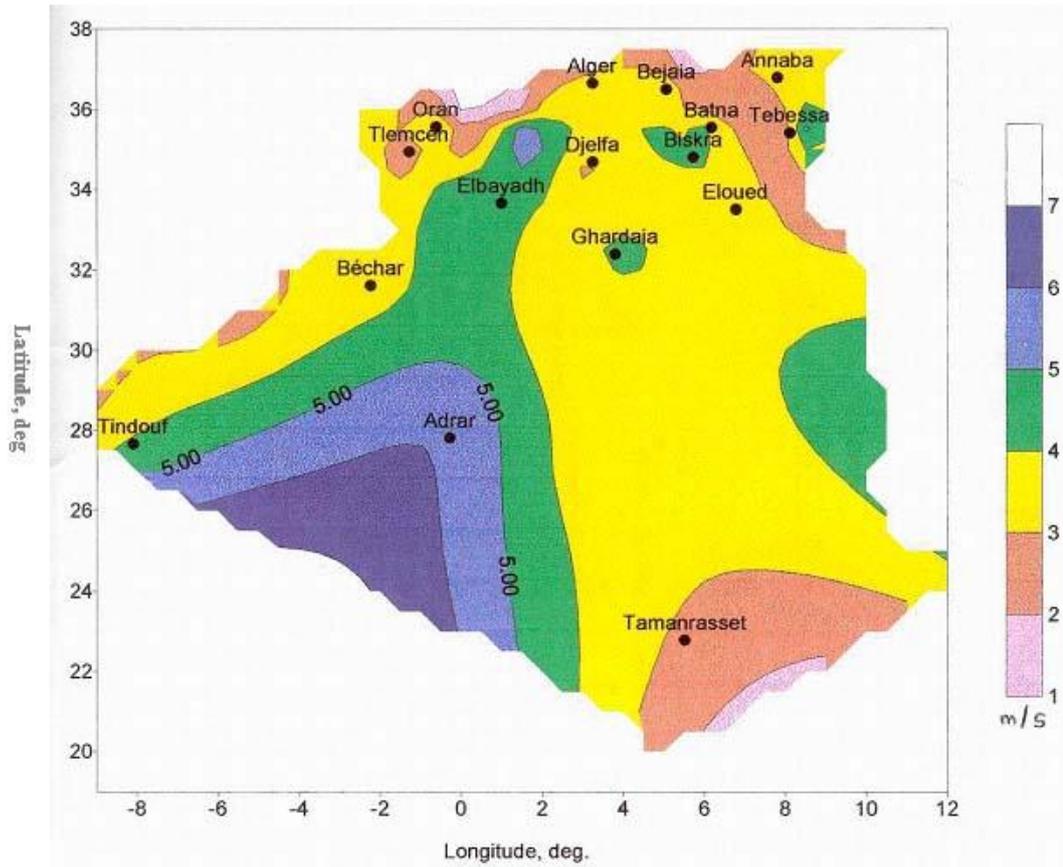
L'énergie éolienne offre plusieurs atouts :

- Il s'agit d'une énergie propre, qui ne pollue ni les eaux ni les sols, et permet une production de l'électricité sans émission des gaz à effet de serre, contrairement aux énergies fossiles.
- C'est une énergie durable. Elle utilise des matériaux dont le cycle de vie respecte l'environnement.
- Les éoliennes peuvent alimenter des sites isolés raccordés ou non au réseau électrique. Il s'agit donc d'une énergie décentralisée et proche des consommateurs. Elles peuvent également fournir de l'énergie sur le réseau en tant que producteur autonome.
- La mise en œuvre des parcs éoliens engendre des activités manufacturières, des activités de construction, de fabrication et de maintenance, ce qui crée un nombre considérable d'emplois.

Cependant, la production de la puissance dépend de la vitesse du vent et possède donc un caractère aléatoire. Ce qui nécessite l'ajout de dispositifs de régulation d'une part. D'autre part, un approvisionnement en d'autres sources d'énergie (photovoltaïque par exemple) ainsi que des dispositifs de stockage (batteries) sont nécessaires pour les périodes peu ventées.

De plus, certaines précautions et considérations techniques sont à prendre avant d'envisager toute installation éolienne, notamment en ce qui concerne le choix du site. En effet, la vitesse du vent est d'autant plus importante que lorsqu'on monte en altitude. Et lorsque le vent rencontre un obstacle, il est perturbé, et l'énergie qui en résulte est de qualité moins bonne.

La figure (Fig. I.4) [41] montre les vitesses moyennes annuelles observées sur le territoire national algérien.



**Fig. I.4.** Carte des vents en Algérie selon le Ministère des Energies et des Mines

Aussi, un bon positionnement des éoliennes par rapport aux habitations doit être étudié, pour éviter certains effets stroboscopiques jugés désagréables. Sans oublier le facteur bruit qui doit être également pris en compte, car les éoliennes produisent deux sortes de bruits : un bruit mécanique dû aux mouvements des engrenages, et un bruit aérodynamique, dit bruit de souffle, résultant du contact du vent avec les pales. Bien que des efforts considérables ont été faits pour réduire ces bruits, les sites éoliens doivent être éloignés des habitations, puisque le niveau de bruit diminue avec la distance.

Quant aux effets des éoliennes sur les espèces animales, des études - confiées généralement à des associations spécialisées - ont défini les impacts possibles sur les oiseaux : la collision directe avec les pales, ou des projections au sol, provoquées par des turbulences de l'air créées par les pales, et l'impact lié à la modification de l'habitat, pour les oiseaux nicheurs et les espèces hivernantes qui provient de la perturbation des territoires de nidification et de nourrissage des oiseaux.

Les études réalisées en Europe indiquent une moyenne de 0,4 à 1,3 oiseau tué par éolienne et par an. Ce chiffre est très faible au regard d'autres facteurs de mortalité (circulation routière, lignes électriques aériennes, baies vitrées).

En résumé, il serait donc judicieux de prévoir, pour les parcs éoliens, des zones à altitudes élevées, éloignées des habitations, des reliefs (montagnes), ainsi que des trajets empruntés par les oiseaux migrateurs, et de prévoir des distances suffisantes entre les éoliennes d'un même site pour qu'elles ne se gênent pas les unes les autres.

La maîtrise de la consommation d'énergie, la décentralisation de la production et l'utilisation accrue des énergies renouvelables représentent les axes principaux de la stratégie énergétique des pays développés. Ces axes contribuent au développement durable et permettent d'anticiper l'épuisement des réserves fossiles. Et les projets éoliens participent pleinement à cette logique.

La filière éolienne alimente aujourd'hui la consommation électrique de 10 millions de personnes en Europe, et permet d'éviter la production de 24 millions de tonnes de gaz carbonique par an. Une conduite similaire sinon meilleure peut être envisagée dans notre pays.

Un bon management de projets éoliens, et une bonne étude des coûts d'investissement et de vente de l'énergie résultante, garantissent une rentabilité aussi bien sur le plan financier que sur le plan écologique.

#### **I.4. Sur l'actualité des éoliennes [31]**

En matière d'énergie éolienne, il est clair qu'il n'existe pas de solution unique, susceptible de s'appliquer partout. Armés de nouveaux matériaux, d'électronique et d'une bonne dose d'imagination, ingénieurs, scientifiques et même quelques aventuriers sont en train de mettre au point des solutions complètement nouvelles d'une réjouissante diversité. Car les énormes hélices des éoliennes classiques ne peuvent utiliser que les vents proches du sol, c'est-à-dire les plus faibles. De plus, les installations correspondantes sont fixes et difficiles à installer en pleine mer. Bref, on peut faire mieux. Kites, cerfs-volants ou ballons : les idées fusent pour tirer parti des puissants vents d'altitude, générer de l'électricité n'importe où avec un système transportable ou tirer des navires de marchandises. Nous citerons quelques unes des dernières nouveautés.

##### *Kite Wind Generator : une centrale en forme de manège*

C'est probablement aujourd'hui le projet le plus impressionnant. Le Kite Wind Generator, alias KiteGen, ou KWG, ou encore KiWiGen (Fig. I.5), fournirait des dizaines de mégawatts (MW) grâce aux vents soufflant à plusieurs centaines de mètres d'altitude.



**Fig. I.5.** *Kite Wind Generator*

Le principe est original : un manège porte des bras pivotants sur lesquels sont accrochés de très longs câbles reliés à des cerfs-volants montant entre 150 et 700 mètres. La position de ces derniers est contrôlée électroniquement et l'ensemble fait tourner le manège, centaines de mètres de diamètre, qui entraîne une turbine.

Alors qu'une éolienne classique ne fournit que 100 W par mètre carré de surface balayée par les pales, le KiteGen pourrait doubler voire tripler cette valeur, et cette surface utile serait bien plus grande.

Porté par une société italienne, Sequoia Automation, spécialisée dans le contrôle de phénomènes vibratoires, ce projet vise actuellement une puissance de 84 MW. Il est soutenu par un groupe d'experts : Dominique Pineau (EDF), W. G. J. H. M. Van Sark (université d'Utrecht), Niveen M. Mawsouf (université du Carie), Wubbo Ockels (université de Delft), Alan Mortimer (Scottish Power) et Wim Turkenburg, spécialiste des énergies renouvelables à l'ONU et à l'ESA.

#### *M. A. R. S. : un ballon transportable*

Magenn Power Inc., entreprise américaine spécialiste du plus léger que l'air, a imaginé un curieux engin, baptisé MARS (*Magenn Air Rotor System*). Au bout d'un câble, à 300 mètres d'altitude, ce ballon captif gonflé à l'hélium est muni de quatre ou cinq grosses pales. Il se comporte comme un rotor horizontal tournant avec le vent. (Fig. I.6)



**Fig. I.6.** *M. A. R. S.*

Porté par son hélium et son effet Magnus (force de sustentation supplémentaire induite par sa rotation), le Mars, rigidifié par une armature en aluminium, tourne sur lui-même et flotte entre 150 et 300 mètres d'altitude.

Un générateur fixé sur l'axe fabrique de l'électricité. D'après ses concepteurs, Mars commencerait à fonctionner à partir d'un vent de seulement 1 mètre par seconde (3,6 km/h). La taille de l'engin pourrait être très variable. Un petit modèle de quelques mètres serait transportable et fournirait plusieurs kilowatts. Magenn projette la construction d'une unité de 4 kW cette année (2007).

#### *Hovering Wing Turbine: des turbines volantes*

Datant de 2004, ce projet d'une société américaine, Briza Technologies, est d'une ampleur bien plus grande.



**Fig. I.7.** *Hovering Wing Turbine*

Retenu par un câble, ce cerf-volant géant mesure plus de cent mètre de longueur et flotte grâce à ses séries de dirigeables, chacun mesurant 5 mètres de diamètre pour 8 mètres de long, et portant une éolienne de type Darrieus mais horizontale, ainsi qu'une turbine (soit 100 kg) (Fig. I.7). Chacun de ces éléments produirait 30 kW.

## Conclusion

Nous avons pu voir les différentes étapes de développement des éoliennes à travers les années, dans un bref historique, et comment les éoliennes ont pu s'introduire dans le marché de l'énergie électrique.

Nous avons présenté quelques généralités concernant les aérogénérateurs, leurs classifications, selon la forme, la puissance et la commande.

Nous avons également exposé les solutions les plus adoptées et les tendances actuelles, et même certaines solutions à potentiel pour les années à venir, en matière de l'électronique de puissance et des génératrices utilisées.

Nous avons, finalement, cité quelques exemples parmi les nombreuses innovations, développées actuellement, dans le domaine de l'éolien.

---

# PARTIE II

---

## Conception et Modélisation

<b>Introduction</b> .....	<b>22</b>
<b>II.1. Description générale du système étudié</b> .....	<b>22</b>
<b>II.2. Etude et conception des différentes parties du système</b> .....	<b>23</b>
II.2.1. Les composantes physiques du système global .....	23
II.2.2. Le pourquoi des choix adoptés .....	26
<b>II.3. Modélisation</b> .....	<b>27</b>
II.3.1. Modèle du système aérodynamique.....	28
II.3.2. Modèle du système de couplage mécanique .....	30
II.3.3. Modèle de la génératrice et de son système de pilotage .....	32
II.3.4. Les actionneurs .....	38
II.3.5. Validation du modèle .....	39
<b>II.4. Réalisation d'un prototype</b> .....	<b>41</b>
<b>Conclusion</b> .....	<b>44</b>

## Introduction

Dans cette deuxième partie, nous allons procéder à la conception et à la modélisation de notre système. Il est à préciser que notre éolienne, est avant tout conçue dans un but d'utilisation individuelle (éolienne domestique), et que la puissance générée est de l'ordre de quelques  $kW$ .

Nous allons tout d'abord subdiviser notre éolienne en plusieurs sous-systèmes élémentaires, que nous développerons les uns après les autres. Nous établirons les modèles mathématiques relatifs à chaque sous-système. Et nous procéderons, finalement, à la validation de ces modèles.

### II.1. Description générale du système étudié [25], [26], [35]

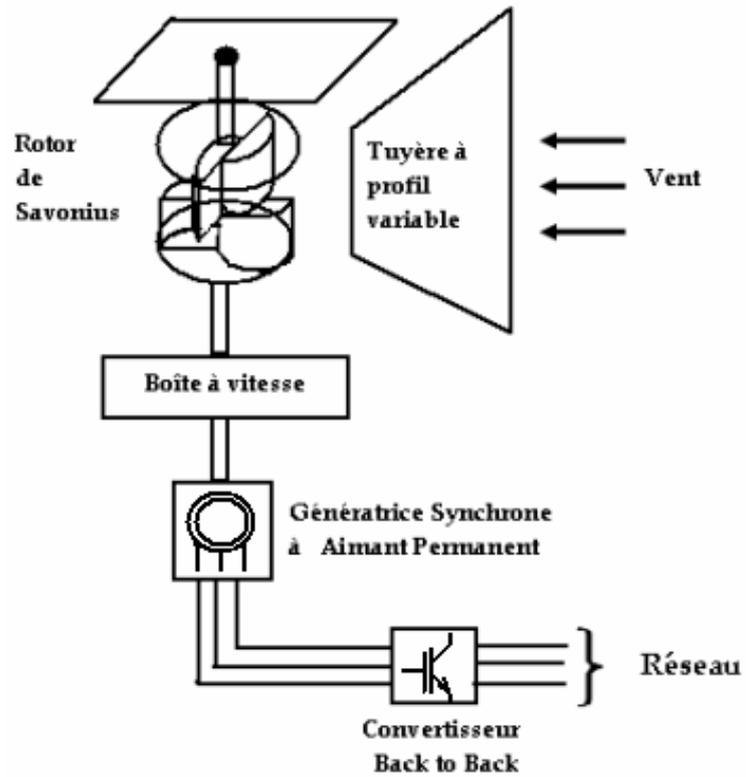
De façon générale, le principe de fonctionnement d'une éolienne consiste à extraire l'énergie cinétique du vent et de la transformer en énergie mécanique grâce à la partie tournante (le rotor), en utilisant des profils aérodynamiques (pales). Le flux d'air crée autour du profil une poussée, qui entraîne le rotor à une vitesse donnée, et une traînée qui constitue une force parasite. La puissance mécanique est ensuite transformée soit en puissance hydraulique avec une pompe, soit en puissance électrique avec une génératrice.

En général, les éoliennes sont également équipées de dispositifs annexes permettant de réguler la vitesse de rotation pour éviter l'emballement pendant les périodes de grand vent.

Notre éolienne (Fig. II.1) comporte donc trois parties principales qui sont un sous-système aérodynamique, un sous-système de couplage mécanique et un sous-système comportant la génératrice et son dispositif de pilotage.

Pour notre étude, nous choisissons une éolienne à axe vertical, à rotor de type Savonius (Fig. II.3). Elle est munie d'un multiplicateur de vitesse et d'une génératrice électrique de type synchrone à aimant permanent, à laquelle sera ajouté un convertisseur de puissance de type back to back (Fig. I.3). A l'ensemble, une tuyère à profil variable, a été ajoutée (Fig. II.2).

Nous proposons dans ce qui suit une description plus détaillée de chacune des parties qui viennent d'être citées.



**Fig. II.1.** Schéma descriptif de l'éolienne sujet de notre étude

## II.2. Etude et conception des différentes parties du système

### II.2.1. Les composantes physiques du système global

#### Tuyère à profil variable

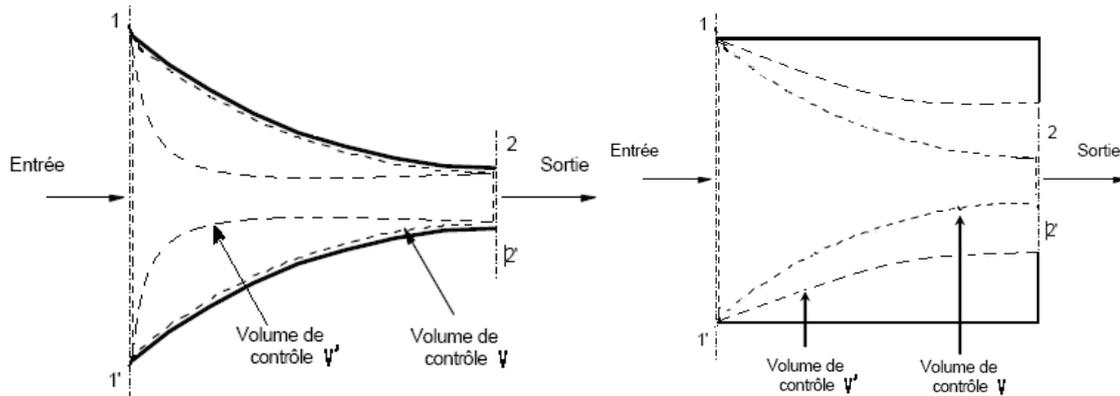


Fig. II.2.a

Fig. II.2.b

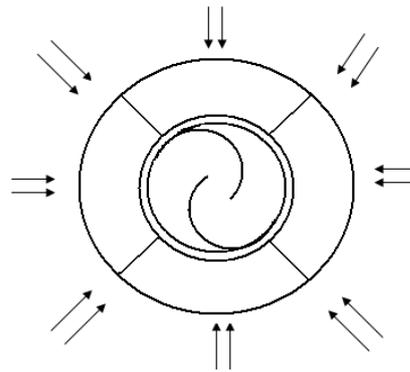


Fig. II.2.c

**Fig. II.2.** Principe de la tuyère à profil variable (Fig. II.2.a. Cas où le rapport des surfaces peut être inférieur à 1. Fig. II.2.b. Cas où le rapport entre les surfaces est supérieur ou égal à 1. Fig. II.2.c. Vue d'en haut de la tuyère)

Pour la conception de notre tuyère, deux configurations sont possibles, selon les vitesses du vent dans la région où l'on projette d'installer notre éolienne.

Dans le premier cas, les vitesses sont très importantes, et le vent a plutôt besoin d'être ralenti. Le rapport des sections peut alors prendre des valeurs supérieures ou inférieures à 1 (Fig. II.2.a).

Dans le deuxième cas, les vitesses de vent ne dépassent pas un certain seuil, et le vent nécessite plus une accélération qu'un ralentissement. Le rapport des sections ne prend alors que des valeurs supérieures à 1 (Fig. II.2.b).

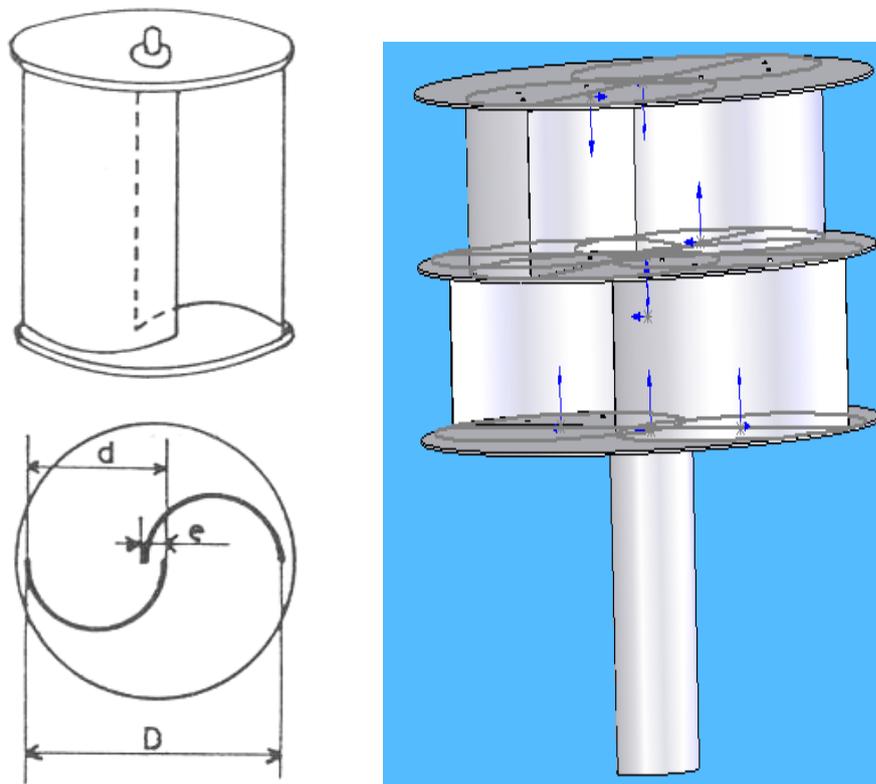
On adoptera la première configuration pour notre étude, pour le fait qu'elle englobe tous les cas de figures ; le rapport des surfaces prend des valeurs dans un intervalle plus large,

ce qui permet d'accélérer le vent lorsque sa vitesse est faible, et d'assurer un rôle de protection pour l'éolienne pendant les périodes où le vent est très fort.

### Rotor de Savonius

Les dimensions du rotor sont choisies selon la puissance mécanique que l'on souhaite générer. Cependant, dans le cadre de notre travail, nous choisirons les dimensions du rotor selon les dimensions trouvées dans la bibliographie, et ce afin de pouvoir valider les modèles mathématiques.

Le rotor de la turbine est donc conçu à partir de deux fûts métalliques de diamètre  $d = 0.60m$  et de hauteur  $H = 0.90m$ . Les deux demis fûts sont inters calés avec une distance  $e = 0.1m$  telle que rapport  $\frac{e}{d} = \frac{1}{6}$ , rapport pour lequel les performances sont optimales selon les expériences canadiennes (Messieurs Newmann et Lek Ah Chai de l'université de Mc Gill à Montréal) [1]. Le diamètre résultant du rotor est  $D = (2d - e) = 1.1m$  (Fig. II.3).



**Fig. II.3.** Rotor de Savonius avec ses dimensions

Le rotor sera disposé en deux étages décalés de  $\frac{\pi}{2}$  l'un par rapport à l'autre, afin d'éviter les couples de démarrage négatifs, tout en préservant les mêmes performances pour l'éolienne [1].

La surface balayée par la turbine est donc  $A_{wt} = 2HD = 2H(2d - e) = 1.98m^2$ .

#### Génératrice synchrone à aimant permanent [9], [10], [16], [17], [22]

Il s'agit d'une machine à courant alternatif dans laquelle la fréquence de la tension induite engendrée et la vitesse sont dans un rapport constant.

L'utilisation des aimants permanents est aujourd'hui pratiquement systématique pour les puissances inférieures à 10 kW, et s'étend de plus en plus aux grandes puissances (MW). Plus la puissance est grande, plus les prix deviennent très élevés, et l'utilisation des aimants permanents pour les machines à grandes puissances reste réservée à des applications très spécifiques.

Il existe plusieurs topologies pour les machines synchrones à aimant permanent. Les trois types utilisés couramment dans l'industrie sont les machines à concentration de flux, à aimants enterrés et celles à aimants collés.

Nous choisirons, dans le cadre de notre travail une génératrice synchrone à aimant permanent à une seule paire de pôles, afin de minimiser les coûts et l'encombrement, et nous ajouterons une boîte à vitesse pour l'adaptation des vitesses.

#### Multiplieur

Il s'agit d'une boîte à vitesse composée d'un système d'engrenage et sert principalement à multiplier la vitesse de rotation de la turbine à une valeur exploitable pour la génération de l'énergie au niveau de la génératrice.

#### Convertisseur back to back

Il s'agit d'un convertisseur de puissance bidirectionnel (Fig. I.3). Il est composé de deux convertisseurs de tension. Le bus continu a une tension amplifiée par rapport à la tension entre phases, afin d'avoir un contrôle total du courant du réseau électrique.

L'étage redresseur sert à convertir la tension alternative en une tension continue. Il est commandé par modulation de largeur d'impulsion.

L'onduleur triphasé résulte du groupement de trois demi ponts monophasés. Il est également commandé par modulation de largeur d'impulsion.

### II.2.2. Le pourquoi des choix adoptés

Nombreuses sont les méthodes de commande ainsi que les études menées au profit des éoliennes à axe horizontal et peu concernant celles à axe vertical. Le principal argument avancé étant la puissance et le rendement élevés qu'offre le premier type d'éoliennes.

Notre intérêt se porte donc sur les éoliennes à axe vertical. Bien que celles-ci développent une puissance relativement moyenne, elles seront exploitées dans un but d'utilisation individuelle et dédiées à être placées très près des habitations car peu perturbées par l'environnement (murs, autres éoliennes,...) et peu bruyantes. [20]

Le rotor de Savonius est utilisé principalement pour sa simplicité du point de vue réalisation, son démarrage à des vitesses de vent relativement faibles, en plus des faibles coûts de réalisation. Par ailleurs, nous fixons ses paramètres géométriques de sorte à avoir les performances optimales. La forme de ce rotor est faite de sorte à ce qu'il ne nécessite pas de système d'orientation, ce qui constitue un argument de plus pour notre choix.

Le choix de la génératrice synchrone à aimant permanent, en dépit de son coût relativement élevé, a été fait pour les raisons citées précédemment dans la partie I, à savoir son excitation indépendante, sa grande efficacité, son grand facteur de puissance et la génération de la puissance à n'importe quelle vitesse.

Le multiplicateur a été ajouté afin de réduire les prix de réalisation. En effet, pour des applications à faibles vitesses (exemple éoliennes), il est nécessaire d'augmenter le nombre de paires de pôles pour la machine, ceci implique un prix plus élevé ainsi qu'un encombrement en conséquence.

Le convertisseur de puissance, quant à lui, nous permettra d'obtenir les tensions alternatives à des fréquences données. Notre choix se porte sur un convertisseur back to back étant la structure la plus adoptée dans le domaine éolien, de nos jours.

Nous nous proposons également d'ajouter la tuyère à profil variable. Celle-ci aura pour rôle d'accélérer le vent en périodes faiblement ventées et vice versa. Elle assurera également un rôle de protection pour l'éolienne pendant les périodes à vents violents qui risqueraient de l'endommager, sans nécessiter pour autant l'arrêt total de l'éolienne. Ainsi, la régulation de la vitesse du vent qui attaque l'éolienne se fera de façon automatique par l'ajustement de l'ouverture de la tuyère. Il en sera de même pour la puissance produite par l'éolienne.

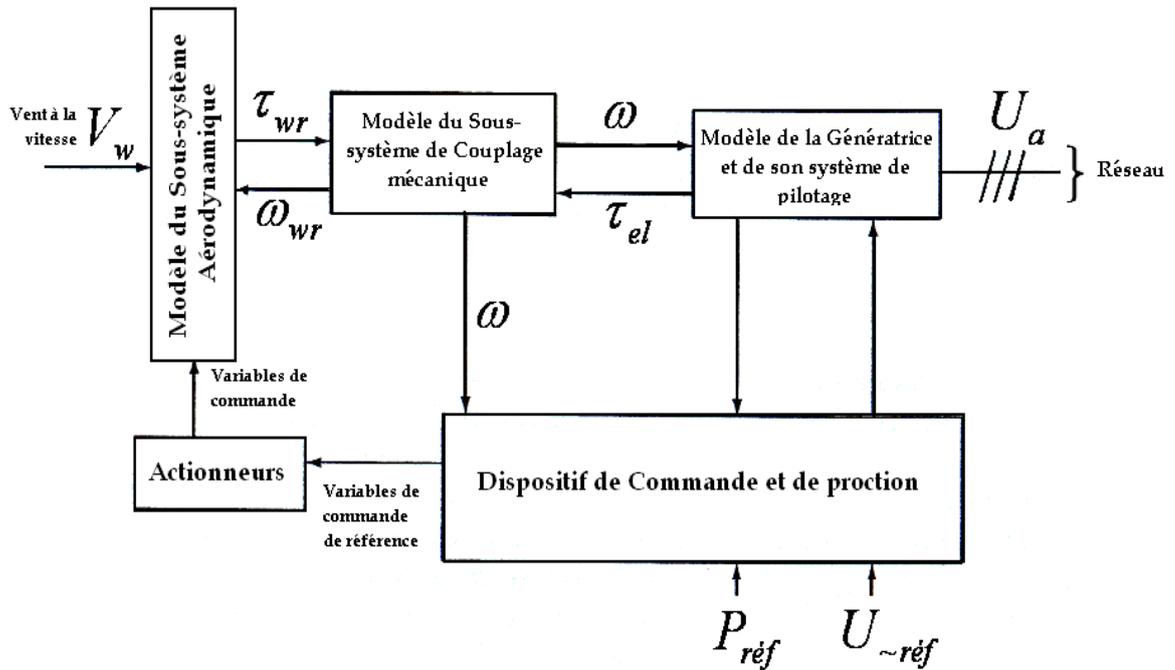


Fig. II.4. Schéma en bloc de tous les sous-systèmes de notre éolienne

## II.3. Modélisation

Le modèle de simulation que nous développons dans cette partie est un modèle de connaissance, qui découle des équations de la physique que nous détaillons pour chaque sous-système. Ce modèle sera utilisé pour la synthèse de la commande, et l'étude des performances.

Nous commencerons tout d'abord par la mise en évidence des différentes grandeurs physiques liées au système global et aux sous-systèmes qui le composent, dans le but de faciliter la modélisation mathématique.

Le schéma en bloc de la commande d'une éolienne peut être représenté par la figure (Fig. II.4), où chaque bloc représente un sous-système dont le modèle reste à déterminer. Comme indiqué dans cette figure, le système global comprend trois sous-systèmes principaux, à savoir le rotor de la turbine, le couplage mécanique et la génératrice couplée à son système de pilotage.

### II.3.1. Modèle du système aérodynamique [4], [20]

Le système aérodynamique est le rotor de la turbine, son schéma en bloc est représenté dans la figure (Fig. II.5) qui met en évidence les grandeurs d'entrée/sortie correspondantes. Le

rotor réduit la vitesse du vent et transforme l'énergie cinétique absorbée de l'air en énergie mécanique.

L'énergie mécanique est fonction de paramètres de construction relatifs au rotor (son type, sa forme et ses dimensions), des paramètres dépendant de la commande utilisée ainsi que des vitesses du vent et de rotation de la turbine.

Le modèle du rotor se déduit de la relation de Betz (Annexe1), liant la vitesse de l'air à la puissance mécanique extraite du vent

$$P_{wt} = \frac{\rho}{2} A_{wr} C_p V_w^3 \quad (\text{II.1})$$



Fig. II.5. Schéma en bloc du sous système « Rotor de Savonius »

Où

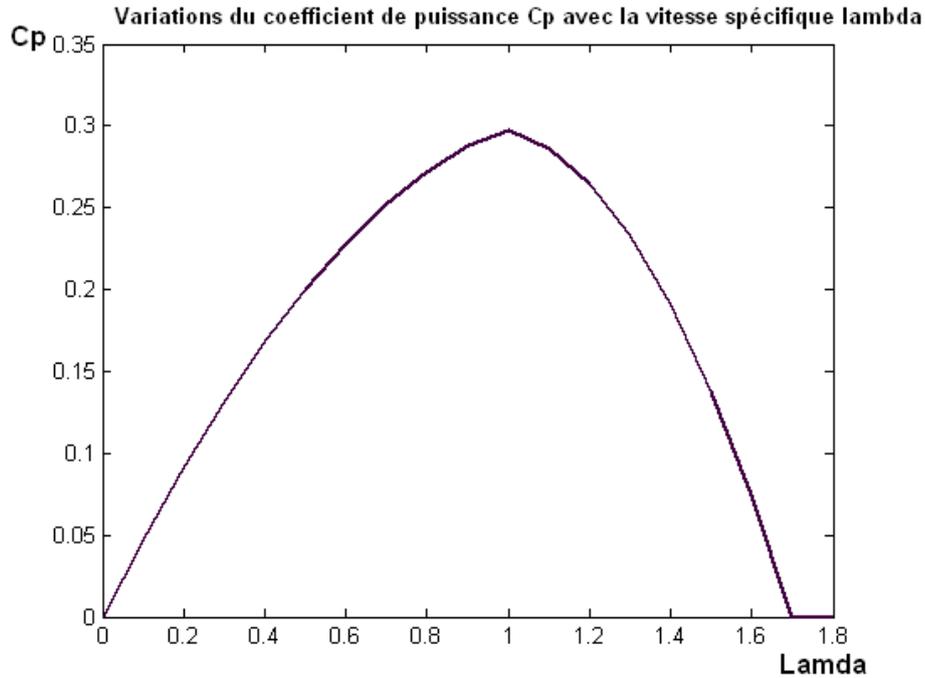
$P_{wt}$	La puissance mécanique totale extraite du vent (watts)
$\rho$	La densité de l'air ( $Kg/m^3$ )
$C_p$	Coefficient de puissance
$A_{wr}$	La surface balayée par le rotor de la turbine ( $m^2$ )
$V_w$	La vitesse du vent ( $m/sec$ )

Pour la modélisation du fonctionnement de la turbine, on peut également s'intéresser au couple mécanique. Ce dernier est lié à la puissance par la relation

$$\tau_{wr} = \frac{P_{wt}}{\omega_{wr}} \quad (\text{II.2})$$

Avec

$\tau_{wr}$	Le couple mécanique ( $N.m$ )
$\omega_{wr}$	La vitesse angulaire du rotor de la turbine ( $rad/sec$ )



**Fig. II.6.** Variations du coefficient de puissance en fonction de la vitesse spécifique

Le coefficient de puissance  $C_p$  dépend de la grandeur Lambda  $\lambda = \frac{\omega_{wr} R}{V_w}$  appelée vitesse spécifique, tel que  $R = d - \frac{e}{2}$  le rayon de la turbine (Fig. II.3).

L'expression de  $C_p$ , pour le rotor de Savonius est donnée par

$$C_p = \begin{cases} 0.53(\lambda - 0.2)(1.7 - \lambda) & \text{pour } 0.9 < \lambda < 1.6 \\ 0.5\lambda - 0.2\lambda^2 & \text{pour } 0 < \lambda < 0.9 \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

Les variations de ce facteur de puissance en fonction de la vitesse spécifique sont illustrées dans la figure (Fig. II.6).

Selon les études canadiennes [1], la condition pour un fonctionnement optimal est telle que  $0.9 < \lambda < 1$ . Valeur pour laquelle la puissance maximale extraite est  $P_{\max} = 0.18 A_{wt} V_w^3$ .

### II.3.2. Modèle du système de couplage mécanique [4], [20]

Le système de couplage mécanique de l'aérogénérateur est constitué des différentes masses en rotation et des arbres de connexion, en plus d'une éventuelle boîte à vitesse.

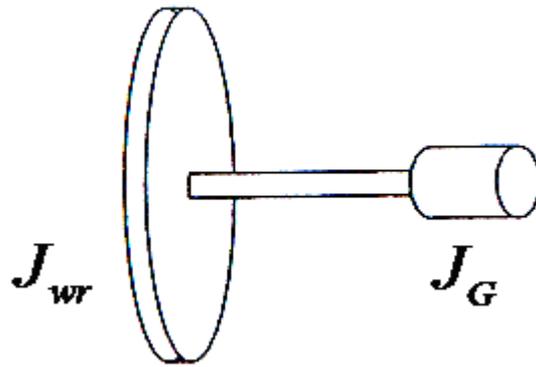


Fig. II.7. Approximation du système mécanique par deux masses reliées par un arbre

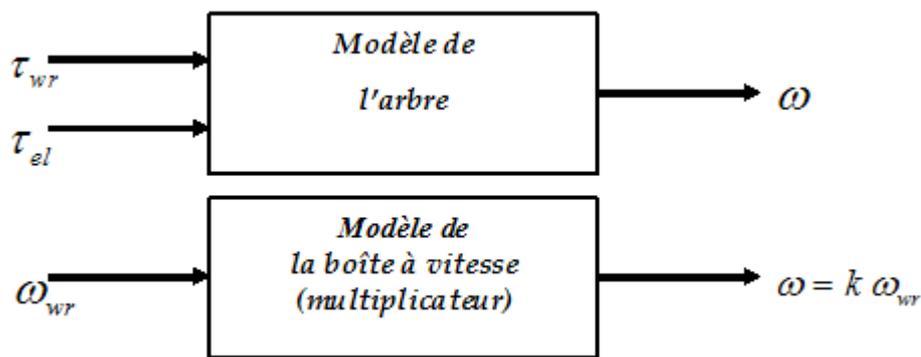


Fig. II.8. Schémas en bloc de l'arbre et de la boîte à vitesse

La plus grande partie des termes d'inertie proviennent de la turbine et du rotor de la génératrice, c'est pour cela que l'inertie des engrenages de la boîte à vitesse est souvent négligée, ne tenant en compte que son rapport de multiplication.

Le système mécanique peut alors être assimilé à deux masses reliées par un arbre, et l'ensemble en rotation (Fig. II.7).

Les schémas en bloc correspondant à l'arbre et à la boîte à vitesse sont donnés par la figure (Fig.II.8), Tels que

$\tau_{el}$	Le couple électromagnétique ( $N.m$ )
$\omega$	La vitesse de rotation de la génératrice ( $rad/sec$ )
$k$	Le rapport de multiplication de la vitesse de rotation

Afin de simplifier le modèle, on supposera que l'arbre ne se tord pas. On considèrera donc qu'une vitesse de rotation est la même tout au long d'un même arbre.

De façon générale, le modèle du système de couplage mécanique utilisé est déduit de la représentation des deux masses en mouvement (Fig. II.7).

L'application de la seconde loi de Newton, du côté de la turbine, nous donne la relation  $J \frac{d\omega_{wr}}{dt} = \tau_{wr}$ . Du côté de la génératrice, on aura  $J_G \frac{d\omega}{dt} = -B_m \omega - \tau_{el}$ .

En combinant les deux relations précédentes, et en les ramenant du côté de la génératrice, on trouve le modèle du sous-système de couplage mécanique (II.4)

$$J \frac{d\omega}{dt} = \tau_{wr} - \tau_{el} - B_m \omega \quad (\text{II.4})$$

Où

$J = J_G + \frac{J_{wr}}{k}$  La constante d'inertie totale du système mécanique (somme des constantes d'inertie des rotors de la génératrice et de la turbine respectivement)

$B_m \omega$  Approximation linéaire des forces de frottements visqueux au niveau de la génératrice

Ce modèle est obtenu en négligeant le déplacement angulaire entre les fins des deux arbres, et en utilisant la relation liant leurs vitesses angulaires respectives  $\omega_{wr} = \frac{\omega}{k}$ .

### II.3.3. Modèle de la génératrice et de son système de pilotage [4], [6], [7], [16], [20], [22], [27], [28]

Cette partie inclut tous les éléments compris entre l'arbre et les terminaux principaux. Les convertisseurs de puissance et la génératrice elle-même, par exemple, en font partie.

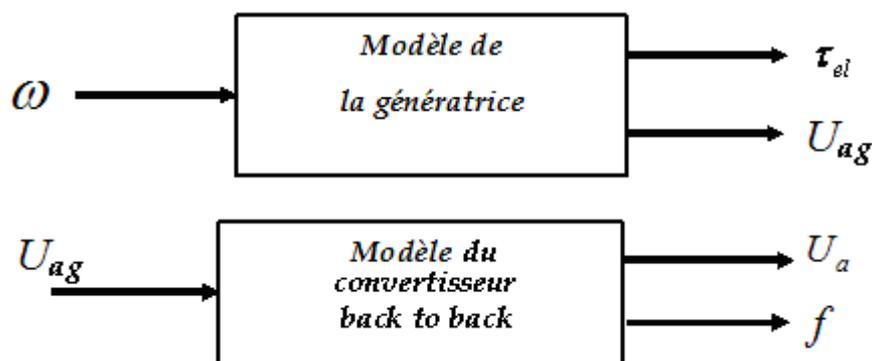


Fig. II.9. Schémas en bloc de la génératrice et de l'onduleur

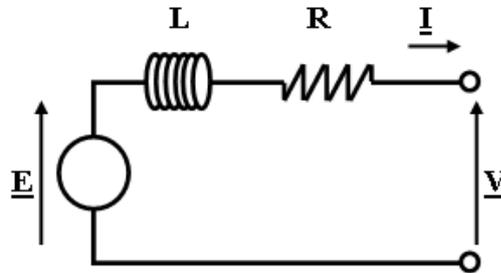
La figure (Fig.II.9) représente les schémas en bloc de la génératrice, de son système de pilotage ainsi que des variables entrée/sortie associées.

Où

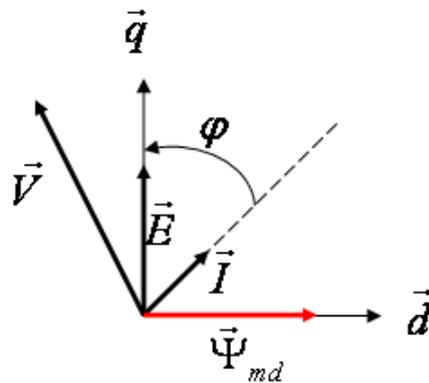
$U_{ag}$  La tension alternative triphasée à la sortie de la génératrice (V)

$U_a$  La tension alternative à la sortie du convertisseur back to back (V)

$f$  La fréquence du réseau électrique (Hz)



**Fig. II.10.** Schéma d'Ischenberg équivalent à une machine à pôles lisses en fonctionnement linéaire



**Fig. II.11.** Diagramme vectoriel indiquant les différentes grandeurs physiques du schéma d'Ischenberg

Il existe quatre schémas équivalents pour une phase, en considérant la machine avec les hypothèses : non saturée à pôles lisses, saturée à pôles lisses, non saturée à pôles saillants ou saturée à pôles saillants. Nous développons la première configuration, qui correspond au modèle d'Ischenberg (Fig. II.10 et Fig. II.11). On utilise ce modèle car bien qu'il soit imprécis quantitativement, celui-ci permet une description qualitative simple et acceptable de la machine synchrone. [16]

Les grandeurs physiques représentées sur le schéma de la figure (Fig. II.10) sont données par

$$\underline{E} = \begin{pmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Psi_m \omega \sqrt{2} \sin(p\omega t) \\ \Psi_m \omega \sqrt{2} \sin\left(p\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \Psi_m \omega \sqrt{2} \sin\left(p\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \end{pmatrix} \quad \underline{I} = \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I\sqrt{2} \sin(p\omega t - \varphi) \\ I\sqrt{2} \sin\left(p\omega t - \varphi + \frac{2\pi}{3}\right) \\ I\sqrt{2} \sin\left(p\omega t - \varphi - \frac{2\pi}{3}\right) \end{pmatrix}$$

Pour les f.e.m et les courants statoriques.

Tels que

$\Psi_m$  Le flux de l'aimant permanent (*Weber*). La méthode pour sa détermination est donnée en Annexe5.

$\varphi$  Le déphasage angulaire entre f.e.m et courant (*rad*) (voir Fig. II.11)

Les équations électriques de la MSAP sont écrites dans le système d'axes  $d-q$ , orienté selon le rotor. La transformation  $d-q$  est présentée dans l'Annexe4.

Les équations de tension sont

$$\begin{cases} v_d = R_s i_d + L_{sd} \frac{di_d}{dt} - L_{sq} \omega i_q \\ v_q = R_s i_q + L_{sq} \frac{di_q}{dt} - L_{sd} \omega i_d + \Psi_{md} \omega \end{cases} \quad (\text{II.5})$$

Et l'équation du couple électromagnétique

$$\tau_{el} = p \left[ (L_{sd} - L_{sq}) i_q i_d + \Psi_{md} i_q \right] \quad (\text{II.6})$$

Le couple électromagnétique dans le repère  $abc$  se détermine par la relation

$$\begin{aligned} \tau_{el}(t) &= \frac{P_{el}(t)}{\omega} = \frac{e_a(t)i_a(t) + e_b(t)i_b(t) + e_c(t)i_c(t)}{\omega} \\ &= 3\Psi_m I \cos((p\omega - \omega_s)t + \varphi) \end{aligned} \quad (\text{II.7})$$

Sa valeur moyenne est non nulle à la condition de synchronisme

$$p\omega = \omega_s \quad (\text{II.8})$$

Le couple moyen aura alors pour valeur moyenne

$$\begin{aligned} \tau_{el} &= 3\Psi_m I \cos(\varphi) \\ &= 3\Psi_m i_q \end{aligned} \quad (\text{II.9})$$

Où

$i_d, i_q$  Les courants statoriques dans la base  $d-q$  (A)

$v_d, v_q$  Les tensions statoriques dans la base  $d-q$  (V)

$R_s$  La résistance statorique ( $\Omega$ )

$L_{sd}, L_{sq}$	L'inductance du stator ( $H$ )
$\Psi_{md}$	Le flux de l'aimant permanent exprimé dans la base $d-q$ ( <i>Weber</i> )
$p$	Le nombre de paires de pôles de la machine, on le prend égal à 1
$\omega = p \frac{d\theta_m}{dt}$	La vitesse angulaire du rotor de la génératrice ( <i>rad/sec</i> )
$\theta_m$	La position angulaire du rotor de la génératrice ( <i>rad</i> )

### Le pilote de la génératrice

Le pilote de génératrice utilisé est le convertisseur back to back (Fig. I.3) qui nous permettra de gérer le flux de puissance et d'ajuster la fréquence à celle du réseau électrique principal.

Ce convertisseur se constitue par un étage redresseur et un étage onduleur séparés par un bus continu. On utilisera pour ces deux étages la méthode de commande par Modulation de Largeur d'Impulsion.

Le convertisseur de puissance total ainsi constitué est vu comme une source de courant à fréquence fondamentale. Cette hypothèse est valable sous les conditions

- Paramètres de la machine connus
- Les interrupteurs opèrent dans leur région linéaire
- Utilisation de la modulation vectorielle
- La tension finale approche la valeur nominale

On supposera ces conditions remplies, bien que la dernière soit moins évidente à assurer dans les cas d'accidents de disfonctionnement du réseau électrique. Mais ceci ne pose pas de problème puisqu'en cas d'anomalie, l'éolienne est automatiquement déconnectée du réseau pour des raisons de sécurité.

La commande du convertisseur du côté réseau se fait de sorte à ce que la tension du bus continu reste constante. Quant à la commande du côté génératrice, celle-ci se fait de sorte à avoir la magnétisation et la vitesse angulaire du rotor désirées [4].

Les équations régissant le fonctionnement du bus continu (Fig. II.12) se déduisent aisément en appliquant les lois de Kirchoff

$$\begin{cases} i_l = i_{dc} - i_{ca} \\ i_{ca} = C \frac{du_{dc}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

Avec

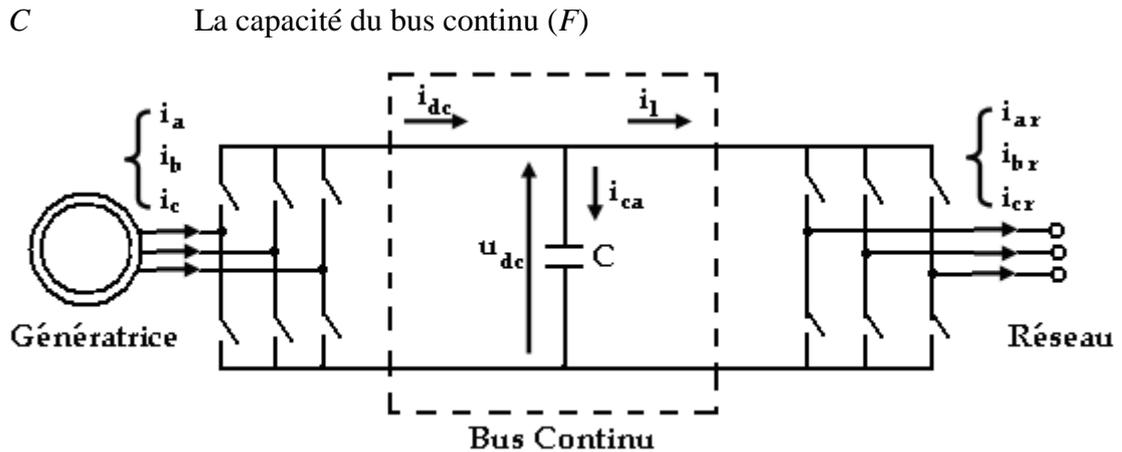


Fig. II.12. Définition des courants et tensions du bus continu

En régime établi, on supposera  $u_{dc}$  constante puisque la commande du côté réseau se fait en conséquence, ce qui implique  $i_{ca} = 0$  et  $i_l \approx i_{dc}$ , en instantané et en valeur moyenne.

La commande de la partie onduleur est donc fixée. Elle est telle que la tension du bus continu reste pratiquement constante. On y appliquera la commande par MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) vectorielle.

La seule différence entre redresseur et onduleur réside dans le signe de la puissance. La commande de l'étage redresseur sera donc explicitée en reprenant d'abord le modèle (II.11), et le schéma (Fig. II.13) correspondants.

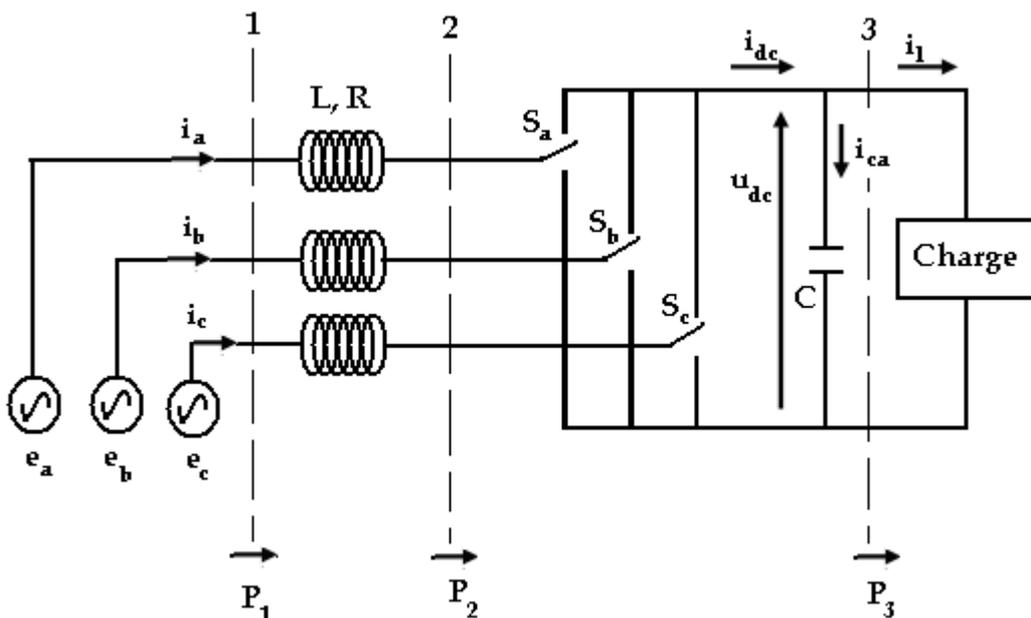


Fig. II.13. Schéma simplifié pour modéliser l'étage redresseur

$$\left\{ \begin{array}{l} L \frac{di_a}{dt} = e_a - v_a - Ri_a = e_a - u_{dc} \frac{2S_a - S_b - S_c}{3} - Ri_a \\ L \frac{di_b}{dt} = e_b - v_b - Ri_b = e_b - u_{dc} \frac{-S_a + 2S_b - S_c}{3} - Ri_b \\ L \frac{di_c}{dt} = e_c - v_c - Ri_c = e_c - u_{dc} \frac{-S_a - S_b + 2S_c}{3} - Ri_c \\ C \frac{du_{dc}}{dt} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c - i_l \end{array} \right. \quad (\text{II.11})$$

Tels que

$i_l$  Le courant délivré à l'onduleur (A)

$S_a, S_b$  et  $S_c$  représentent les positions des switches : 1 pour la position fermée, 0 pour la position ouverte.

Afin de simplifier le modèle, le réseau électrique est vu comme un puits de courant à impédance infinie, ce qui permet de négliger sa dynamique. Cette supposition est valide pour de petites variations de la tension du bus continu.

Le modèle dans (II.11) est détaillé. Pour l'analyse, le circuit sera modélisé par ses valeurs moyennes. En supposant la commutation très rapide (hautes fréquences), et les ondulations très négligées devant la valeur moyenne, ceci permet de remplacer les grandeurs instantanées par leurs valeurs moyennes équivalentes. Les équations deviennent alors

$$\left\{ \begin{array}{l} L \frac{di_a}{dt} = e_a - v_a - Ri_a = e_a - u_{dc} \frac{2d_a - d_b - d_c}{3} - Ri_a \\ L \frac{di_b}{dt} = e_b - v_b - Ri_b = e_b - u_{dc} \frac{-d_a + 2d_b - d_c}{3} - Ri_b \\ L \frac{di_c}{dt} = e_c - v_c - Ri_c = e_c - u_{dc} \frac{-d_a - d_b + 2d_c}{3} - Ri_c \\ C \frac{du_{dc}}{dt} = d_a i_a + d_b i_b + d_c i_c - i_l \end{array} \right. \quad (\text{II.12})$$

$d_a, d_b$  et  $d_c$  correspondent aux rapports cycliques (durées de fermeture par rapport à la période de commutation).

Ce modèle peut encore être simplifié en passant par la transformation de Parck, et l'on se retrouve alors avec deux équations au lieu de trois (II.5), auxquelles on ajoute l'équation du bus continu

$$C \frac{du_{dc}}{dt} = \frac{u_d}{u_{dc}} i_d + \frac{u_q}{u_{dc}} i_q - i_l \quad (\text{II.13})$$

En résumé, on peut dire que les convertisseurs à découpage sont, en général, modélisés correctement par un simple gain [22].

### II.3.4. Les actionneurs

L'actionneur est déterminé selon le type de commande utilisée et la variable sur laquelle on agit pour réguler notre système.

Selon nos objectifs de commande que nous exposerons dans la partie suivante, nous proposons deux actionneurs.

Le premier actionneur n'est autre que la génératrice elle-même. On utilisera son couple électromagnétique dans le but de réguler la vitesse de rotation.

Le second étant deux vérins qui modifient le profil de la tuyère, et par conséquent la section d'attaque de celle-ci.

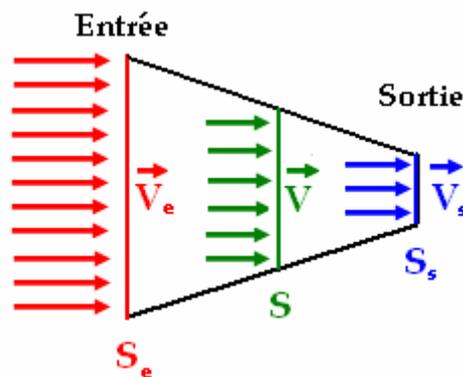
On s'intéresse ici à l'écoulement d'air à travers la tuyère (Fig. II.14). Celle-ci présente les sections d'entrée et de sortie  $A_e$  et  $A_s$  respectivement. Les vitesses du vent à l'entrée et à la sortie de la tuyère sont notées  $V_e$  et  $V_s$  respectivement.

Un élément volume d'air  $dV_{air}$ , entrera dans la tuyère à travers la section d'attaque  $A_e$  avec une vitesse  $V_e$ , pendant un laps de temps  $dt$ . Ce volume vaudra  $dV_{air} = V_e A_e dt$ . Ce même élément de volume quittera la tuyère à travers la section  $A_s$ , avec une vitesse  $V_s$ , et aura pour valeur  $dV_{air} = V_s A_s dt$ . On aura, alors

$$V_s = \frac{A_e}{A_s} V_e \quad (\text{II.14})$$

Cette même relation peut être obtenue en définissant le débit massique de l'air

$$Q_m = \iint_S \rho \vec{V} \cdot d\vec{S}$$



**Fig. II.14.** *Écoulement uniforme d'un fluide parfait incompressible à travers un canal à section variable*

Si l'on suppose le fluide incompressible, alors la densité  $\rho$  serait constante. Et si de plus le fluide était uniforme, alors la vitesse serait la même sur une même section, et l'on peut dire, ainsi, que  $V_e$  est constante sur  $S_e$ ,  $V_s$  est constante sur  $S_s$ , et de façon générale  $V$  est constante sur sa surface quelconque  $S$ .

Le principe de conservation de la matière nous permet de dire que le débit  $Q_m$  est constant. Et puisque  $\vec{V}$  et  $d\vec{S}$  sont colinéaires, on aura, donc

$$\rho V_e S_e = \rho V S = \rho V_s S_s$$

D'où le modèle obtenu dans la relation (II.14).

Quant au modèle de l'actionneur proprement dit, c'est-à-dire la relation liant la pression délivrée par les électrovannes et le rapport de section de la tuyère, on le supposera linéaire de second ordre, et ce dans le but de simplifier le modèle. En effet, tout système, quelque soit son modèle mathématique peut être vu comme un système du second ordre, avec des paramètres à identifier. Le transfert entre le rapport de surfaces de la tuyère et la pression délivrée par l'électrovanne peut donc être formulé de la manière suivante

$$W(s) = \frac{K_a}{s^2 + a s + b} P_r(s) \quad (\text{II.15})$$

Avec

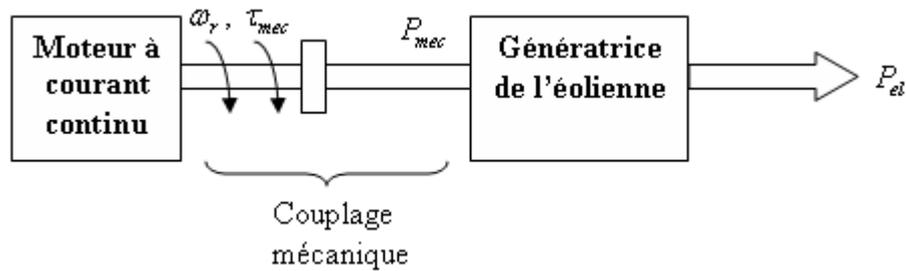
$a$ ,  $b$  et  $K_a$  Les paramètres du modèle de l'actionneur.

On agira par la suite sur le rapport de surfaces  $w = \frac{A_e}{A_s}$ , et par conséquent, on modifiera le profil de la tuyère à l'aide des électrovannes, selon nos objectifs de commande que nous présenterons lors de la prochaine partie. On supposera la réponse de cet actionneur instantanée, et nous ne nous intéresserons, par conséquent qu'à sa variable de commande à savoir  $w$ .

### II.3.5. Validation du modèle [26], [27]

La validation est sans doute l'étape la plus importante lors du processus de modélisation. Elle permet de voir le rapprochement de la description mathématique du système physique du fonctionnement réel de celui-ci. En plus du fait que la synthèse des lois de commande repose entièrement sur ces modèles.

Négliger cette étape peut remettre en cause toute la suite du processus de commande, et risque même de déstabiliser voire de détruire le système physique.



**Fig. II.15.** Structure du banc d'essai en boucle ouverte

Dans le cadre de ce travail, nous n'avons hélas pas eu la possibilité de procéder à la validation sur un système réel identique au notre, c'est pour cela que nous avons préféré fixer les paramètres de simulation à des valeurs réelles expérimentales trouvées dans des ouvrages et publications scientifiques. Cependant, nous pouvons proposer une méthode assez utilisée actuellement pour procéder à cette étape. Il s'agit de réaliser un banc d'essai (Fig. II.15), qui émule le fonctionnement réel de l'éolienne.

Ce banc d'essai est une étape intermédiaire entre la simulation sur PC et le passage au système réel. Sa réalisation est peu coûteuse et moins compliquée comparée à celle d'une vraie éolienne. Néanmoins, ce banc permet de traduire, de façon qui se rapproche assez de la réalité, le comportement du système réel, en mettant en évidence certaines contraintes qui ne paraissent peut-être pas lors de la simulation. Il contient un moteur émulant la puissance et le couple mécanique transmis par le rotor de l'éolienne et joue le rôle de la partie aérodynamique de l'éolienne. Les entrées injectées au moteur sont données par un processeur numérique. Ces entrées sont des consignes de couple et de vitesse pour le moteur, elles sont déterminées pour être équivalentes aux grandeurs de la partie aérodynamique du système, et tenant compte du vent, du rotor et du multiplicateur de vitesse. La puissance mécanique générée par le moteur sera ensuite transmise à une génératrice, qui correspond à la génératrice même de l'éolienne. Ce moteur devra avoir une puissance qui tient compte de la puissance nécessaire pour entraîner la charge, à savoir la génératrice. Il devra être muni d'un régulateur de vitesse et de couple en plus des éléments de protection.

A la place de ce genre de banc d'essai, nous avons préféré réaliser, un prototype. Il s'agit d'une version « miniature » de l'éolienne sujet de notre étude.

## II.4. Réalisation d'un prototype

Pour l'illustration, un prototype a été mis en place, principalement, afin de mettre en évidence le rôle de la tuyère dans le système global. Ce prototype pouvant également servir de moyen de validation pour les modèles des sous-systèmes, il développe une puissance d'environ 200 W pour une vitesse de vent de 5 m/s.

Les composantes de ce prototype sont les mêmes que celles de l'éolienne sujet de notre étude exceptée la partie pilote de la génératrice, servant à relier le système global au réseau électrique, ce qui ne constitue pas notre objectif dans le cadre de cette réalisation.

Les composantes du prototype présentent, donc, les mêmes caractéristiques géométriques que celles du système réel, mais en dimensions réduites. La tuyère quant à elle a été surdimensionnée afin de mieux la mettre en évidence.

### ROTOR

Le rotor de Savonius a été fabriqué à partir de plaques métalliques tordues sous forme de demi cylindres de hauteur 0.1 m. Ces demi cylindres sont disposés comme indiqué dans la figure (Fig. II.3) avec le rapport de distances  $\frac{e}{d} = \frac{1}{6}$ .

Ces demi cylindres ont été assemblés et soudés sur des plaques métalliques sous forme de disques de diamètre 0.3 m, ce qui constitue un étage. Un étage similaire a été disposé sur le premier avec un angle de décalage de  $\frac{\pi}{2}$ , pour éviter les couples de démarrage négatifs (fig. II.16).

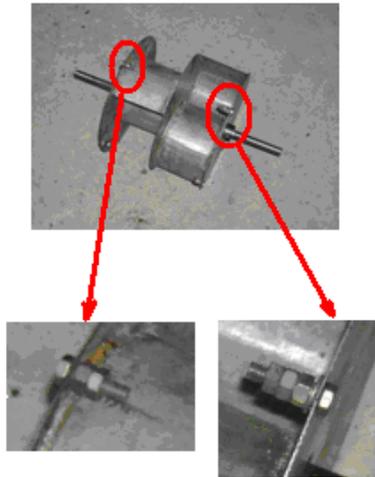


**Fig. II.16.** Rotor du prototype

Le rotor résultant présente, alors, les paramètres géométriques  $H = 0.2m$  pour la hauteur et  $D = 0.3m$  pour le diamètre.

Deux arbres d'extension ont été soudés au rotor de Savonius, l'un en haut et l'autre en bas. Ces extensions d'arbre permettent, d'une part, d'assembler le rotor à la structure fixe, et d'autre part, de le relier à la boîte à vitesse.

Des essais en Boucle Ouverte sur le rotor ont été effectués, dans le but principal de procéder à son équilibrage, moyennant l'ajout de petites masses sur son périmètre (Fig. II.17).



**Fig. II.17.** *Equilibrage du rotor*

Ce rotor a été monté sur une structure fixe moyennant deux roulements à billes, l'un en haut et l'autre en bas. Chacun des roulements a été monté par pression sur une plaque métallique rectangulaire d'épaisseur  $0.01 m$  (Fig. II.18). Chacune de ces plaques a été percée pour pouvoir la fixer à la structure.



**Fig. II.18.** *Les roulements à billes montés sur les plaques rectangulaires*

Afin d'éviter les jeux mécaniques, et lors de la fixation des plaques contenant les roulements, quelques points de soudure ont été faits, puis enlevés après la fixation.

### TUYERE

La tuyère de notre prototype (Fig. II.19) a été réalisée à partir de tôles découpées selon les figures de l'annexe 2. Cette Tuyère a été expressément surdimensionnée afin de la mettre en évidence.

Les dimensions des tôles sont telles que les surfaces extérieure vaut 1m x 1m et intérieure égale à 0.3m x 0.2m. Ces tôles ont été fixées à la structure grâce à des boulons.

La tuyère telle que nous l'avons réalisée est figée, elle ne servira par conséquent qu'à accélérer le vent avec un rapport constant.

Les contraintes mécaniques telles que la force appliquée par le vent sur la structure et les vibrations n'ont pas été calculées et ne sont pas prises en compte dans le cadre de notre étude.



**Fig. II.19.** Réalisation de la tuyère

## GENERATRICE

La génératrice du prototype est une machine à courant continu récupérée d'un autre système. Elle présente une très grande vitesse de rotation (5000 tr/min), ce qui a nécessité l'ajout d'un réducteur de vitesse.

## BOITE À VITESSE

La boîte à vitesse vue la nécessité d'un rapport de réduction important a été réalisé en trois étages, en limitant au mieux les frottements, en termes de précision d'usinage et de graissage des engrenages. Ces derniers ont été disposés dans une boîte étanche évitant ainsi tout risque d'usure dû à la poussière et / ou à l'humidité. Cette boîte à vitesse présente le rapport de réduction  $k = 36$ .

## Conclusion

Cette partie nous a permis de définir et préciser les différents sous-systèmes qui composent l'éolienne, sujet de notre étude, à savoir la partie aérodynamique, la partie transfert mécanique et la partie génératrice et son système de pilotage.

Nous avons également pu développer les différents modèles mathématiques régissant le fonctionnement de chaque sous-système, ces modèles découlent de l'application des lois de la physique, sous certaines hypothèses simplificatrices justifiées. Les modèles obtenus ayant été validés moyennant des résultats expérimentaux trouvés dans la bibliographie. Néanmoins, une méthode de validation plus appropriée, à savoir l'utilisation d'un banc d'essai expérimental, a été évoquée, et son principe a été exposé durant cette partie.

Aussi, un prototype a été réalisé, afin de mettre en évidence le rôle de la tuyère. Ce prototype étant une étape nécessaire avant toute réalisation, il pourra servir également de moyen de validation des modèles.

Enfin, les modèles obtenus dans cette partie seront, par la suite, utilisés dans le but de synthétiser les lois de commande de l'éolienne.

---

# PARTIE III

---

## Simulations, commande et résultats

<b>Introduction .....</b>	<b>46</b>
<b>III.1.Objectifs de commande .....</b>	<b>46</b>
<b>III.2.Génération des entrées .....</b>	<b>47</b>
<b>III.3.Méthodes de commande utilisées .....</b>	<b>48</b>
III.3.1. Commande dans la zone2 .....	49
III.3.2. Commande dans la zone3 .....	51
<b>III.4.Simulations et analyse des résultats .....</b>	<b>53</b>
<b>Conclusion .....</b>	<b>63</b>

## Introduction

Dans cette dernière partie de notre travail, nous allons en premier lieu définir nos objectifs de commande. Selon les objectifs que nous aurons définis, nous utiliserons les modèles développés dans la partie II, afin de synthétiser les lois de commande pour notre éolienne. Nous allons, enfin, procéder à la simulation du système bouclé, et analyser les résultats obtenus.

De façon générale, le but du système de commande principal pour une éolienne est de réguler la puissance et la vitesse de la turbine lorsque la génératrice est à vitesse variable, et la puissance uniquement pour les génératrices à vitesse fixe. [4]

Commençons, tout d'abord par formuler nos objectifs de commande.

### III.1.Objectifs de commande

Les variables à commander sont définies par les objectifs de commande que l'on se pose. Dans le cadre de ce travail, les objectifs sont présentés selon les différentes zones de fonctionnement de l'éolienne. On se donne quatre zones pour l'aérogénérateur

#### Zone1.

Dans cette zone, la vitesse du vent étant très faible et insuffisante pour faire fonctionner l'aérogénérateur, et par conséquent insuffisante pour générer une quelconque énergie électrique, l'éolienne est hors service, et aucune commande n'est alors appliquée à cette dernière. L'approvisionnement en énergie électrique peut se faire à travers des sources annexes (photovoltaïque ou thermique, par exemple), et on parlera alors d'installations hybrides. Cette zone étant très mince (Le rotor de Savonius démarre à des vitesses de vent assez faibles), on s'étalera d'avantages sur les zones de fonctionnement 2 et 3 où l'éolienne est opérationnelle.

#### Zone2.

Dans cette zone de fonctionnement, la vitesse de vent est suffisante (environ 4m/s) pour faire fonctionner l'éolienne, en générant des puissances considérables. L'aérogénérateur fonctionne à charge partielle. Nos objectifs de commande dans cette zone concernent l'optimisation de la production en énergie.

#### Zone3.

La vitesse de vent est assez importante dans cette zone. Et les courants, tensions et vitesses angulaire risquent de dépasser leurs valeurs nominales. Les objectifs de commande dans cette zone sont plutôt orientés vers la sécurité du système. Il s'agit de maintenir les

variables à des valeurs constantes avoisinant les grandeurs nominales des sous-systèmes de l'éolienne.

#### Zone4.

Dans cette zone, les vitesses de vent sont très importantes (plus de 25 m/s), et risquent d'endommager l'éolienne. Cette dernière devra être protégée et sera mise hors fonctionnement.

### **III.2. Génération des entrées [4]**

Le vent est caractérisé par sa vitesse et sa direction qu'on peut déterminer grâce à différents appareils, notamment les anémomètres. Ces deux caractéristiques présentent toutes les deux un aspect aléatoire, mais dont on peut néanmoins effectuer des études statistiques afin d'en établir les prévisions et les fréquences.

Beaufort a établi, par exemple, une échelle qui divise les vents en fonction de leurs vitesses en 17 catégories, allant du vent calme et de la très légère brise (0 à 1 m/s) aux ouragans et cyclones (35 à 60m/s). [1]

Il a été vu également que le vent variait de façon cyclique, avec l'altitude par rapport au sol et selon la forme du relief.

Les études statistiques du vent sont très importantes. Elles fournissent, en effet, des informations nécessaires aux simulations et au dimensionnement des différents équipements notamment du point de vue résistance des matériaux.

Pour la simulation, il est important de préciser les séquences de vitesses de vent utilisées comme entrées injectées au système global. Deux approches peuvent être utilisées. Dans la première, on injecte une séquence de mesures réelles. L'avantage de cette méthode est de tester les performances réelles du système avec des données de terrain. L'inconvénient réside dans le fait que la simulation ne se fait que pour des séquences déjà mesurées, ne prenant pas en compte d'autres séquences ayant d'autres caractéristiques.

Une deuxième méthode plus flexible consiste à générer des vitesses de vent ( $V_w(t)$  en  $m/sec$ ) à partir d'un modèle qui prendra en compte différentes caractéristiques pouvant être choisies et modifiées par l'utilisateur, en agissant sur les paramètres du modèle.

Ce modèle comporte quatre parties qui sont : la valeur moyenne ( $V_{wa}$  en  $m/sec$ ), une composante sous forme de rampe ( $V_{wr}(t)$  en  $m/sec$ ) - traduisant une augmentation de la

vitesse du vent pendant un intervalle de temps donné -, une composante rafale ( $V_{wg}(t)$  en  $m/sec$ ) et une composante perturbation ( $V_{wr}(t)$  en  $m/sec$ ). Ce qui nous mène à écrire l'équation

$$V_w(t) = V_{wa} + V_{wr}(t) + V_{wg}(t) + V_{wr}(t) \quad (III.1)$$

Nous utiliserons donc cette deuxième méthode pour générer les séquences de vitesse de vent, puisque celle-ci englobe tout les cas de figures rencontrés dans la nature, et nous permet d'avoir une idée plus générale concernant le comportement dynamique de notre système.

### III.3.Méthodes de commande utilisées [4], [21]

Rappelons, tout d'abord, les principales relations (II.4), (II.5) et (II.9) développées dans la partie II de notre travail, puisqu'il s'agit du modèle mathématique de notre système, et écrivons-les sous forme d'équations d'état

$$\begin{cases} \square x_1 = -\frac{R_s}{L_{sd}} x_1 + \frac{L_{sq}}{L_{sd}} x_2 x_3 + \frac{1}{L_{sd}} u_1 \\ \square x_2 = -\frac{R_s}{L_{sq}} x_2 + \frac{L_{sd}}{L_{sq}} x_1 x_3 - \frac{\Psi_{md}}{L_{sq}} x_3 + \frac{1}{L_{sq}} u_2 \\ \square x_3 = -\frac{B_m}{J} x_3 + \frac{1}{J} \tau_{wr}(x_3) - \frac{1}{J} \tau_{el}(x_2) \end{cases} \quad (III.2)$$

$$\text{Tels que } (x_1 \ x_2 \ x_3 \ u_1 \ u_2)^T = (i_d \ i_q \ \omega \ v_d \ v_q)^T \text{ et } \tau_{el} = 3\Psi_m x_2.$$

Etant donné que l'on soit en présence d'un problème de poursuite – de puissance optimale dans la zone 2, et de valeurs nominale et maximale dans la zone 3 -, on se propose de réécrire les équations sous forme d'erreurs de poursuite

$$\begin{cases} \square e_1 = -\frac{R_s}{L_{sd}} e_1 - \frac{R_s}{L_{sd}} x_1^* - x_1 + \frac{L_{sq}}{L_{sd}} x_2 x_3 + \frac{1}{L_{sd}} u_1 \\ \square e_2 = -\frac{R_s}{L_{sq}} e_2 - \frac{R_s}{L_{sq}} x_2^* - x_2 + \frac{L_{sd}}{L_{sq}} x_1 x_3 - \frac{\Psi_{md}}{L_{sq}} x_3 + \frac{1}{L_{sq}} u_2 \\ \square e_3 = -\frac{B_m}{J} e_3 - \frac{B_m}{J} x_3^* - x_3 + \frac{1}{J} \tau_{wr}(x_3) - \frac{1}{J} \tau_{el}(x_2) \end{cases} \quad (III.3)$$

Telles que  $e_i = x_i - x_i^*$ ,  $i = 1, 2, 3$

Reste à définir une stratégie de commande proprement dite pour le convertisseur de puissance. Il en existe plusieurs, mais les plus adoptées, de nos jours, sont

- Commande à couple maximal : Puisque le couple ne dépend que de la composante  $q$  du courant, si le courant du stator est commandé de sorte à

n'avoir que la composante  $i_q$ , alors le couple électromagnétique sera maximum. L'inconvénient réside dans la puissance réactive non nulle.

- Commande à facteur de puissance unitaire : Afin d'obtenir un fonctionnement à facteur de puissance unitaire, on utilise la composante  $d$  du courant pour compenser la puissance réactive. L'inconvénient de cette méthode est le fait que la tension du stator n'est pas commandée directement, elle varie avec la vitesse, ce qui implique un risque de surtension en cas de grandes vitesses.
- Commande à tension de stator constante : Afin d'éviter les risques de surtensions dues aux grandes vitesses, on préférera commander la tension du stator au lieu de la puissance réactive. L'inconvénient de cette méthode est, comme nous venons de le souligner, la puissance réactive non nulle.

Nous optons, dans le cadre de notre travail, pour la commande à couple maximal, vu sa simplicité d'implémentation, et l'absence de risque de surtension, en dépit de la puissance réactive générée. La référence pour la composante  $d$  du courant, pour ce type de commande est la valeur nulle  $i_d^* = 0$ .

Le schéma global de commande de notre éolienne est représenté dans la figure (III.3).

### III.3.1. Commande dans la zone2

Rappelons que nos objectifs de commande dans cette zone concernent l'optimisation de la production en énergie.

Etant donné le fait que les équations de la machine soient exprimées dans le repère  $d-q$ . Les deux axes étant perpendiculaires, les variables  $x_1$  et  $x_2$  sont, par conséquent, indépendantes. On peut donc les commander indépendamment l'une de l'autre.

Afin d'extraire la puissance optimale, on tire la consigne  $x_3^* = k \frac{V_w}{R}$  de la relation  $\lambda = 1$ , et nous appliquons la commande par Backsteeping. Nous procédons, donc, par étapes

Etape 1.

On définit  $V_3$ , la fonction candidate de Liapunov

$$V_3 = \frac{1}{2} e_3^2$$

Sa dérivée  $\dot{V}_3 = e_3 \dot{e}_3$  devra être négative ou nulle pour annuler l'erreur de poursuite.

$$\dot{V}_3 = -\frac{B_m}{J} e_3^2 + \left( -\frac{B_m}{J} x_3^* - x_3 + \frac{1}{J} \tau_{wr}(x_3) - \frac{1}{J} \tau_{el}(x_2) \right) e_3$$

Il suffit, pour cela, de prendre la consigne  $\tau_{el}^*(x_2) = -B_m x_3^* - J x_3 + \tau_{wr}(x_3) + K_3 e_3$  pour le couple électromagnétique, ou encore  $x_2^* = \frac{\tau_{el}(x_2)}{3\Psi_m}$  pour la composante  $iq$  du courant, avec  $K_3$  une constante négative permettant d'ajuster la dynamique désirée.

Etape 2.

On définit  $V_2$  la deuxième fonction candidate de Liapunov, qui englobe aussi bien le terme de l'erreur  $e_2$ , que celui de l'erreur  $e_3$ , et ce afin d'assurer la convergence des deux erreurs de poursuite vers 0.

$$V_2 = \frac{1}{2} e_2^2 + \frac{1}{2} e_3^2$$

Sa dérivée  $\dot{V}_2 = e_2 \dot{e}_2 + e_3 \dot{e}_3$  devra également être négative ou nulle.

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= -\frac{B_m}{J} e_3^2 + \left( -\frac{B_m}{J} x_3^* - x_3 + \frac{1}{J} \tau_{wr}(x_3) - \frac{1}{J} \tau_{el}(x_2) \right) e_3 \\ &\quad - \frac{R_s}{L_{sq}} e_2^2 + \left( -\frac{R_s}{L_{sq}} x_2^* - x_2 + \frac{L_{sd}}{L_{sq}} x_1 x_3 - \frac{\Psi_{md}}{L_{sq}} x_3 + \frac{1}{L_{sq}} u_2 \right) e_2 \\ &= -\frac{B_m}{J} e_3^2 + \left( -\frac{B_m}{J} x_3^* - x_3 + \frac{1}{J} \tau_{wr}(x_3) - \frac{1}{J} \tau_{el}(x_2) + K_3 e_3 - K_3 e_3 \right) e_3 \\ &\quad - \frac{R_s}{L_{sq}} e_2^2 + \left( -\frac{R_s}{L_{sq}} x_2^* - x_2 + \frac{L_{sd}}{L_{sq}} x_1 x_3 - \frac{\Psi_{md}}{L_{sq}} x_3 + \frac{1}{L_{sq}} u_2 \right) e_2 \end{aligned}$$

Il suffit de prendre la commande

$$u_2 = R_s x_2^* + L_{sq} x_2 - L_{sd} x_1 x_3 + \Psi_{md} x_3 + K_2 e_2 \quad \text{avec } K_2 \text{ une constante négative qui ajuste}$$

la dynamique voulue.

La variable  $x_1$  quant à elle, sera asservie à 0, puisqu'il s'agit de la commande à couple maximum.

De la première équation, du système d'équations (III.3), l'on tire

$$u_1 = R_s e_1 + R_s x_1^* + L_{sd} \dot{x}_1 - L_{sq} x_2 x_3 + K_1 e_1 \quad \text{avec } K_1 \text{ une constante négative servant à} \\ = R_s x_1 - L_{sq} x_2 x_3 + K_1 x_1$$

ajuster la dynamique souhaitée.

Le schéma de commande de la vitesse de rotation, que nous nous proposons de d'implémenter pour la zone2, est représenté dans la figure (Fig. III.1).

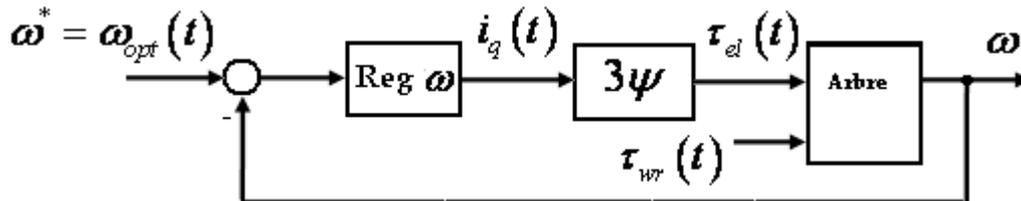


Fig. III.1. Schéma de base pour la régulation de la vitesse angulaire dans la zone2

Le rapport de surface de la tuyère dans cette zone de commande sera maintenu constant à sa valeur maximale  $w = w_{\max}$ .

### III.3.2. Commande dans la zone3

Dans cette zone, il s'agit de continuer à extraire de la puissance tout en assurant la sécurité de notre système. La puissance extraite n'est plus optimale.

Le régulateur de la tuyère n'est actif que durant les situations où les vitesses de vent sont très importantes. On se trouve ici dans la zone3. La vitesse du rotor ne peut plus être contrôlée en augmentant la puissance générée, car cela engendrerait une surcharge de la génératrice et/ou du convertisseur. Sans oublier que de grandes vitesses pourraient causer des dommages mécaniques à l'éolienne. La vitesse du rotor doit par conséquent être maintenue à une valeur limite supérieure. C'est pour cela qu'on introduit une autre variable sur laquelle on

pourrait agir, à savoir le rapport de sections de la tuyère  $w = \frac{A_e}{A_s}$ . Ce rapport  $w$  ayant été

maintenu constant à sa valeur maximale  $w = w_{\max}$ , lors du fonctionnement dans la zone2, comme précisé précédemment. Lorsqu'on entame la zone 3, cette valeur diminue au fur et à mesure que la vitesse de vent augmente. Aussi, l'actionneur étant une électrovanne (ou une motorisation), une limitation de la pression d'air (ou de la position angulaire) s'impose.

Un simple régulateur proportionnel pourrait suffire pour répondre à cette tâche, puisqu'il s'agit d'un simple ajustement de rapport de surface. Néanmoins, le système ne pouvant avoir un régime permanent - puisque la vitesse de vent varie sans arrêt - on

préférait alors utiliser une commande linéarisante par retour d'état, afin d'éliminer l'erreur de poursuite.

Le couple électromagnétique sera fixé à sa valeur constante nominale  $\tau_{el}^* = \tau_{NOM}$  (ou  $i_q^* = i_{nom}$ ). Et la vitesse de rotation, quant à elle, sera maintenue constante à sa valeur maximale  $x_3^* = \omega_{MAX}$ , dans cette zone de fonctionnement.

La commande  $u_1$  servira à asservir la composante  $i_d$  à la valeur 0. La commande  $u_2$  sera utilisée dans le but de fixer la composante  $i_q$  à la valeur nominale du courant, ce qui correspond à la valeur nominale du couple. Quant à la variable  $w$  (rapport de surfaces de la tuyère), celle-ci sera mise en œuvre afin de réguler la vitesse angulaire à sa valeur maximale.

Les relations que l'on utilisera pour développer les lois de commande sont les mêmes que dans (III.3), exceptées les consignes qui diffèrent d'une zone à l'autre, comme précisé précédemment.

De la troisième équation dans (III.3), associée à (II.1), (II.2) et (II.14), on tire la commande  $w$  qui ajuste  $x_3$  à sa valeur maximale

$$w = \left[ \frac{2}{\rho C_p A_{wr} V_w^3} \left( B_m x_3^* + J \overset{\square}{x}_3^* + \tau_{el}(x_2) + K_3' e_3 \right) \right]^{(1/3)} \text{ avec } K_3' \text{ une constante négative}$$

servant à ajuster la dynamique désirée.

Dans la deuxième équation de (III.3), on ajuste  $x_2$  à sa valeur nominale grâce à  $u_2$

$$u_2 = R_s x_2^* + L_{sq} \overset{\square}{x}_2^* - L_{sd} x_1 x_3 + \Psi_{md} x_3 + K_2' e_2 \text{ avec } K_2' \text{ une constante négative servant à}$$

ajuster la dynamique souhaitée.

On veillera à ce que la dynamique de  $x_2$  soit plus rapide que celle de  $x_3$ . Ce qui est généralement vérifié, puisque  $x_2$  et  $x_3$  se réfèrent à la dynamique de la partie électrique, et celle de la partie mécanique respectivement.

Enfin, dans la première équation du système (III.3), on ajuste  $x_1$  à la valeur nulle, comme pour la zone 2, grâce à la commande  $u_1$ .

$u_1 = -L_{sq} x_2 x_3 + K_1' x_1$  avec  $K_1'$  une constante négative servant à ajuster la dynamique souhaitée.

Le schéma de commande correspondant à cette zone est donné par la figure (Fig. III.2).

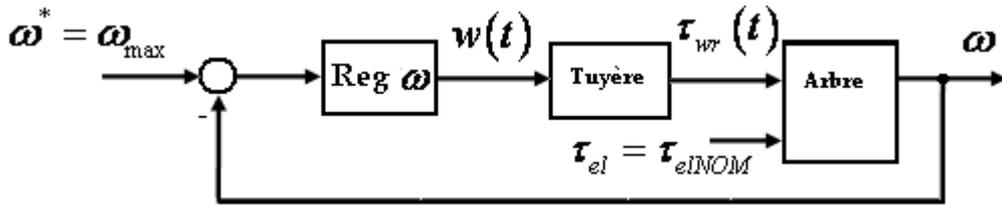


Fig. III.2. Schéma de base pour la régulation de la vitesse angulaire dans la zone 3

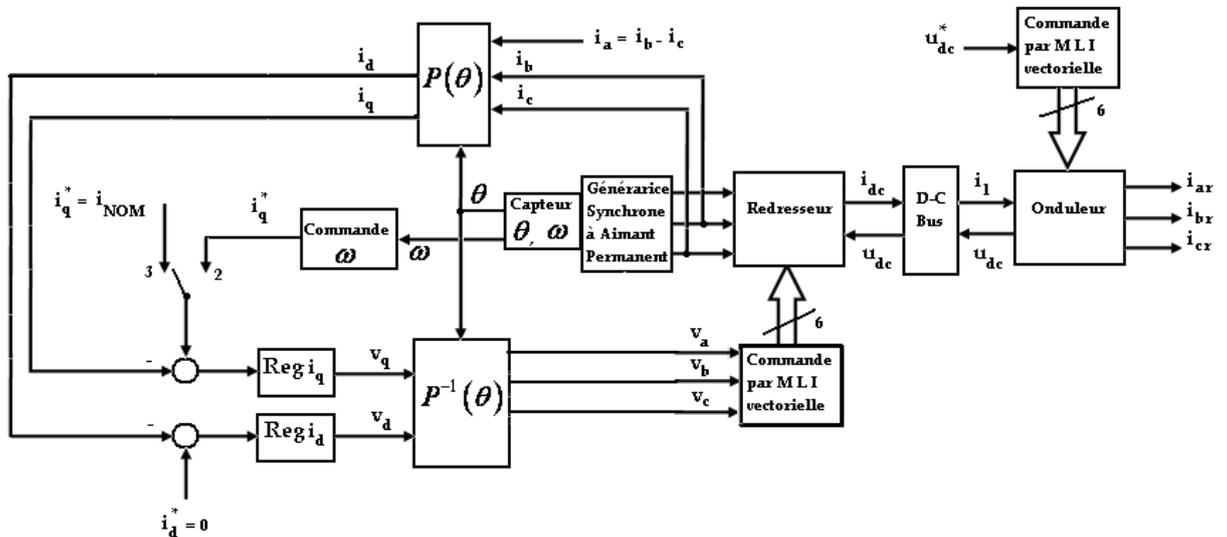
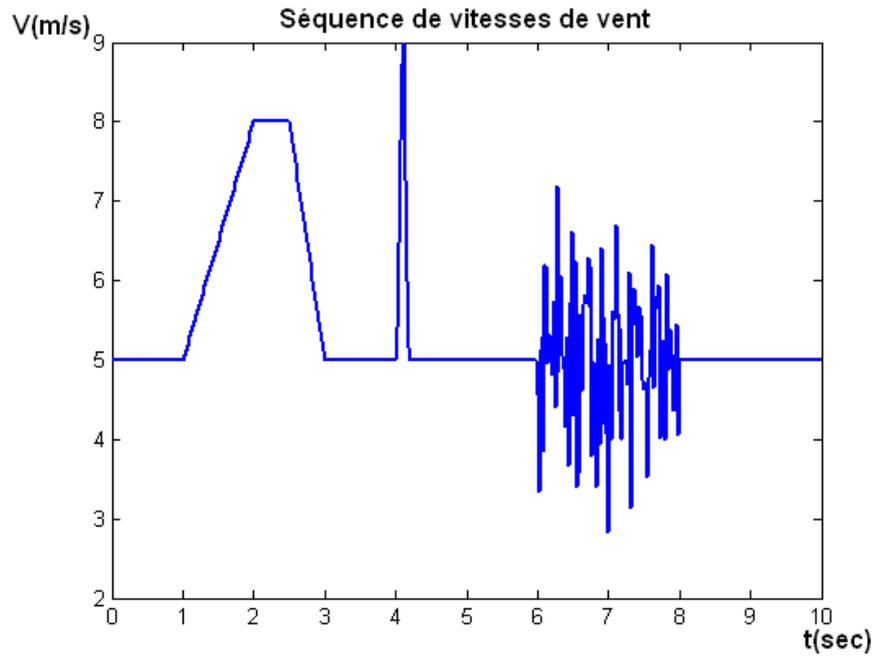


Fig. III.3. Schéma de principe de la commande de notre éolienne

Le schéma global de la commande de notre éolienne est, donc, représenté dans la figure (Fig. III.3). Ce schéma de principe est valable pour les deux zones de fonctionnement 2 et 3. La consigne pour  $i_q$  diffère d'une zone à l'autre, ainsi que la commande de la vitesse angulaire, comme nous venons de le voir.

### III.4. Simulations et analyse des résultats

La séquence de vitesses de vent, que nous utilisons comme entrée injectée au système, est générée en utilisant la relation (III.1), elle est représentée dans la figure (Fig. III.4), en ce qui concerne la zone 2.



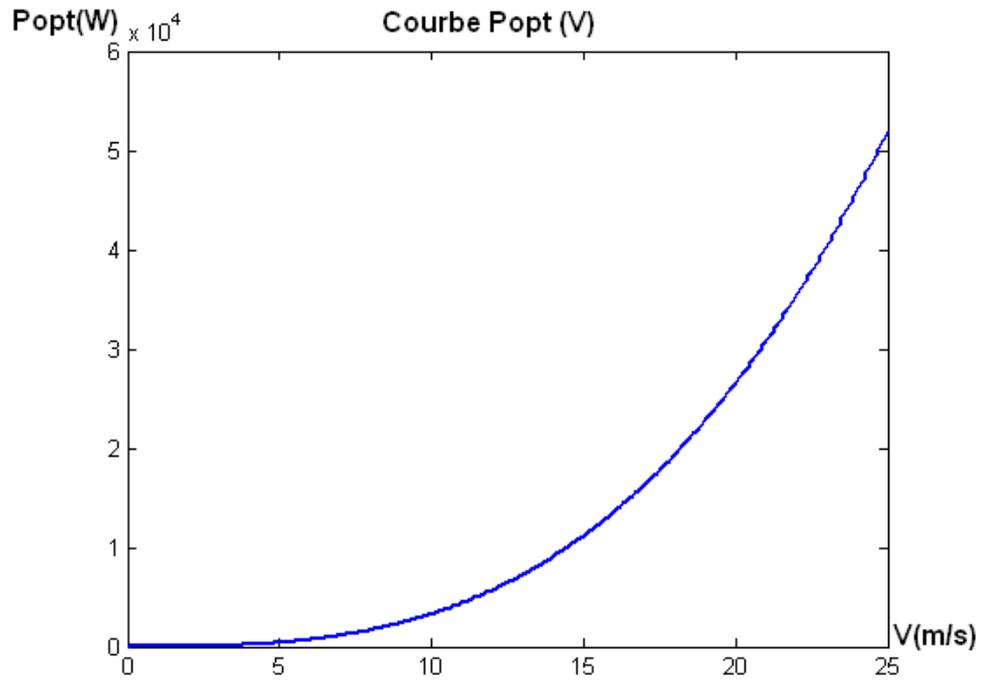
**Fig. III.4.** Vitesses de vent qui attaquent le système global, lors du fonctionnement dans la zone2

Cette séquence, comme nous pouvons le voir, comporte une partie rampe, un élément rafale, une composante perturbation, en plus d'une valeur constante qui est la composante moyenne de la vitesse.

Nous nous proposons de tracer la courbe de puissance mécanique optimale extraite (Fig. III.5). Celle-ci correspond à une vitesse spécifique  $\lambda = 1$  et un coefficient de puissance  $C_p = 0.3$ .

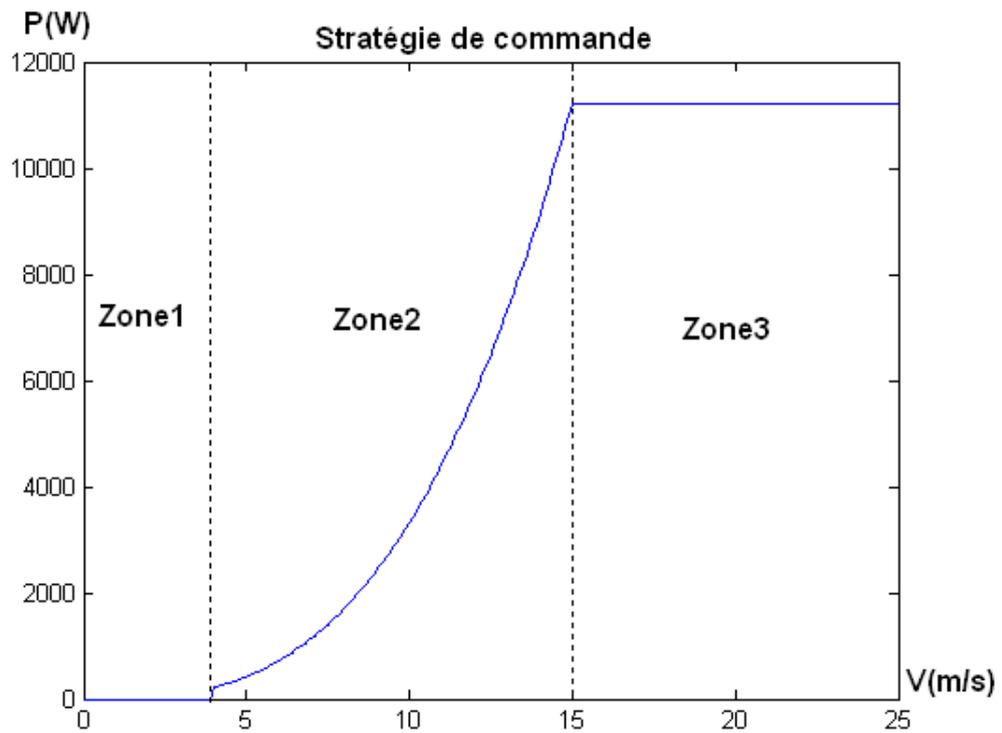
Nous prenons pour la simulation une gamme de vitesses allant de 4 à 25 m/s, selon les chiffres indicatifs de référence [40]

4,5m/s → 16,2Km/h	Assure l'amorçage de l'éolienne.
7m/s → 25,2Km/h	Une vitesse moyenne annuelle convenable.
25m/s → 90Km/h	Le vent est trop fort l'éolienne s'arrête.



**Fig. III.5.** Courbe de puissance optimale fonction de la vitesse de vent

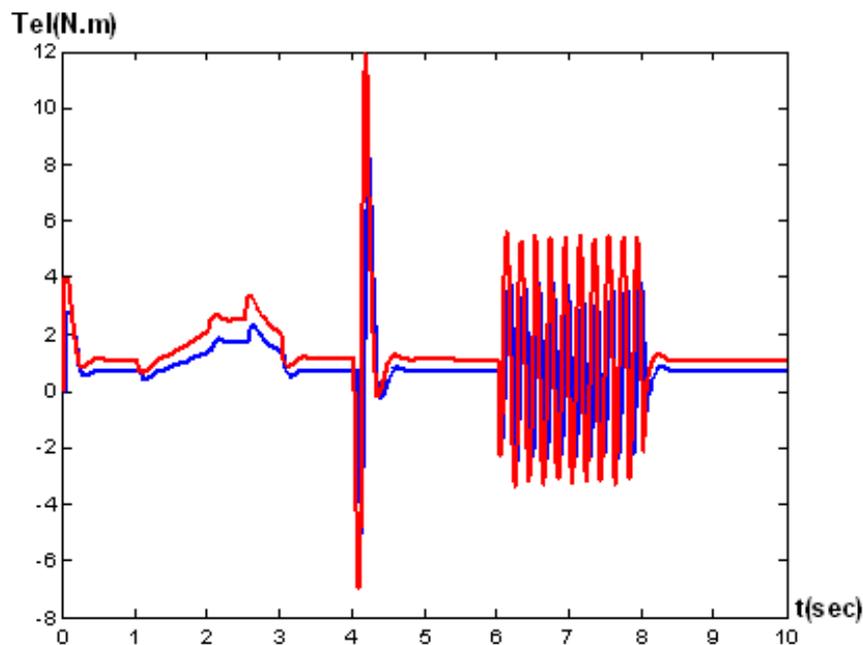
Nous présentons dans la figure (Fig. III.6) la stratégie de commande selon les objectifs de commande que nous avons exposés au début de cette partie.



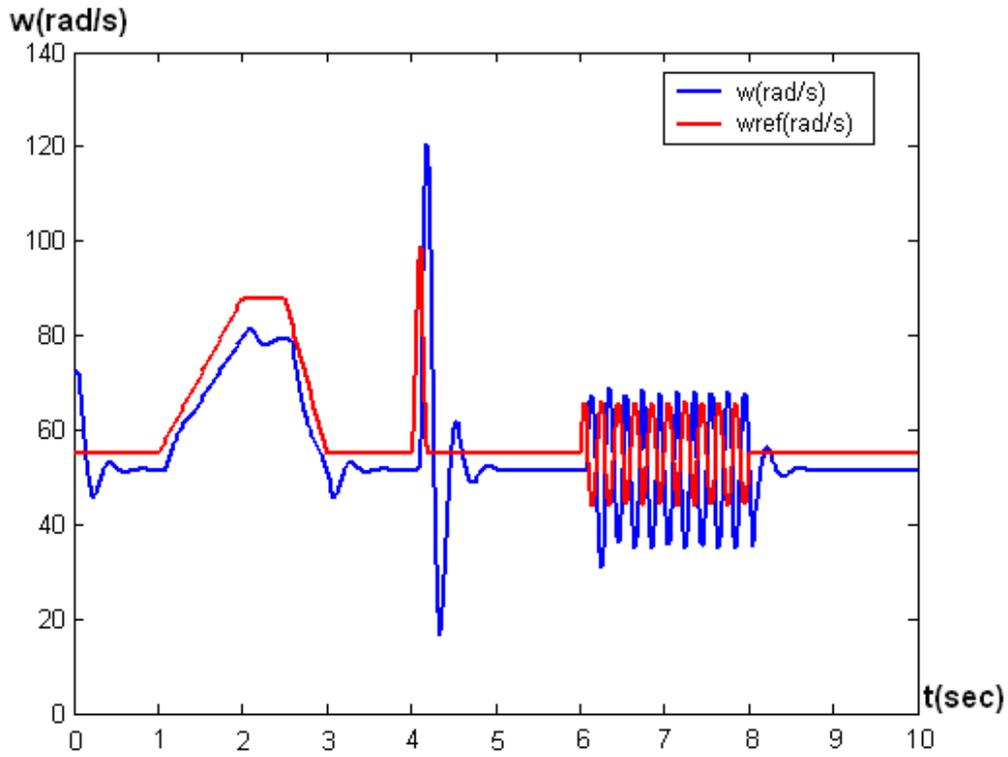
**Fig. III.6.** Stratégie de commande pour notre éolienne

En utilisant la relation  $\lambda = \frac{\omega_{wr} R}{V}$ , liant la vitesse spécifique  $\lambda$  à la vitesse de rotation de la turbine  $\omega_{wr}$  et à la vitesse du vent  $V$ , les calculs nous permettent d'extraire les vitesses angulaires minimale et maximale de la turbine. Ces deux dernières valent, respectivement,  $\omega_{wr\min} = 12\pi \text{ m/s}$  et  $\omega_{wr\max} = 120\pi \text{ m/s}$ . L'on déduit les vitesses angulaires minimale et maximale du rotor via la relation  $\omega = k\omega_{wr}$ , tirée de la représentation des deux masses en mouvement (voir paragraphe II.3.2).

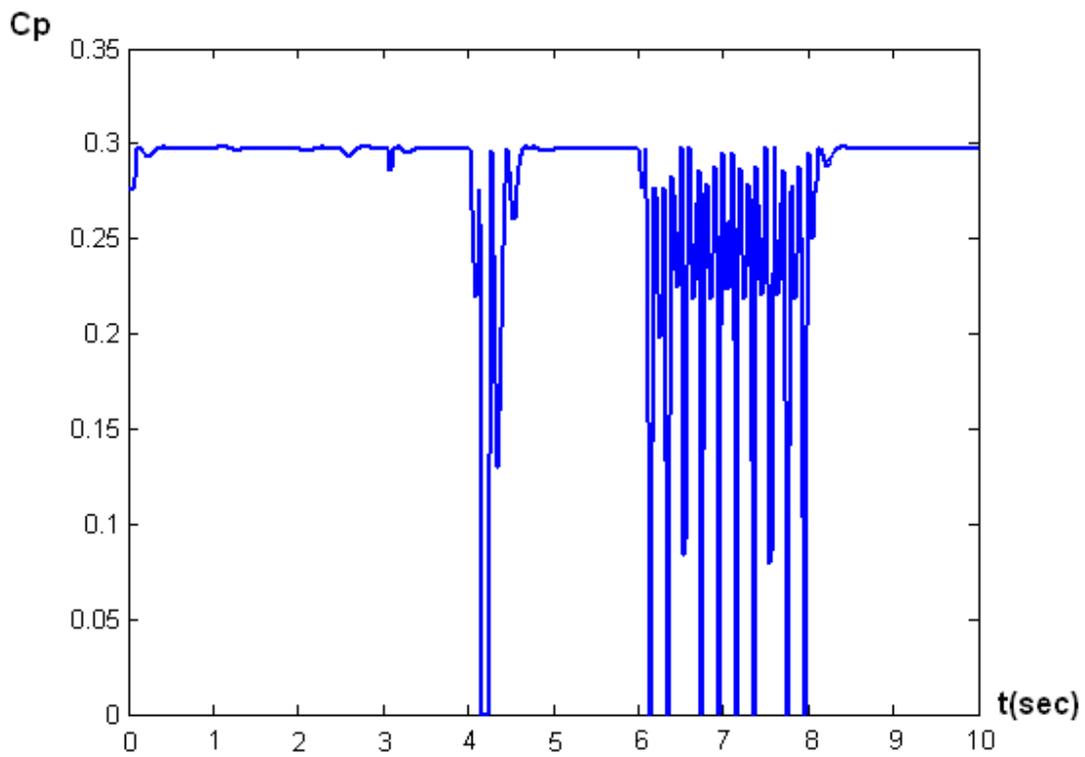
Après simulation, nous obtenons les résultats suivants, pour ce qui est de l'évolution du couple électromagnétique, de la vitesse angulaire et du coefficient de puissance, dans la zone2.



**Fig. III.7.** *Couples électromagnétiques mesuré et de référence, lors d'un fonctionnement dans la zone2*

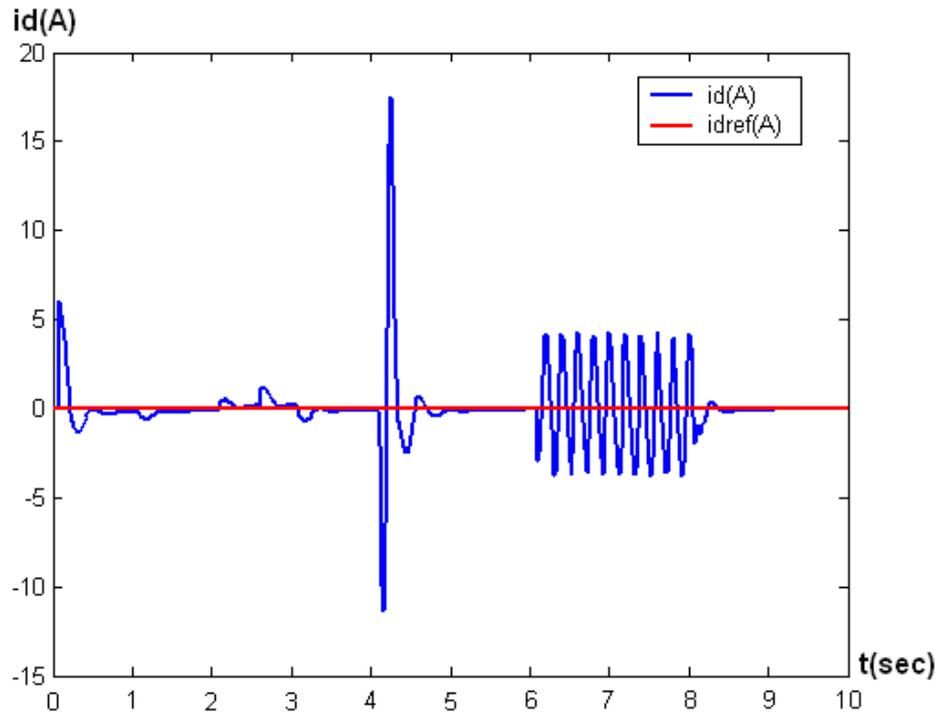


**Fig. III.8.** Vitesses angulaires mesurée et de référence, lors d'un fonctionnement dans la zone2

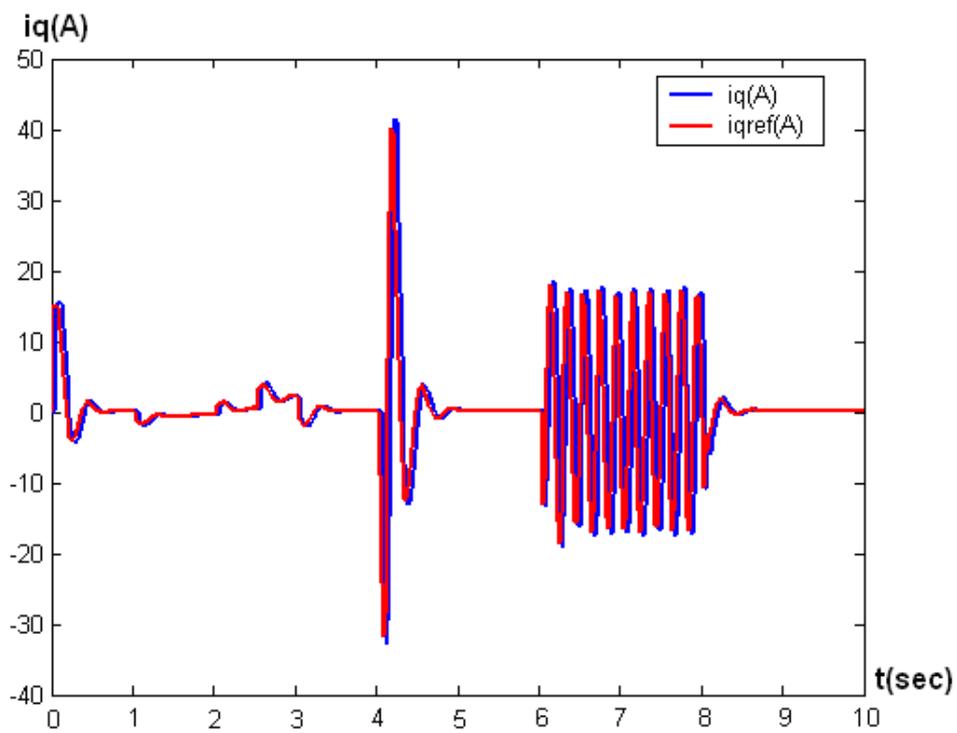


**Fig. III.9.** Evolution du coefficient de puissance, lors d'un fonctionnement dans la zone2

Les composantes  $i_d$  et  $i_q$  du courant sont données dans les figures (Fig. III.9) et (Fig. III.10).



**Fig. III.10.** Composante  $i_d$  du courant de ligne, lors d'un fonctionnement dans la zone2



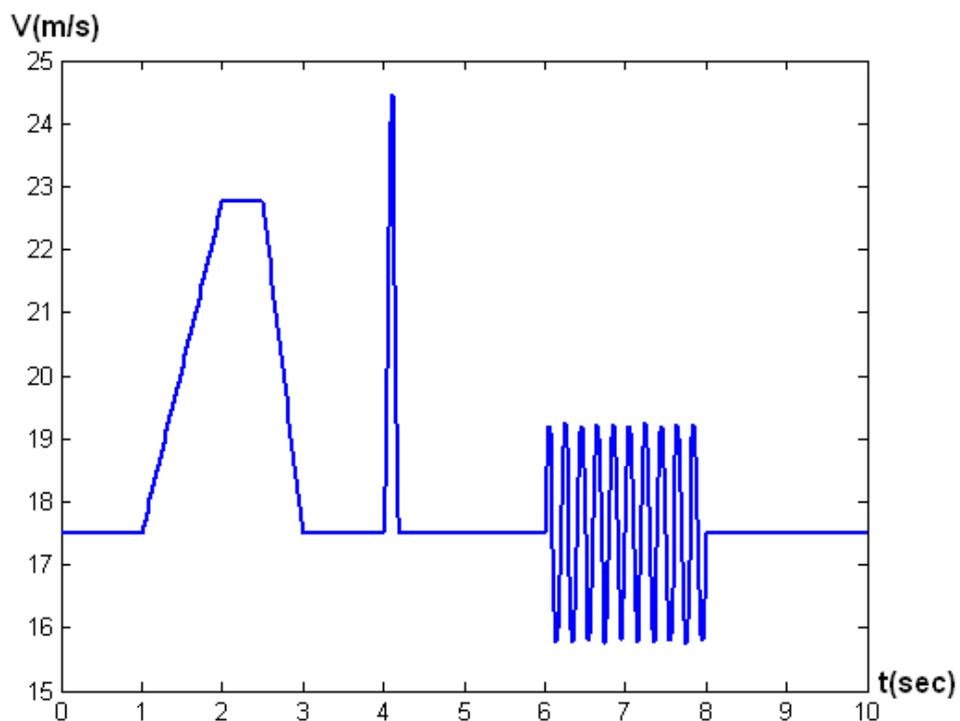
**Fig. III.11.** Composante  $i_q$  du courant de ligne, lors d'un fonctionnement dans la zone2

Nous voyons que le couple électromagnétique suit bien la consigne. Rappelons que ce couple représente en fait une commande pour la vitesse angulaire dans la zone2, celui-ci sera commandé grâce à la composante de tension  $v_q$ . La vitesse angulaire quant à elle présente quelques erreurs de poursuite sans doute dues à la fréquence de variation assez élevée de la vitesse du vent, et à la lenteur de la réponse du système mécanique.

Nous remarquons que le coefficient de puissance avoisine sa valeur optimale, sauf dans les zones où la vitesse de vent varie avec une fréquence importante, ceci est dû à l'erreur de poursuite de la vitesse angulaire, qui ne permet pas d'avoir la valeur unité pour la vitesse spécifique.

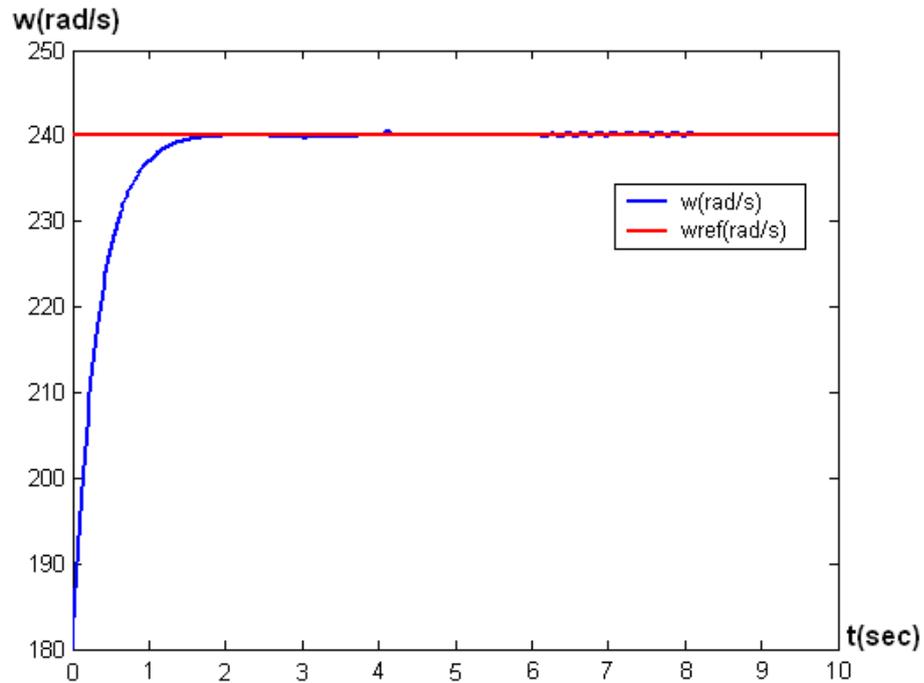
Pour ce qui est des composantes  $i_d$  et  $i_q$  du courant de ligne, celles-ci suivent leurs références, excepté la composante  $i_d$ , qui présente quelques ondulations durant les variations à grande fréquence de la vitesse du vent. Ces ondulations pourront éventuellement être filtrées moyennant un filtre passe bas.

Pour la commande dans la zone3, la séquence injectée au système est représentée dans la figure (Fig. III.12)

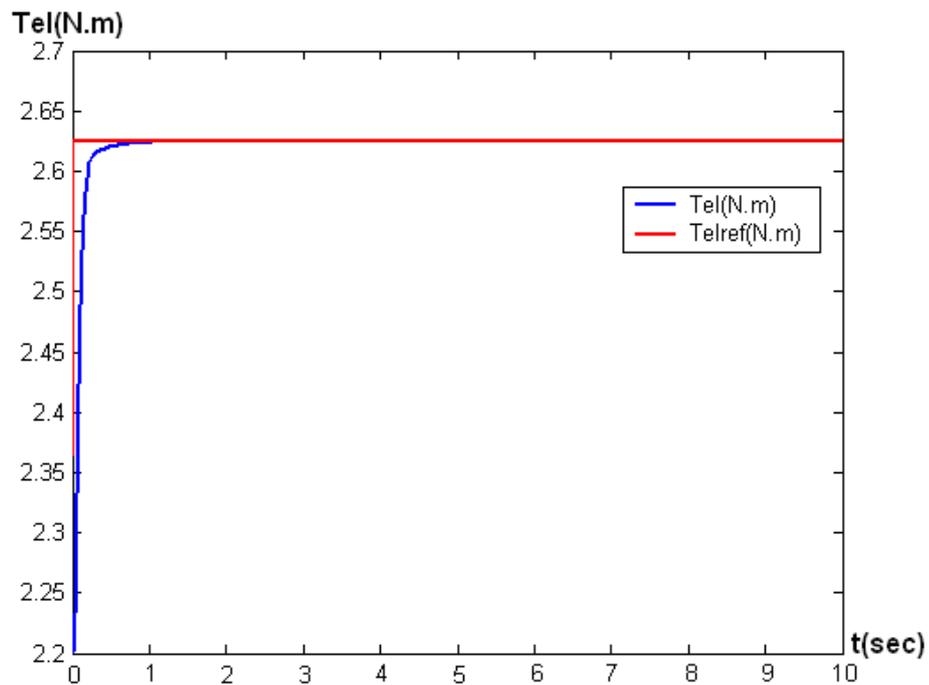


**Fig. III.12.** Vitesses de vent qui attaquent système global, lors du fonctionnement dans la zone3

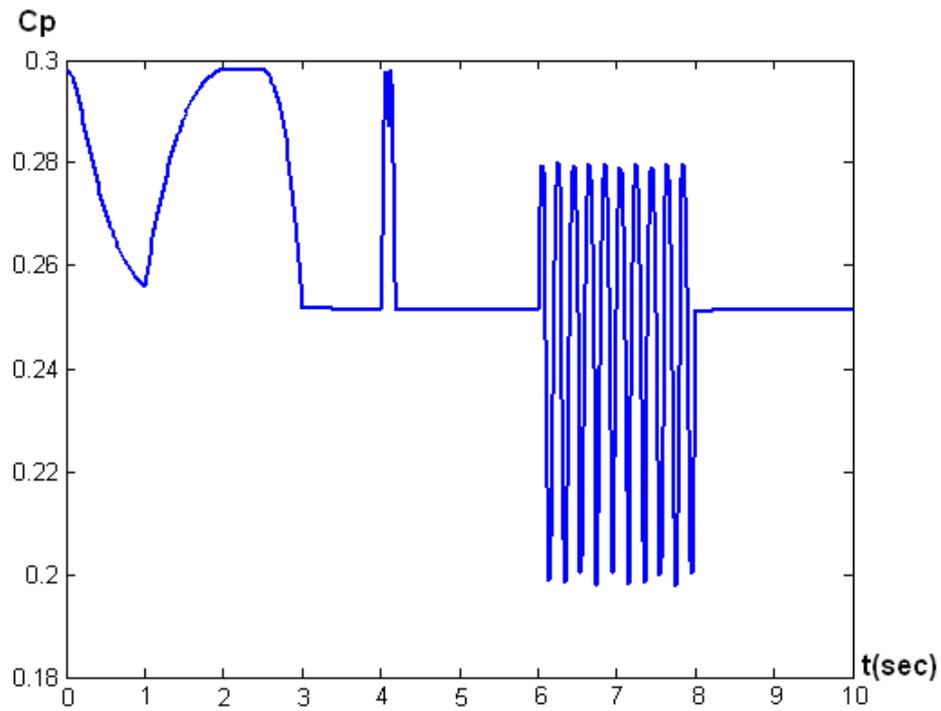
Et les résultats obtenus, pour la vitesse angulaire, le couple électromagnétique, le coefficient de puissance et la commande rapport de surfaces, sont les suivants



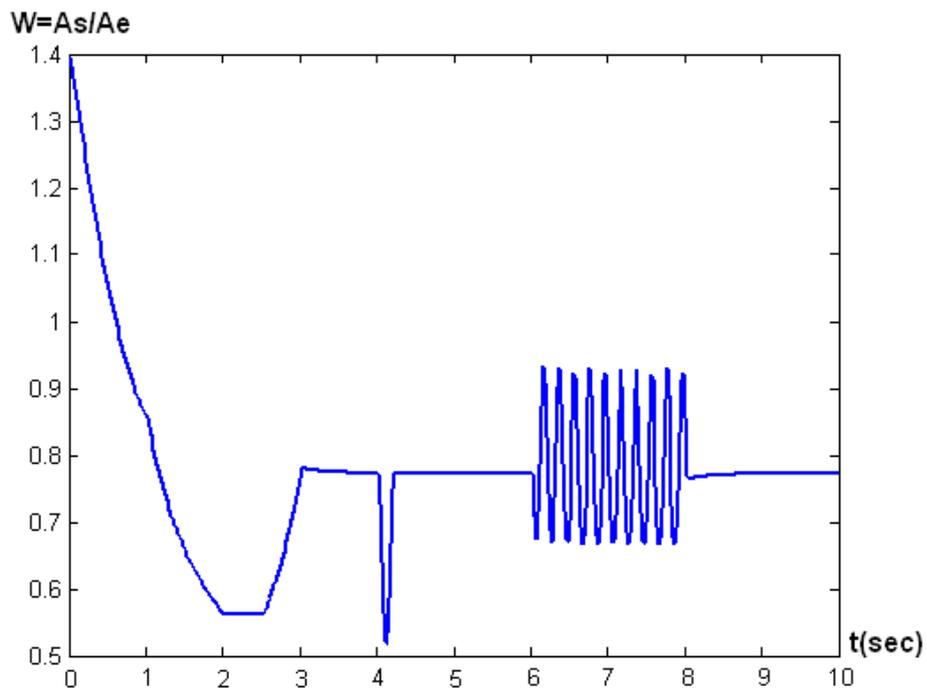
**Fig. III.13.** Vitesses angulaires mesurée et de référence, lors d'un fonctionnement dans la zone3



**Fig. III.14.** Couple électromagnétique mesuré et de référence, lors d'un fonctionnement dans la zone3

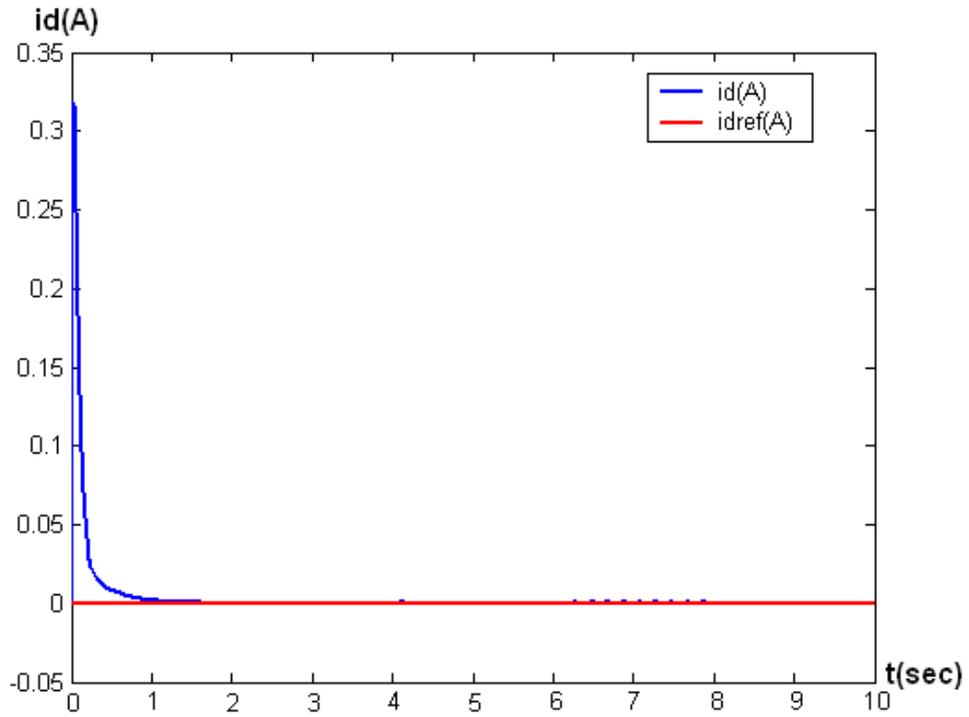


**Fig. III.15.** Evolution du coefficient de puissance, lors d'un fonctionnement dans la zone3

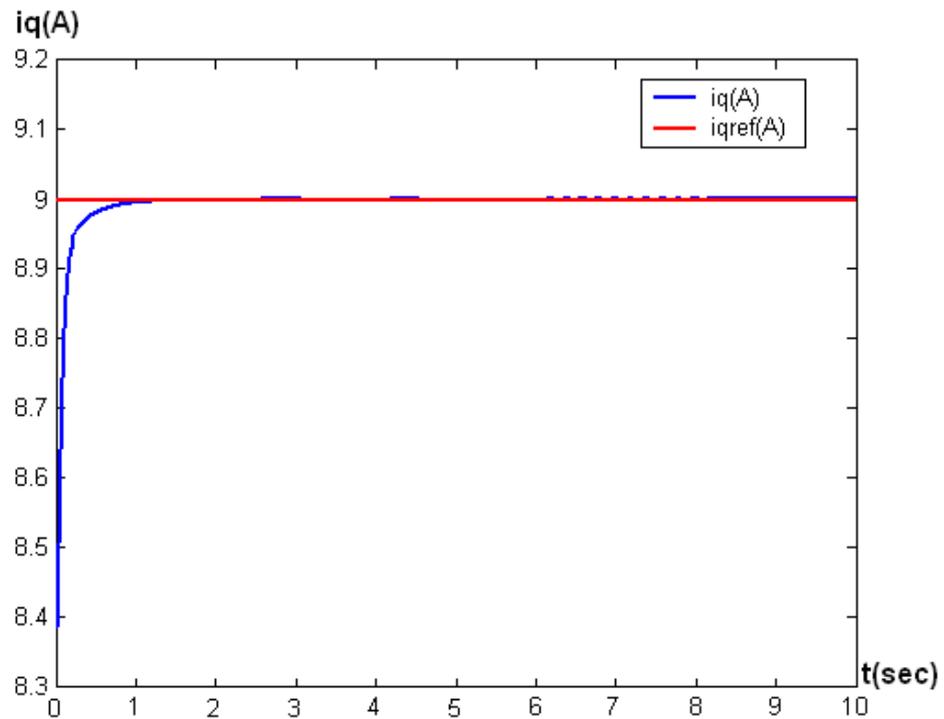


**Fig. III.16.** Commande de rapport de surfaces, lors d'un fonctionnement dans la zone3

Pour ce qui est des composantes de courant  $i_d$  et  $i_q$  les résultats de simulation sont les suivants



**Fig. III.17.** Composante  $i_d$  du courant de ligne, lors d'un fonctionnement dans la zone3



**Fig. III.18.** Composante  $i_q$  du courant de ligne, lors d'un fonctionnement dans la zone3

Nous voyons clairement que la vitesse angulaire atteint sa valeur nominale consigne. Elle présente, néanmoins quelques ondulations durant les instants où ont lieu les variations de vitesse de vent à grande fréquence, sans doute à cause de la lenteur de la réponse de la partie mécanique du système. De même, le couple électromagnétique et les composantes  $id$  et  $iq$  du courant de ligne suivent parfaitement leurs consignes respectives.

Le coefficient de puissance, quant à lui, n'atteint pas sa valeur optimale 0.3, vu le fait qu'on ait privilégié l'aspect sécurité pour la commande dans cette zone3, plutôt que l'optimisation de la puissance. Néanmoins, il présente des valeurs assez acceptables qui avoisinent la valeur 0.25.

Quant à la variable rapport de surfaces de la tuyère. Nous voyons clairement comment ce rapport diminue avec l'accroissement de la vitesse de vent et inversement. La tuyère joue donc effectivement son rôle de protection lors des périodes où la vitesse de vent est très importante.

## Conclusion

Cette partie nous a permis de simuler le fonctionnement de notre éolienne, et de synthétiser des lois de commande pour chaque zone de fonctionnement.

Pour la simulation du fonctionnement du système, nous avons utilisé les modèles mathématiques développés dans la partie II de notre travail. Ces modèles étant des modèles de connaissance issus des lois de la physique, et obtenus avec des hypothèses simplificatrices justifiées. Ces mêmes modèles ont été utilisés pour synthétiser les lois de commande.

Nous avons défini, en premier lieu, quatre zones pour le fonctionnement de notre éolienne. Et nous avons vu que la commande n'avait lieu d'être appliquée que dans les zones 2 et 3. Dans les zones 1 et 4, l'éolienne est mise hors service.

Nous avons synthétisé la loi de commande linéarisante par backstepping, dans la zone2. Notre objectif pour cette zone étant l'optimisation de la puissance générée, nous avons utilisé le couple électromagnétique pour commander la vitesse de rotation. Cette dernière devait être variable, et poursuivre un profil qui permettait d'extraire la puissance optimale.

Pour la zone3, notre objectif principal était plutôt orienté vers la sécurité du système. Nous avons utilisé une commande linéarisante par retour d'état, en agissant sur la variable rapport de surfaces de la tuyère. Le couple électromagnétique et la vitesse de rotation ont été asservis à leurs valeurs nominale et maximale respectivement.

Nous avons pu voir comment la tuyère a joué son rôle de protection lors des périodes fortement ventées, en réduisant le rapport de surfaces entrée / sortie, et inversement pour les périodes peu ventées.

---

# CONCLUSION GENERALE

---

Ce travail nous a permis de nous familiariser avec les différentes notions sur les éoliennes, en passant par les parties qui la composent, les solutions techniques lors de la conception, ainsi que les buts recherchés lors de la commande.

Dans une première partie, et après avoir introduit un bref historique sur l'évolution des éoliennes, nous avons évoqué l'état de l'art, et ce qui se fait d'actualité dans le domaine éolien, en termes de solutions techniques. Cette partie nous a permis de situer notre travail, et de nous orienter pour nos choix de conception.

Dans une deuxième partie, nous avons présenté notre système, et les différentes parties élémentaires qui le composent. Cette étape nous a permis de mieux cerner chaque sous-système et d'en faciliter la modélisation mathématique.

Les modèles développés dans cette partie, sont des modèles de connaissance, qui découlent de l'application des lois de la physique, en émettant des hypothèses simplificatrices justifiées.

Nous avons abordé l'étape validation des modèles, et nous avons envisagé deux méthodes pour y parvenir. Une première méthode simple consiste à choisir, pour notre

système, les mêmes paramètres que ceux disponibles dans la bibliographie, et de comparer les courbes obtenues. C'est cette méthode qui a été adoptée dans le cadre de notre travail. Une seconde méthode consiste à réaliser un banc d'essai expérimental. Ce banc d'essai comprend toutes les parties de l'éolienne réelle, exceptée la partie aérodynamique, qui sera remplacée par un moteur à courant continu générant les mêmes couples et puissances mécaniques que ceux générés par la partie aérodynamique de l'éolienne réelle.

Dans la troisième partie, nous avons défini quatre zones de fonctionnement pour l'éolienne, et avons vu que la commande s'effectuait réellement dans les zones 2 et 3. Notre objectif de commande, dans la zone2, était d'optimiser la génération de la puissance, en agissant sur la vitesse de rotation. La variable de commande dans cette zone était le couple électromagnétique, le rapport de surface de la tuyère étant maintenu à sa valeur maximale. Dans la zone3, par contre, notre objectif de commande était d'assurer la sécurité du système au dépens de l'optimisation de la puissance générée. La commande utilisée, dans cette zone, était le rapport de surface de la tuyère, le couple électromagnétique et la vitesse de rotation étant asservis à leurs valeurs nominale et maximale respectivement. La commande utilisée pour la zone2 est de type linéarisante par la méthodologie de Backstepping. Pour la commande dans la zone3, nous avons utilisé un simple retour d'état linéarisant. Ces commandes nous ont permis d'obtenir de bons résultats de poursuite et de régulation.

Nous avons, également, pu voir comment la tuyère à profil variable a joué son rôle de sécurité pour le système, en agissant sur le rapport de surfaces, en le réduisant lors des périodes présentant des vitesses de vent élevées, et vice versa.

Dans la continuité ce travail, nous pouvons envisager de réaliser le banc d'essai expérimental, qui représente une étape intermédiaire entre l'étude théorique et la pratique sur un système réel. Ce banc d'essai nous permettra de faire ressortir certains aspects physiques que l'on ne peut déceler lors de l'étude théorique.

L'application d'autres types de commande peut, également, être envisagée, ainsi qu'une étude comparative de celles-ci, en termes de performances et de qualité de la puissance générée.

Et enfin, la mise en valeur de la partie tuyère peut être développée d'avantages, en ce qui concerne le design et la variation de son profil, et différentes solutions techniques et pratiques peuvent être émises.

---

# ANNEXES

---

<b>Annexe 1.</b>	<b>Théorie de Betz .....</b>	<b>69</b>
<b>Annexe 2.</b>	<b>Conception du système aérodynamique .....</b>	<b>70</b>
<b>Annexe 3.</b>	<b>Méthodologie du « Backsteeping » .....</b>	<b>72</b>
<b>Annexe 4.</b>	<b>Transformation de Park .....</b>	<b>74</b>
<b>Annexe 5.</b>	<b>Détermination du flux de l'aimant permanent de la Machine Synchrone à Aimant Permanent .....</b>	<b>76</b>

## Annexe 1. Théorie de Betz [1], [4], [20]

De nombreuses études ont été établies pour les machines à axe horizontal, et la théorie de Betz s'applique essentiellement à ces machines. Néanmoins, elle peut être utilisée pour le calcul du rendement des éoliennes à axe vertical.

Le vent est une quantité d'air en mouvement. Cet air, même si de faible densité, possède une masse. Cette dernière se déplaçant à une vitesse donnée, il en résulte une certaine énergie cinétique du vent.

Si l'on note par

$\rho$  La densité de l'air

$V$  La vitesse du vent

$A$  La surface que traverse le vent de façon perpendiculaire

Alors la masse d'air qui traverse le moteur éolien par unité de temps est  $\rho AV$ , et l'énergie cinétique correspondant est

$$P = \frac{1}{2} \rho AV^3 \quad (\text{A1.1})$$

Il s'agit de la puissance totale disponible dans le vent. Et on ne peut en extraire, en réalité, qu'une fraction

$$P' = \frac{1}{2} C_p \rho AV^3 \quad (\text{A1.2})$$

Tel que

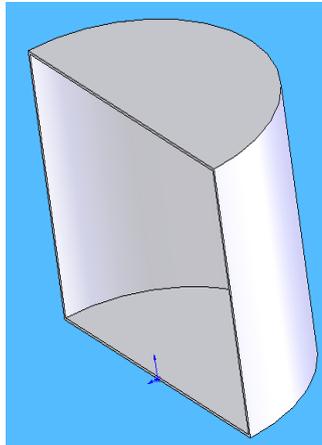
$C_p$  Le coefficient de puissance de l'aéromoteur. Il est toujours inférieur à 1. Betz

estime la valeur maximale de ce coefficient à  $C_{p\max} = \frac{16}{23} = 0.593$ .

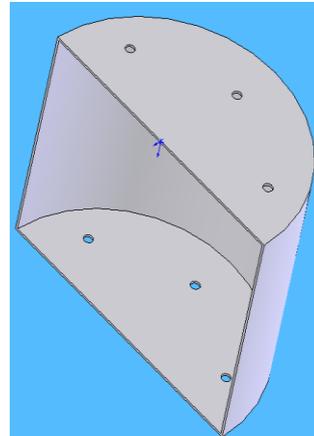
## Annexe 2. Conception du système aérodynamique

### Conception du rotor de Savonius

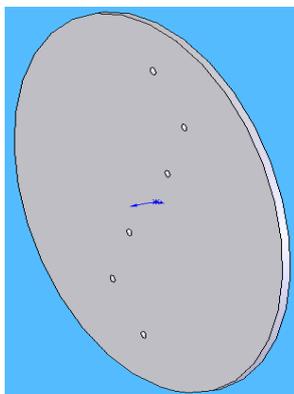
Les étapes de la conception du rotor de savonius sont détaillées et numérotées dans l'ordre suivant



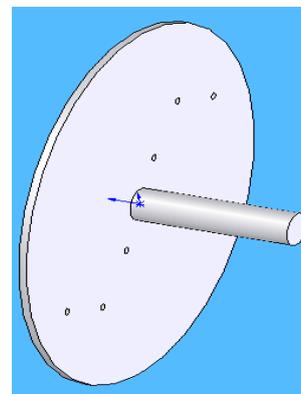
1. Demi fût métallique



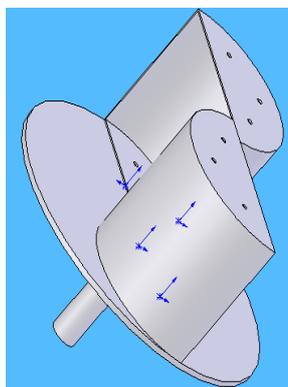
2. Trous pour fixation



3. Partie supérieure de la base



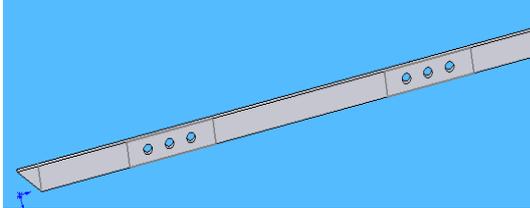
4. Partie inférieure de la base



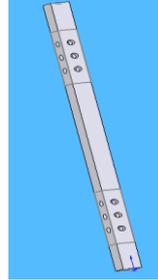
5. Assemblage des différentes pièces.

## Conception de la tuyère

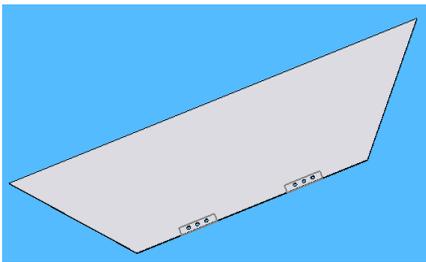
Les différentes parties que comporte la tuyère ainsi que son montage sont donnés dans les figures suivantes



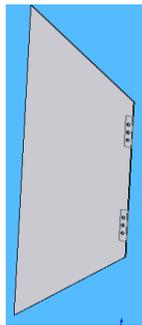
Barre latérale



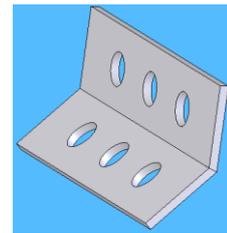
Barre verticale



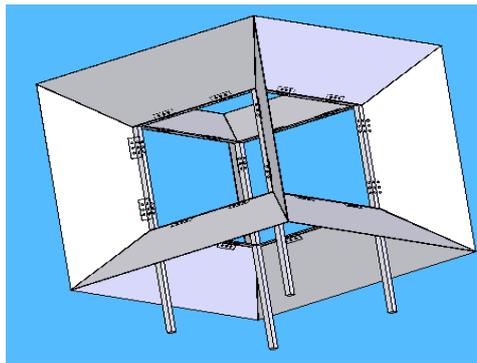
Plaque supérieure ou inférieure



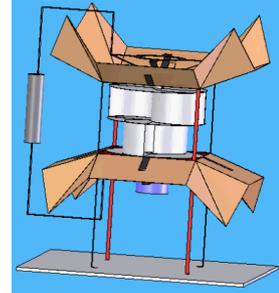
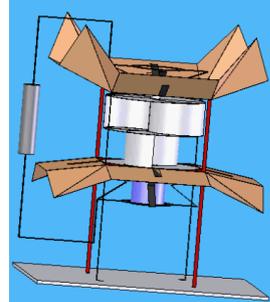
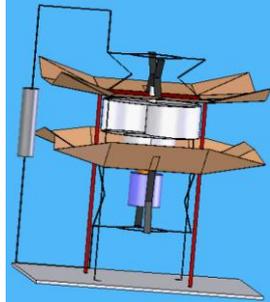
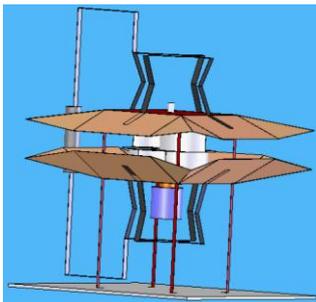
Plaque latérale



Attache



Assemblage final

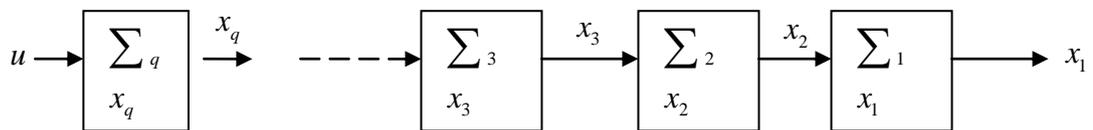


Fonctionnement de la tuyère

### Annexe 3. Méthodologie du « Backsteeping » [30]

La méthodologie de commande par Backsteeping s'applique pour la classe des systèmes dont les équations d'état se présentent sous la forme

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1 = f_1(x_1) + g_1(x_1)x_2 \\ \dot{x}_2 = f_2(x_1, x_2) + g_2(x_1, x_2)x_3 \\ \dot{x}_3 = f_3(x_1, x_2, x_3) + g_3(x_1, x_2, x_3)x_4 \\ \dot{x}_4 = \dots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \dot{x}_q = f_q(x) + g_q(x)u \end{array} \right. \quad (\text{A3.1})$$



**Fig. A.3.** Structure d'un système en cascade

Cette méthode est une procédure systématique permettant de trouver la commande  $u$ . Elle ne s'applique qu'à la classe des systèmes non linéaires en cascade. Elle permet de trouver la bonne fonction de Liapunov  $V(x)$  donnant une commande bien définie.

Le calcul de la commande s'effectue en plusieurs étapes. A chaque étape, on définit la fonction de Liapunov, qui nous permettra de calculer la commande.

*Etape 1.* Calcul de  $x_2$  qui commande  $x_1$ . La fonction de Liapunov pour cette étape est

$$V_1(x) = \frac{1}{2} x_1^2 \quad (\text{A3.2})$$

*Etape 2.* Calcul de  $x_3$  qui commande  $x_2$ . La fonction de Liapunov pour cette étape est

$$V_2(x) = \frac{1}{2} x_1^2 + \frac{1}{2} (x_2 - \Phi_2)^2 \quad (\text{A3.3})$$

*Étape 3.* Calcul de  $x_4$  qui commande  $x_3$ . La fonction de Liapunov pour cette étape est

$$V_3(x) = \frac{1}{2}x_1^2 + \frac{1}{2}(x_2 - \Phi_2)^2 + \frac{1}{2}(x_3 - \Phi_3)^2 \quad (\text{A3.4})$$

...

*Étape q.* Calcul de  $u$  qui commande  $x_q$ . La fonction de Liapunov totale est

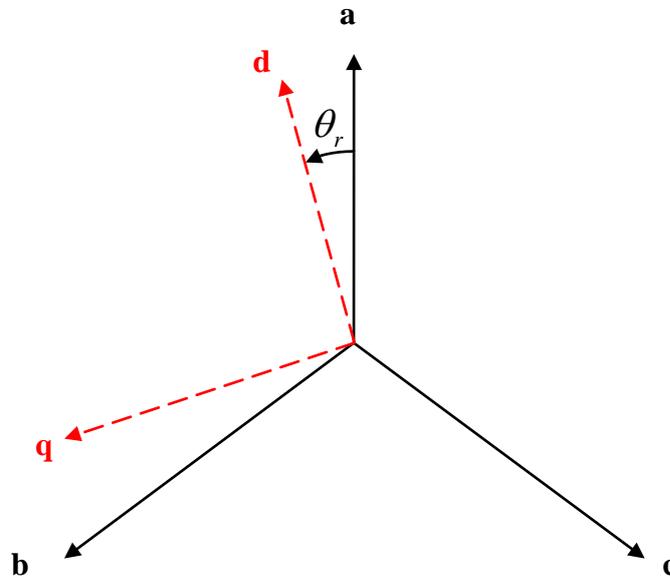
$$V_q(x) = \frac{1}{2}x_1^2 + \frac{1}{2}(x_2 - \Phi_2)^2 + \dots + \frac{1}{2}(x_q - \Phi_q)^2 \quad (\text{A3.5})$$

Les fonctions  $\Phi_2, \Phi_3, \dots, \Phi_q$  sont respectivement des références pour les états  $x_2, x_3, \dots, x_q$ .

*Remarque.* La fonction candidate de Liapunov  $V(x)$  est une fonction scalaire qui doit être positive ou nulle, et dont la dérivée  $\dot{V}(x)$  doit être négative ou nulle.

## Annexe 4. Transformation de Park [27]

Les axes  $dq$  pour la machine synchrone à aimant permanent sont disposés comme indiqué dans la figure (Fig. A4).



**Fig. A4.** Disposition des axes de la transformation  $dq$

Les trois enroulements du stator peuvent être remplacés par deux enroulements fictifs en quadrature dans l'espace et alimentés par des courants déphasés de  $\frac{\pi}{2}$  dans le temps. Ces deux enroulements virtuels sont disposés sur les axes  $d$  et  $q$ .

L'axe  $d$  est orienté suivant le rotor (direction de l'aimantation).

Le passage du système triphasé  $abc$  au système biphasé  $dq$ , et réciproquement, est obtenu grâce à la transformation de Park (A4.1).

$$\begin{pmatrix} x_d \\ x_q \\ x_h \end{pmatrix} = P \begin{pmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{pmatrix} \text{ et } \begin{pmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{pmatrix} = P^{-1} \begin{pmatrix} x_d \\ x_q \\ x_h \end{pmatrix} \quad (\text{A4.1})$$

Telles que

- |                     |   |
|---------------------|---|
| $x_a, x_b$ et $x_c$ | les valeurs instantanées des grandeurs triphasées |
| $x_d, x_q$          | les grandeurs biphasées                           |
| $x_h$               | Est appelée composante homopolaire                |

$P$  et  $P^{-1}$  Les matrices directe et inverse de Park, telles que

$$P = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \quad (\text{A4.2})$$

$$P^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \quad (\text{A4.3})$$

Où

$\theta$  Angle entre l'axe  $d$  et l'axe de référence du système triphasé  $abc$  (en l'occurrence l'axe de la phase  $a$ ).

Si l'on pose  $\theta = 0$  dans les équations de Park, on obtient la transformation de  $abc$  vers un système fictif  $\alpha\beta$ , appelée transformation de Concordia, avec l'axe  $\alpha$  superposé à l'axe de référence de  $abc$ .

Le coefficient  $\sqrt{\frac{2}{3}}$  permet la conservation des puissances lors du passage d'un repère à un autre. Ainsi, la puissance active s'écrit

$$\begin{aligned} P_a &= v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \\ &= v_d i_d + v_q i_q \\ &= v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta \end{aligned} \quad (\text{A4.4})$$

## Annexe 5. Détermination du flux de l'aimant permanent de la Machine Synchrone à Aimant Permanent

[27]

D'abord, un essai à vide permet de déterminer la constante de la force électromotrice  $K_e$ . Ce test consiste à mesurer la tension efficace à vide  $E_0$ , par phase, pour une certaine vitesse de la machine  $\Omega$ . Et la relation  $E_0 = K_e \Omega$  nous permet de déduire  $K_e$ .

Etant donnée la relation  $e_0 = \frac{d\psi_{md}}{dt}$ , on déduit l'expression de  $e_0$

$$\begin{aligned} e_0 &= -\Psi_m p \Omega \sin(p\Omega t) \\ &= -\sqrt{2} E_0 \sin(p\Omega t) \end{aligned} \quad (\text{A5.1})$$

Ce qui permet de déduire  $\Psi_m = \frac{\sqrt{2} E_0}{p \Omega} = \sqrt{2} \frac{K_e}{p}$ .

Puisque  $\Psi_m$  est orienté suivant le flux du rotor (suivant  $d$ ), cette valeur s'écrit dans le référentiel  $dq$  comme suit

$$\begin{cases} \Psi_{md} = \sqrt{\frac{3}{3}} \sqrt{2} \frac{K_e}{p} = \sqrt{3} \frac{K_e}{p} \\ \Psi_{mq} = 0 \end{cases} \quad (\text{A5.2})$$

---

# BIBLIOGRAPHIE

---

## Livres :

- [1] D.LE GOURIERE, *Energie éolienne théorie, conception et calcul pratique des installations*, EYROLLES, Paris 1982
- [2] E.W.GOLDING, *The generation of electricity by wind power*, E. & F. N. SPON LTD, London, 1976
- [3] P.C.PUTNAM, *Power from the wind*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1974
- [4] T.ACKERMANN, *Wind power in power systems*, John Wiley & Sons, Ltd, Stockholm, 2005
- [5] D.SIMMONS, *Wind power*, Energy technology review, USA, 1975
- [6] G.SEGUIER, F.LABRIQUE, *Les convertisseurs de l'électronique de puissance, Volume 4, La conversion alternatif - continu*, Technique et Documentation - Lavoisier, Paris, 1984

- 
- [7] G.SEGUIER, F.LABRIQUE, *Les convertisseurs de l'électronique de puissance, Volume 4, La conversion continu - alternatif*, Technique et Documentation - Lavoisier, Paris, 1989
- [8] J-L.DALMASSO, *Electronique de puissance, commutation*, BELIN, Paris, 1986
- [9] CL.TOUSSAINT, M.LAVABRE, *Cours d'électrotechnique, fascicule 2, machines à courant continu*, DUNOD, Paris, 1978
- [10] F.MILSANT, *Cours d'électrotechnique, Tome II, machines électriques, machines à courant continu asservissement linéaire*, BERTI Editions, Alger, 1993
- [11] P.CHARMONT, *Mécanique des fluides*, Ellipses Editions, Paris, 2006
- [12] P.REBUFFET, *Aérodynamique expérimentale, Tome II*, DUNOD, Paris, 1966
- [13] M.PLUVIOSE, *Ingénierie des turbomachines*, Ellipses Editions, Paris, 2003
- [14] A.BONNET, J.LUNEAU, *Aérodynamique, théorie de la dynamique des fluides*, CEPADUS-EDITIONS, Toulouse, 1989
- [15] R.V.GILES, *Mécanique des fluides et hydraulique*, Série Schaum, Mc Graw-Hill, Paris, 1983
- [16] V.LEGER, A.JAMEAU, *Conversion d'énergie électrotechnique électronique de puissance*, Ellipses Editions, Paris, 2001
- [17] J.CHATELAIN, *Machines électriques, Tome 2*, Presses polytechniques romandes, Suisse, 1983
- [18] Y.O.MUNSON, *Fundamentals of fluid mechanics*, John Wiley & sons, USA, 2006
- [19] B.MULTON, *Les machines synchrones autopilotées*, Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2004

Articles :

- [20] B.MULTON, O.GERGAUD, H.BEN AHMED (LÉSiR Antenne de Bretagne de l'École Normale Supérieure de Cachan Campus de Ker Lann 35170 BRUZ), X.ROBOAM, S.ASTIER (LEEI ENSEIHT Toulouse), B.DAKYO, C.NICHITA (GREAH Université du Havre), *Extrait du rapport de synthèse ECRIN « L'Electronique de Puissance Vecteur d'Optimisation Pour les Energies Renouvelables »*, Paris, 2002
- [21] G.MICHALKE, A.D.HANSEN, T.HARTKOPF, *Control strategy of a variable speed wind turbine with multipole permanent magnet synchronous generator*, Germany & Denmark, 2006
- [22] N.BERNARD, *Machines synchrones : de la boucle ouverte à l'autopilotage*, Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2002

Thèses :

- [23] O.GERGAUD, « *Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur* », Thèse de Doctorat, ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE de CACHAN, décembre 2002
- [24] A.BOYETTE, « *Contrôle - commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne* », Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, NANCY I, décembre 2006
- [25] L.MOREAU, « *Modélisation conception et commande de génératrice à reluctance variable basse vitesse* », Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, décembre 2005
- [26] 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, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Bordeaux, décembre 2003
- [27] G-O.CIMUCA, « *Système inertiel de stockage d'énergie associée à des générateurs éoliens* », Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Lille, 2005

Cours :

- [28] H.CHEKIREB, *Commande des Machines et Electronique de Puissance*, Notes de Cours de 4<sup>ème</sup> Année Automatique de l'Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Année universitaire 2004/2005
- [29] M.KOURGLI, *Electrotechnique Générale*, Notes de Cours de 3<sup>ème</sup> Année Automatique de l'Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Année universitaire 2003/2004
- [30] M.TADJINE, *Automatique Avancée*, Notes de Cours de 5<sup>ème</sup> Année Automatique de l'Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Année universitaire 2005/2006

Sites web et liens Internet :

- [31] [http://www.futura-sciences.com/fr/sinformer/actualites/news/t/developpement-durable-1/d/en-images-nouveau-souffle-pour-lenergie-eolienne-et-des-projets-novateurs\\_10204/](http://www.futura-sciences.com/fr/sinformer/actualites/news/t/developpement-durable-1/d/en-images-nouveau-souffle-pour-lenergie-eolienne-et-des-projets-novateurs_10204/)
- [32] [http://www.espace-eolien.fr/lille/pu\\_wind/puwch1.htm](http://www.espace-eolien.fr/lille/pu_wind/puwch1.htm)
- [33] [www.adem.fr](http://www.adem.fr)
- [34] [http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie\\_%C3%A9olienne](http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_%C3%A9olienne)
- [35] [http://www.espace-eolien.fr/Eolien/kesaco\\_tech.htm](http://www.espace-eolien.fr/Eolien/kesaco_tech.htm)
- [36] <http://www.solairedirect.fr>
- [37] <http://basetpe.free.fr/tpe1/>
- [38] <http://www.plainecommune.fr>
- [39] <http://resosol.org/SolEole/eoliennes.html>
- [40] [http://www.etapenergie.com/petite\\_eolienne.html](http://www.etapenergie.com/petite_eolienne.html)
- [41] <http://www.mem-algeria.org>

---

# NOTES

---





## ملخص

إن الهدف من هذا العمل هو تصميم مولد هوائي ذو محور عمودي، و تحديد أمثله الرياضية بهدف التحكم فيه. ينقسم العمل إلى ثلاثة أجزاء رئيسية. نتعرض في أولها إلى وصف تاريخي موجز و آخر ما توصل إليه في ميدان تصميم المولدات الهوائية. في الجزء الثاني، نقدم تصميم الجهاز و نقوم بتجزئته إلى عدة أجزاء لغرض تمثيلها رياضياً. و نقوم باستعمال الأمثلة الرياضية المتحصل عليها من أجل تحديد قوانين التحكم في المولد الهوائي و محاكاة اشتغاله. لنتهي بتحليل النتائج المحصل عليها.

**الكلمات الأساسية:** تصميم، مولد هوائي، محور عمودي، تمثيل، محاكاة، تحكم.

## Résumé

Le but principal de ce travail est la conception d'une éolienne à axe vertical et la détermination de ses différents modèles mathématiques afin de la commander.

Le travail se divise en trois parties principales. Nous présentons en premier lieu un bref historique, et l'état de l'art de la conception des éoliennes. Dans une deuxième partie, nous présentons la conception et la modélisation du système. Nous subdivisons le système global en plusieurs parties élémentaires dont nous déterminons les modèles mathématiques. Ces modèles sont utilisés dans la troisième partie pour la synthèse des lois de commande, et la simulation du fonctionnement du système. Nous terminons, enfin, par une analyse des résultats obtenus.

**Mots clés :** Conception, éolienne, axe vertical, modélisation, simulation, commande.

## Abstract

The aim of this work is the design of a vertical axis wind turbine and the determination of its mathematical models in order to control it.

The work is divided into three principal parts. We, first, expose a brief historic, and the state of art of the wind turbines' design. In the second part, we present the design and the modelling of the system. We subdivide the total system into several elementary parts and we determine their mathematical models. These models are used in the third part for the synthesis of the control laws, and the simulation of the system's function. Finally, we analyse the obtained results.

**Key words:** Design, wind turbine, vertical axis, modelling, simulation, control.