

---

---

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE**  
**SCIENTIFIQUE**



**Ecole Nationale Polytechnique**  
**Département d' Automatique**  
**Laboratoire de Commande des Processus**  
**Option: Commande Et Conduite D'Énergie Electrique**

# **Mémoire de Magister**

Présenté par :

**Mourad ABBAS**

**Ingénieur D'état En ELECTROTECHNIQUE**

**Thème :**

**CONTRIBUTION A LA MODELISATION  
ET LA COMMANDE D'UNE CHAINE EOLIENNE  
UTILISANT DES ONDULEURS A TROIS NIVEAUX  
AVEC ELEMENTS DE STOCKAGES**

Président	Mr. M.O MAHMOUDI	Professeur	ENP
Rapporteur	Mr. E.M BERKOUK	Professeur	ENP
Examineurs	Mr. LAZHARI NEZLI	MC(A)	ENP
	Mr. HACHEMI CHEKIREB	Professeur	ENP
	Mr. CHERIF LARBES	Professeur	ENP

**Promotion 2011**

---

---

*A Mes Parents, Mes frères et sœurs  
Surtout dido et anissa  
Et toute la famille et tous mes amis*

*A tous, je dédié cette thèse*

# Remerciement

Ce mémoire a été préparé au Laboratoire de Commande des Processus LCP de L'ENP.

Il m'est très difficile d'exprimer en quelques mots tout ce que je dois à Monsieur E.M Berkouk, Professeur à l'ENP pour la confiance qu'il m'a accordée en me proposant ce sujet. Qu'il soit remercié pour avoir dirigé mes travaux et pour en être le directeur de mémoire. Durant ces années, j'ai surtout apprécié sa grande compétence scientifique, ses conseils et suggestions ont été pour moi autant d'aides inestimables, que ce mémoire reste pour lui un témoignage constant de toute ma reconnaissance.

Mes remerciements vont également à Monsieur M.O Mahmoudi, Professeur à l'ENP pour ces nombreux conseils et pour avoir accepté d'en être un des rapporteurs. Et je tiens à le remercier, pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de présider le jury de cette mémoire.

Mes remerciements vont de même à Monsieur Lazhari NEZLI , Maître de conférences à l'ENP , à Monsieur Hachemi CHEKIREB , Professeur à l'ENP et également à Monsieur Cherif LARBES, Professeur à l'ENP, pour avoir accepté de participer à ce jury de thèse.

Et enfin je remercie ma famille qui m'a toujours encouragée et soutenue. Je tiens à les remercier pour leur aide et le soutien qu'ils m'ont apportés afin de mener à bien cette mémoire durant ces années.

## Table des matières

INTRODUCTION GENERALE.....	1
<b>I. CHAPITRE 1 : ETAT DE L'ART DES AEROGENERATEURS.....</b>	<b>4</b>
I.1. LE GENIE ELECTRIQUE DANS LE VENT .....	5
I.2. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE EOLIENNE.....	5
I.2.1. Description .....	5
I.2.2. Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.....	6
I.2.3. Puissance extraite du vent.....	6
I.3. CONVERSION AERODYNAMIQUE .....	7
I.3.1. Le coefficient de puissance (power coefficient) .....	8
I.3.2. Le coefficient de couple (torque coefficient) .....	8
I.3.3. Courbes caractéristiques .....	9
I.4. TRANSMISSION .....	10
I.5. CONCEPTION DES TURBINES EOLIENNES .....	10
I.6. EOLIENNE A AXE HORIZONTAL ET A AXE VERTICAL .....	11
I.6.1. Eolienne à axe vertical.....	11
I.6.2. Eolienne à axe horizontal.....	12
I.7. LES EOLIENNES A VITESSE VARIABLE.....	13
I.7.1. Eolienne à vitesse fixe .....	13
I.7.2. Eolienne à vitesse variable basée sur une machine synchrone .....	14
I.7.3. Type Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA).....	15
I.8. PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES DIFFERENTES STRUCTURES DE PRODUCTION.....	18
I.9. CARACTERISTIQUES TECHNOLOGIQUES DES EOLIENNES A AXE HORIZONTAL .....	19
I.9.1. Le Mâts (pylônes).....	19
I.9.2. Rotor.....	19
I.9.3. Moyeu.....	20
I.9.4. Les pales .....	20
I.9.5. Le multiplicateur.....	22
I.10. MISE EN ŒUVRE DES EOLIENNES .....	22
I.10.1. Recherche du rendement maximum MPPT .....	22
I.10.2. Eolienne autonome .....	22
I.10.3. Eolienne isolée raccordée au réseau .....	23
I.10.4. Parc éolien important.....	23
I.10.5. Gestion du réseau électrique .....	24
I.10.6. Nécessité de stockage .....	25
<b>II. CHAPITRE 2 :MODELISATION DE L'EOLIENNE ET ALGORITHMES DE POURSUITE DE PUISSANCE MAXIMALE MPPT .....</b>	<b>28</b>
II.1. MODELISATION DE LA TURBINE .....	28
II.1.1. Modélisations existantes du coefficient de puissance .....	29
II.2. MODELE DU MULTIPLICATEUR.....	31
II.3. EQUATION DYNAMIQUE DE L'ARBRE .....	31
II.4. STRATEGIES DE COMMANDE DE LA TURBINE EOLIENNE.....	32
II.4.1. Caractéristique puissance vitesse d'éoliennes de grande puissance .....	32
II.5. ZONE 1 .....	35
II.5.2. Techniques d'extraction du maximum de la puissance .....	38
II.5.3. Résultats obtenus.....	42
II.5.4. Résultats obtenus .....	43
<i>Résultats obtenus avec la structure de commande sans asservissement de vitesse .....</i>	<i>43</i>
II.6. ZONE 2(FONCTIONNEMENT A VITESSE CONSTANTE).....	44
II.7. ZONE 3(FONCTIONNEMENT A PUISSANCE CONSTANTE) .....	46
II.7.1. Modélisation du système d'orientation des pales .....	46
<b>III. CHAPITRE 3 : MODELISATION D'UNE CHAINE EOLIENNE UTILISANT MPPT.....</b>	<b>56</b>
III.1. MODELE DE LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION(MADA)DANS LE PLAN ABC .....	56
III.1.1. Hypothèses simplificatrices .....	56
III.1.2. Equations électriques de la machine .....	57

III.1.3. Equations mécaniques de la machine .....	58
III.2. MODELE DE LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION DANS LE PLAN DQ .....	59
III.2.1. La transformation de Park .....	59
III.3. MODELISATION DE LA MADA DANS LE REPERE DE PARK .....	60
III.4. CHOIX DU REFERENTIEL .....	60
III.4.1. Référentiel lié au stator .....	60
III.4.2. Référentiel lié au rotor .....	60
III.4.3. référentiel lié au champ tournant.....	61
III.5. MISE SOUS FORME D'EQUATIONS D'ETAT .....	61
III.6. STRATEGIE DE COMMANDE DE LA MADA.....	62
III.7. COMMANDE VECTORIELLE DE LA MADA.....	62
III.7.1. Procédé d'orientation du flux.....	62
III.7.2. Relations entre les courants statoriques et rotoriques .....	64
III.7.3. Expression des puissances actives et réactives dans le repère synchrone .....	64
III.7.4. Expressions des tensions rotoriques en fonction de courants rotoriques.....	65
III.8. CALCUL DES TENSIONS ROTORIQUES DE REFERENCE POUR LA COMMANDE EN PUISSANCE ACTIVE ET REACTIVE DE LA MADA .....	66
III.8.1. Principe général .....	66
III.8.2. Commande directe .....	67
III.8.3. Commande indirecte .....	67
III.9. LA CASCADE BASEE SUR UNE MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION ASSOCIE A DEUX CONVERTISSEURS A TROIS NIVEAUX .....	70
III.10. DESCRIPTION DU MONTAGE .....	70
III.10.1. Modélisation de l'onduleur à trois niveaux .....	71
III.10.2. Modèle de connaissance de l'onduleur à trois niveaux .....	72
III.10.3. fonctions de connexion des interrupteurs.....	73
III.10.4. Fonctions de connexion des demi-bras .....	73
III.10.5. Fonction de conversion .....	73
III.11. STRATEGIE DE COMMANDE DE L'ONDULEUR TRIPHASE A TROIS NIVEAUX .....	74
III.11.1. Commande triangulo-sinusoidale à deux porteuses .....	74
III.11.2. L'algorithme de commande .....	75
III.12. REDRESSEUR TRIPHASÉ À TROIS NIVEAUX .....	75
III.12.1. Modélisation du redresseur .....	76
III.12.2. Modélisation du filtre passif.....	76
III.13. CONTROLE DU CONVERTISSEUR COTE RESEAU .....	76
III.13.1. Commande par hystérésis en courant appliquée au redresseur .....	77
III.13.2. Commandabilité du redresseur.....	77
III.13.3. REGULATION DE LA TENSION DU BUS CONTINU .....	78
III.13.4. CONTRÔLE DES COURANTS COTE RESEAU.....	78
III.14. CASCADE REDRESSEURS NPC À TROIS NIVEAUX-ONDULEURS NPC À TROIS NIVEAUX .....	79
III.14.1. Structure de la cascade .....	79
III.14.2. Modélisation du bus continu de la cascade .....	79
III.14.3. Résultats de simulation.....	80
III.15. CONCLUSION.....	82
<b>IV. CHAPITRE4 : MODELISATION ET COMMANDE DE SYSTEME DE STOCKAGE.....</b>	<b>85</b>
IV.1. INTRODUCTION.....	85
IV.2. MODELISATION .....	86
IV.2.1. Le volant d'inertie.....	86
IV.2.2. La transmission mécanique.....	88
IV.2.3. La machine asynchrone .....	88
IV.3. STRUCTURE ET PRINCIPE DE LA COMMANDE.....	90
IV.4. CONTROLE ET SUPERVISION DU SISE.....	91
IV.4.1. Stratégie de contrôle du SISE .....	91
IV.4.2. Supervision du SISE associé au générateur éolien .....	91
IV.5. CONTROLE DU SISE ASSOCIE AU GENERATEUR EOLIEN.....	92
IV.5.1. Contrôle en vitesse pour le SISE, et contrôle du bus continu par le convertisseur coté réseau .....	92
IV.5.2. Contrôle en vitesse pour le SISE, et contrôle du bus continu par le SISE .....	93
IV.5.3. Contrôle en couple pour le SISE.....	94
IV.5.4. Systèmes de stockage en parallèle .....	95

IV.6. VIEILLISSEMENT, DUREE DE VIE .....	95
IV.7. AVANTAGES / INCONVÉNIENTS .....	95
IV.8. RESULTATS DE SIMULATION .....	96
IV.8.1. COMMANDE EN COUPLE.....	96
IV.8.2. COMMANDE EN VITESSE .....	97
IV.9. RESULTATS DE SIMULATION DU SYSTEME COMPLET.....	100
CONCLUSION GENERALE .....	115
ANNAXES.....	106
REFERENCES.....	120

## Nomenclature

$v$	La vitesse de l'air traversant l'aérogénérateur.
$\rho$	Masse volumique de l'air.
$R$	Rayon de la surface balayée par la turbine.
$P_v$	La puissance du vent.
$P_T$	La puissance absorbée par l'aérogénérateur.
$E_c$	L'énergie cinétique de la masse d'air qui traverse l'aérogénérateur.
$C_p$	Le coefficient de puissance.
$C_{p_{max}}$	Le coefficient de puissance maximal de la turbine.
$\lambda$	La vitesse relative de l'éolienne.
$\lambda_{opt}$	La vitesse relative optimale de l'éolienne.
$\Omega_t$	Vitesse de rotation de la turbine.
$\Omega_{mec}$	Vitesse de rotation de l'arbre du générateur.
$\Omega_{opt}$	Vitesse de rotation optimale de l'arbre du générateur.
$G$	Gain du multiplicateur.
$C_g$	Couple résistant issue du multiplicateur.
$C_{aer}$	Couple aérodynamique de l'éolienne.
$C_{vis}$	Couple des frottements visqueux.
$f$	Coefficient des frottements visqueux de l'éolienne et de sa génératrice.
$J$	Inertie totale de l'arbre.
$J_T$	Inertie de la turbine.
$J_g$	Inertie de la machine.
s, r	Indice relatif au stator et rotor respectivement.
d	Indice de l'axe direct.
q	Indice de l'axe en quadrature.
$[V_s]$	Vecteur tension statorique.
$[V_r]$	Vecteur tension rotorique.
$[I_s]$	Vecteur courant statorique.
$[I_r]$	Vecteur courant rotorique.
$[\varphi_s]$	Vecteur flux statorique.
$[\varphi_r]$	Vecteur flux rotorique.
$[R_s]$	Matrice résistance statorique.
$[R_r]$	Matrice résistance rotorique.

## Nomenclature

$[L_{ss}]$	Matrice inductance statorique.
$[L_{rr}]$	Matrice inductance rotorique.
$[M_{sr}]$	Matrice inductance mutuelle stator-rotor.
$p$	Nombre de paires de pôles.
$\theta_s$	L'angle électrique entre l'axe $a_s$ et l'axe d.
$\theta_r$	L'angle électrique entre l'axe $a_r$ et l'axe d.
$\theta$	La position angulaire du rotor par rapport au stator.
$\omega_s$	Pulsation électrique statorique.
$\omega_r$	Pulsation de glissement ( $\omega_s - \omega$ ).
$\omega$	Vitesse angulaire de rotation.
$\Omega$	Vitesse de rotation mécanique.
$C_{em}$	Couple électromagnétique.
$R_s$	Résistance statorique.
$R_r$	Résistance rotorique.
$l_s$	Inductance propre d'une phase statorique.
$l_r$	Inductance propre d'une phase rotorique.
$M_s$	Inductance mutuelle entre deux phase statorique.
$M_r$	Inductance mutuelle entre deux phase rotorique.
$M_r$	Inductance mutuelle maximale lorsque l'axe $a_s$ coïncide avec l'axe $a_r$ .
$L_s$	Inductance cyclique statorique.
$L_r$	Inductance cyclique rotorique.
$M$	Inductance cyclique mutuelle entre le stator et le rotor.
$P$	Puissance active statorique.
$Q$	Puissance réactive statorique.
$E_c$	L'énergie du volant d'inertie.
$P_v$	Puissance maximale délivrable par le système de stockage.
$\Omega_v$	Vitesse angulaire du volant.
$J_v$	Inertie du volant.
$\Omega_{vmax}$	Vitesse angulaire maximale du volant.
$\Omega_{vmin}$	Vitesse angulaire minimale du volant.
$P_{ref}$	La puissance du système de stockage.
$P_{reg}$	La puissance qu'il faut délivrer au réseau.
$P_{éol}$	La puissance générée par le générateur éolien.



# Introduction

## *Introduction*

L'énergie électrique est un ingrédient principal dans une communauté au niveau de civilisation. Elle est au cœur de notre société moderne qui serait bien en peine si elle devait s'en passer. Sa facilité de transport et surtout sa transformation en une autre forme d'énergie et son stockage en font un élément désormais indispensable.

En effet, quel appareil domestique ou industriel n'utilise pas d'électricité que ce soit pour faire de l'éclairage, du chauffage, des mouvements de rotation ou translation, de la transmission de signaux, de l'imagerie médicale et bien d'autres choses encore . . . la liste est presque infinie en fait. C'est pour cela que la production de l'énergie électrique est importante et qu'il est intéressant de pouvoir trouver des solutions afin d'en produire toujours plus mais de manière plus propre et plus durable.

Des solutions alternatives aux énergies fossiles que sont le charbon, le pétrole et l'uranium sont donc des voies vers lesquelles notre société toute entière doit s'engager. De plus, la consommation d'énergie, toujours en augmentation, fait réduire les réserves en énergies fossiles et rapproche l'échéance de leur épuisement, ou du moins leur extraction à moindre frais. En effet, pour prendre l'exemple du pétrole, les puits sont désormais beaucoup plus profonds et les gisements plus difficiles d'accès ce qui nécessite plus d'infrastructures et de transformations avant de pouvoir être utilisé comme combustible pour être transformé sous une autre forme d'énergie.

C'est dans cet objectif que vient s'insérer notre étude qui porte sur une des énergies renouvelables en développement en ce moment qui est l'énergie éolienne. Nous allons nous intéresser à l'état actuel des avancées technologiques qui ont permis la construction et le fonctionnement de ces aérogénérateurs, tout ceci en regardant aussi ce qui freine leur développement afin de pouvoir envisager des solutions permettant de faciliter l'insertion de tel dispositif dans la production électrique.

Une grande partie des éoliennes installées de nos jours sont équipées de machines asynchrones à double alimentation (MADA). Cette génératrice permet une production d'électricité à vitesse variable, ceci permet alors de mieux exploiter les ressources éoliennes pour différentes conditions de vent. Ces éoliennes sont aussi équipées d'hélices à angle de calage de pale variable pour s'adapter aux conditions de vent. L'ensemble de l'éolienne est contrôlé de manière à maximiser en permanence la puissance produite en recherchant le point de fonctionnement à puissance maximum communément appelé MPPT.

Dans le premier chapitre nous allons présenter un état de l'art actuel de la production éolienne. Ceci nous permet de nous positionner quant au choix du type de génératrice et de technicité utilisée pour l'éolienne. Nous y verrons donc l'intérêt que présente la machine asynchrone à double alimentation par rapport aux autres machines utilisées ainsi que l'intérêt de mettre en place une hélice à angle de calage des pales variable afin de pouvoir fonctionner à vitesse variable pour mieux capter la puissance des faibles vents.

Dans le second chapitre nous développerons la modélisation de la partie mécanique de l'éolienne. Elle concerne essentiellement l'hélice sur les pales, Un contrôle de l'angle de calage des pales est mis en place afin de maximiser le rendement de l'hélice et permettre ainsi une extraction maximale de la puissance disponible dans le vent. L'hélice fournit donc un couple maximum en permanence en s'adaptant aux différentes conditions de vent grâce au contrôle de l'angle qui recherche le point de puissance maximale (MPPT). Ensuite nous montrerons la modélisation du multiplicateur de vitesse qui fait la liaison entre l'hélice et la génératrice. Et nous terminerons ce chapitre par une modélisation de l'ensemble de la partie mécanique qui nous permettra par la suite de faire des simulations de notre éolienne.

Une fois cette partie mécanique en fonctionnement, nous allons nous attacher à la génération d'électricité par la modélisation de la génératrice et l'élaboration de sa

## *Introduction*

commande permettant de gérer les puissances et d'assurer des services systèmes. Notre choix s'est porté sur une machine asynchrone à double alimentation MADA car elle va nous permettre, en association avec l'hélice à pas variable, de fonctionner quelles que soient les conditions de vent et de vitesse de rotation. En effet, le contrôle de cette machine se fait par les tensions rotoriques et l'on peut alors la contrôler pour produire de l'énergie électrique lorsque la vitesse est à +30% de la vitesse de synchronisme. Ainsi il est possible de produire de la puissance tout en maintenant la fréquence de 50 Hz constante au réseau. De plus, la commande en double alimentation va nous permettre de réaliser un contrôle indépendant des puissances actives et réactives de la MADA.

Ensuite viendront dans le chapitre 4 la modélisation des autres éléments constitutifs de notre dispositif de production éolienne. Les différentes formes de stockage d'énergie y seront aussi présentées pour envisager des solutions d'association avec l'éolienne. C'est ici que sera détaillé le dispositif de stockage qui va nous permettre de maintenir constante la puissance fournie au réseau en emmagasinant et restituant l'énergie que va produire la MADA en fonction des conditions de vent. Cette puissance fournie au réseau doit être choisie en concordance avec la puissance moyenne disponible dans le vent. Le dimensionnement de cette unité de stockage demande une étude approfondie sur les conditions de vent, et le choix de la puissance et de la taille de cette unité sont discutées dans cette partie. La puissance de la MADA dépend, elle aussi, du stockage, des conditions de vent et de la puissance constante que l'on veut fournir au réseau, il est donc essentiel d'effectuer l'étude préalablement pour ces deux éléments avant de poursuivre le dimensionnement des convertisseurs. De plus, le dimensionnement de l'unité de stockage et de la MADA doit être un compromis entre le coût et le maintien de la puissance fournie. C'est aussi dans cette partie que nous développerons précisément les stratégies de commande en puissance de l'ensemble des éléments afin de maintenir constante la puissance fournie au réseau tout en maximisant la puissance extraite du vent grâce au contrôle MPPT. Différents fonctionnements sont présentés par des simulations numériques pour mettre en évidence d'une part l'utilité du stockage.

# Chapitre 1

## Etat de l'art des aérogénérateurs

Dans ce chapitre, En essayant de donner un aperçu sur l'énergie éolienne, nous allons examiner et modéliser tous les éléments qui interviennent dans la conversion éolienne. Notamment, notre étude s'est focalisée sur l'élaboration d'une modélisation de l'éolienne en calculant la puissance créée par le vent sur les pales. Cette modélisation se démarque de la plupart des modélisations établies pour l'étude des éoliennes qui utilisent le calcul de la puissance disponible dans le vent et y affecte un coefficient pour obtenir la puissance disponible sur l'arbre.

## I.1. LE GENIE ELECTRIQUE DANS LE VENT

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la Terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air en perpétuel déplacement. Après avoir pendant longtemps oublié cette énergie pour tant exploitée dès l'antiquité, elle connaît depuis environ 30 ans un essor sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers. A l'échelle mondiale, l'énergie éolienne depuis une dizaine d'années maintient une croissance de 30% par an. En Europe, principalement sous l'impulsion allemande, scandinave et espagnole, on comptait en 2000 environ 15000 MW de puissance installée. Ce chiffre a presque doublé en 2003, soit environ 27000 MW pour 40000MW de puissance éolienne installée dans le monde. [ENE].

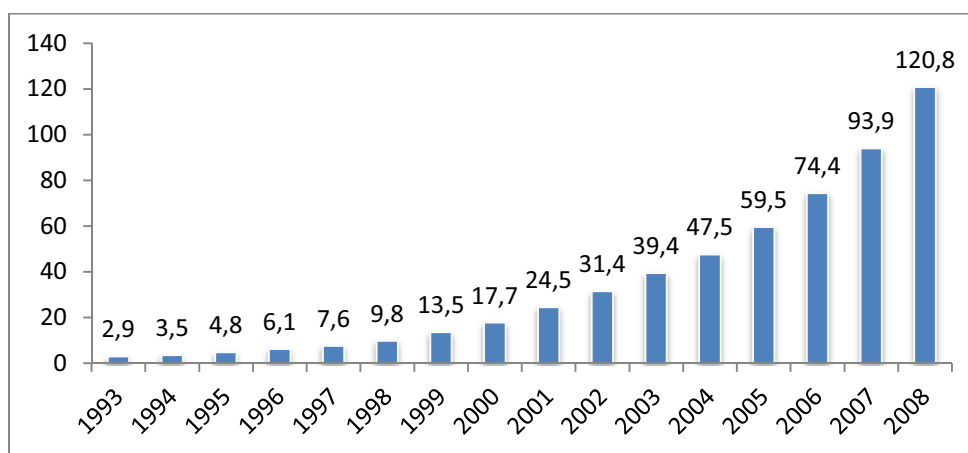


Figure I.1. Production d'énergie éolienne mondiale depuis 1993 (en GW).

La puissance a produit par le vent dans le monde entier atteint, à la fin de 2004, 48 GWs, représentation de 0.57% de toute la fourniture d'électricité du monde. La figure ne pourrait pas sembler impressionnante, mais une fois comparée à d'autres technologies d'énergie renouvelables, il apparaît clairement que l'énergie éolienne est prometteuse. Comme exemple, l'énergie éolienne est toujours un petit joueur de l'électricité sur le marché européen, produisant 2.4% de sa production d'électricité totale. Ceci changera comme l'Union européenne a décidé de faire à énergie éolienne une source importante de l'électricité, avec une part de marché de 12% en 2020 et 20% de 2030 (EWEA 2005).[IUL08]

## I.2. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE EOLIENNE

### I.2.1. Description

La modélisation de l'éolienne exige la modélisation du vent, du comportement aérodynamique des pales, du système mécanique de transmission, du générateur électrique, du convertisseur de puissance et du système de commande

### I.2.2. Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique

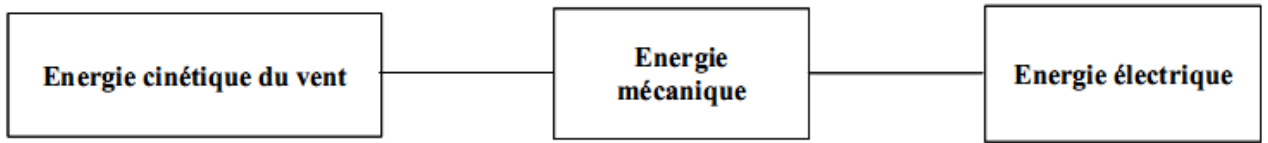


Figure I.2. Principe de conversion de l'énergie dans une éolienne.

Les éoliennes convertissent l'énergie cinétique du vent captée par les pales en énergie mécanique, puis en électricité. La transformation de cette dernière en énergie électrique est assurée par un générateur électrique de type synchrone ou asynchrone.

Les pales du rotor éolien captent une partie de l'énergie contenue dans le vent et la transfèrent au moyeu qui est fixé sur l'arbre de l'éolienne. Celui-ci transmet ensuite l'énergie mécanique au générateur électrique. En général, la transmission de puissance entre le moyeu et le générateur électrique est réalisée à travers un multiplicateur de vitesse de rotation. [VEC05][DAV07]

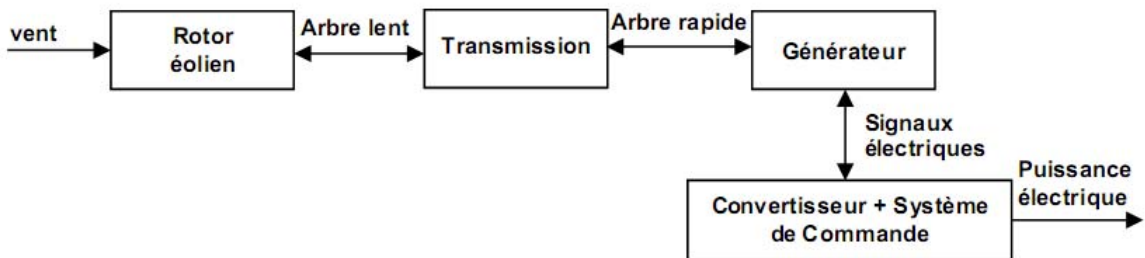


Figure I.3. Structure du système éolien

### I.2.3. Puissance extraite du vent

L'énergie cinétique  $dE$  d'une colonne d'air de longueur  $dl$ , de section  $S$ , de masse volumique  $\rho$  animée d'une vitesse  $v$  (figure I.4) s'écrit:

$$dE = \frac{1}{2} \rho S dl v^2 \quad (I.1)$$

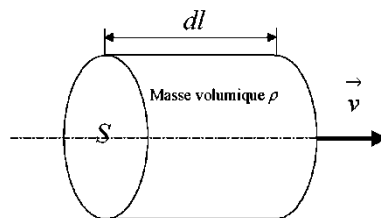


Figure I.4. Puissance du vent

En supposant  $dl = v dt$ , on déduit l'expression de la puissance  $P_0$

$$P_0 = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} \rho S v^3 \quad (I.2)$$

### I.3. CONVERSION AERODYNAMIQUE

Le rotor éolien est un système de conversion d'énergie qui transforme l'énergie cinétique des masses d'air en mouvement en énergie mécanique disponible sur l'arbre. Cette énergie cinétique est proportionnelle à la masse d'air qui se déplace à une vitesse donnée. L'extraction de l'énergie se fait donc par un ralentissement de l'air qui traverse le rotor, par un mécanisme de transformation des forces agissant sur les pales. Schématiquement, il en résulte que, selon les principes de la mécanique des fluides, la veine fluide traverse le moteur éolien en s'élargissant [GOU82] (Figure I.5).

Le comportement aérodynamique du rotor éolien peut être décrit par la théorie du disque actuateur [SPE98], en considérant que l'air est incompressible, que le fluide s'écoule de manière continue et que les grandeurs étudiées ont la même valeur sur une section donnée du tube de courant d'air [HEI00].

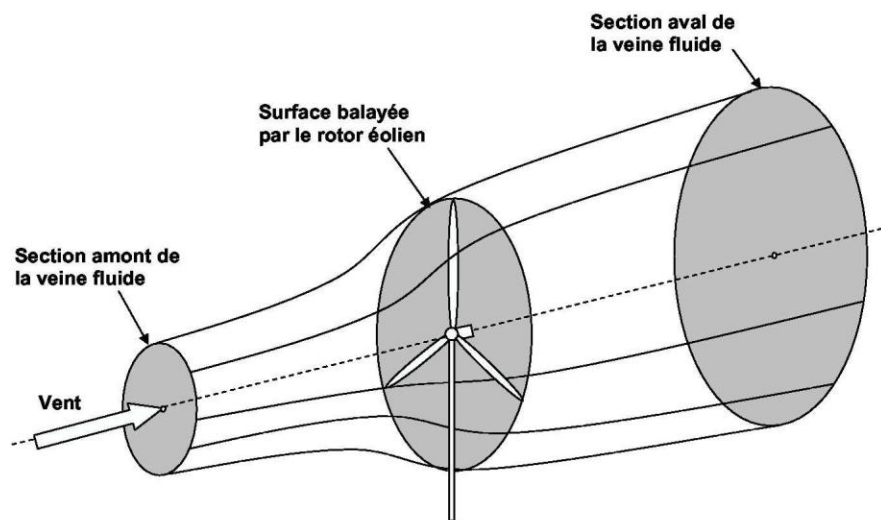


Figure I.5. Veine fluide traversant le rotor éolien

Pour capter l'énergie cinétique des masses d'air en mouvement, les pales du rotor éolien se présentent obliquement au vent avec un angle appelé angle de calage,  $\beta$  provoquant la rotation par un effet de vis ou de tire-bouchon.

La puissance qui peut être récupérée est décrite par l'équation :

$$P_T = \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \cdot C_p \quad (I.3)$$

Où  $\rho$  est la densité de l'air,  $R$  est le rayon du rotor éolien,  $v$  est la vitesse du vent et  $C_p$  est le coefficient de puissance (un paramètre sans dimension qui exprime l'efficacité du rotor éolien dans la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique). Ce coefficient est fonction de l'angle de calage  $\beta$  et de la vitesse spécifique  $\lambda$ , définie par :

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_T}{v} \quad (I.4)$$

Où  $\Omega_T$  est la vitesse de rotation du rotor éolien.

### I.3.1. Le coefficient de puissance (power coefficient)

On ne peut extraire en totalité la puissance fournie par le vent ( $P_0$ ), cela supposerait une vitesse de vent nulle après l'organe capteur. On définit le coefficient de puissance comme suit:

$$C_p = \frac{P_t}{\frac{1}{2}\rho.S.v^3} = \frac{P_t}{P_0} \quad (I.5)$$

Le coefficient  $C_p$  est variable, il est fonction de la vitesse du vent  $v$  et de la vitesse de rotation de la turbine  $\Omega_T$ . Il est souvent représenté en fonction du ratio de vitesse  $\lambda$ . La valeur maximale théorique possible du coefficient de puissance, appelée limite de Betz, est de 0,5926. En réalité, cette limite n'est pas atteinte et on définit alors le rendement aérodynamique:

$$\eta = \frac{27}{16} C_{p \max} \quad (I.6)$$

$C_{p \max}$  étant la valeur maximum que peut prendre le coefficient de puissance  $C_p$ . Cette valeur est associée à un ratio de vitesse nominal  $\lambda_{opt}$  pour laquelle la turbine a été dimensionnée suivant une vitesse de vent nominale  $v_n$  et une vitesse de rotation nominale  $\Omega_n$ . En pratique, la valeur du maximum du coefficient de puissance approche la valeur de 0,48 avec une turbine tripale. Ce qui donne un rendement aérodynamique de 81% pour les turbines éoliennes actuelles.

### I.3.2. Le coefficient de couple (torque coefficient)

Le coefficient de couple  $C_T$  est assez proche du coefficient de puissance  $C_p$ . Il est fort utile afin d'estimer la valeur des couples pour différents points de fonctionnement notamment à vitesse de rotation  $\Omega_T$  nulle. En effet, à rotor bloqué, il y a bien un couple sur l'arbre dû à la force du vent sur les pales mais la puissance est nulle, ce qui correspond à une valeur de  $C_p$  nulle pour une valeur de  $C_T$  non nulle. L'expression du couple est la suivante:

$$C_t = \frac{P_t}{\Omega_t} = \frac{R P_t}{\lambda v} = \frac{C_p}{\lambda} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^3 \cdot v^2 \quad (I.7)$$

La valeur du coefficient de couple  $C_T$  est déterminée par la formule qui suit :

$$C_T = \frac{C_p}{\lambda} = \frac{C_t}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^3 \cdot v^2} \quad (I.8)$$

Le coefficient  $C_T$  est, comme le coefficient  $C_p$ , fonction de la vitesse du vent  $v$  et de la vitesse de rotation de la turbine  $\Omega_T$ .

$$C_T = \frac{P_T}{\Omega_T} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v^3}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_T} = \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^3 \cdot v^2}{2 \cdot \lambda} \cdot C_p = \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^3 \cdot v^2}{2} \cdot C_T \quad (I.9)$$

Où  $C_T$  est le coefficient de couple. Ce dernier et le coefficient de puissance sont liés par la relation :

$$C_T(\lambda) = \lambda \cdot C_p(\lambda) \quad (I.10)$$

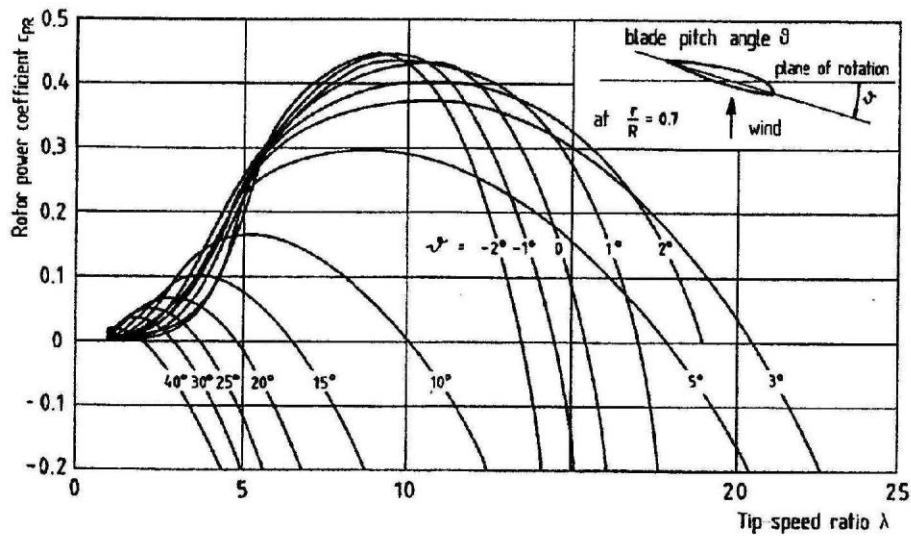
La modélisation du rotor éolien exige la connaissance de la caractéristique  $C_T(\lambda)$  dépendant des caractéristiques géométriques et du profil des pales. Cette expression peut être obtenue à partir de mesures en soufflerie ou par calcul numérique en utilisant la théorie de l'élément de pale [GOU82].



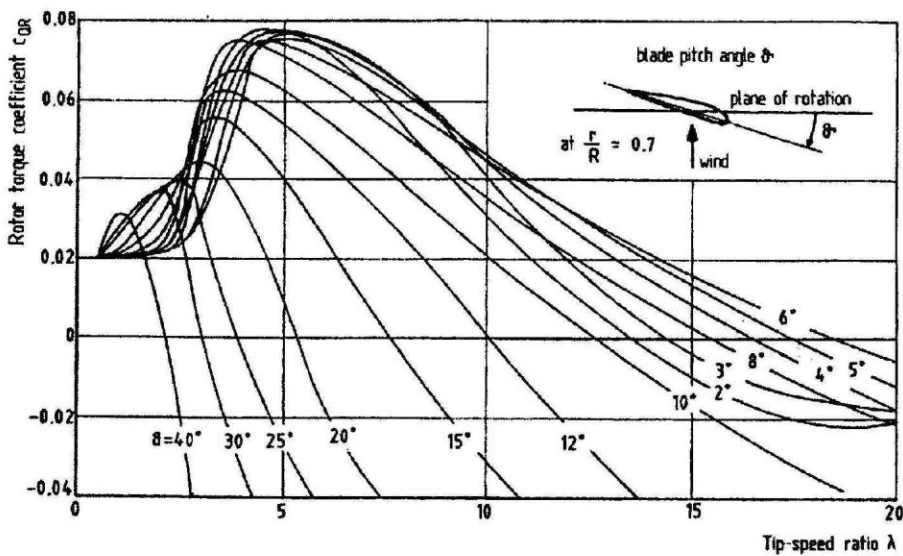
Cette courbe peut être obtenue par mesure ou par calcul peut être facilement approchée par régression polynomiale [VEC02].

### I.3.3. Courbes caractéristiques

Les turbines sont caractérisées par les courbes de  $C_p$  et  $C_T$  en fonction du ratio de vitesse  $\lambda$ . En général, les turbines disposent d'un système d'orientation des pales destiné à limiter la vitesse de rotation. L'allure des coefficients  $C_p$  et  $C_T$  change donc pour chaque angle de calage  $\beta$  comme représenté à la figure 1.6. On peut trouver dans la littérature des équations du coefficient de puissance [ADB00], [SLO03], [STR95].



(a)  $C_p = f(\lambda, \beta)$



(b)  $C_m = f(\lambda, \beta)$

Figure 1.6. Allure des coefficients  $C_p$  et  $C_m$  en fonction du ratio de vitesse  $\lambda$  et de l'angle de calage  $\beta$  [HAU06].

## I.4. TRANSMISSION

Tous les éléments de la transmission, c'est-à-dire l'arbre lent côté rotor éolien, le multiplicateur et l'arbre rapide côté générateur, sont inclus dans le bloc « Transmission ». Le multiplicateur transforme la vitesse lente de l'arbre du rotor éolien en une vitesse beaucoup plus élevée, compatible avec la plage de vitesse de fonctionnement du générateur électrique.

Le rotor éolien a un moment d'inertie beaucoup plus grand que celui du générateur électrique. Cette inertie agit lors des changements de vitesse en stockant l'énergie quand le rotor éolien accélère et en la restituant pendant la décélération. Ce phénomène s'oppose donc aux variations rapides de vitesse de rotation de l'arbre du rotor éolien. L'inertie agit ainsi comme un filtre passe-bas [PET01].

Certains travaux proposent des modèles complexes permettant de modéliser la dynamique des systèmes de transmission flexible. Un modèle à six masses a été proposé par [PAP01][MAR02]. Les six masses correspondent aux inerties des trois pales du rotor éolien et aux inerties du moyeu, du multiplicateur et du générateur.

D'autres auteurs proposent une simplification du modèle à six masses en réduisant leur nombre à deux. Une masse correspond à l'inertie du rotor éolien et l'autre, plus petite, correspond à l'inertie du générateur. Cette représentation permet de modéliser la première fréquence de résonance du train de puissance [CAM03]. Le modèle retenu pour cette étude est le modèle rigide [SON00][ROG04]. Celui-ci décrit la transmission à l'aide de l'inertie du rotor éolien,  $J_T$ , l'inertie du générateur,  $J_g$ , et d'un multiplicateur avec un rapport de multiplication  $G$ . Tous les paramètres utilisés pour modéliser la transmission sont ramenés à l'axe lent.

## I.5. CONCEPTION DES TURBINES EOLIENNES

### L'organe capteur

Le but de l'organe capteur est de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

Pour des raisons de conversion d'énergie électromécanique, on cherche à obtenir un mouvement de rotation.

Les organes capteurs sont en général classés selon deux catégories [LEC01]

- les capteurs à axe vertical,

- les capteurs à axe horizontal.

Chaque catégorie possède ses avantages et inconvénients, cependant les éoliennes à axe horizontal sont les plus répandues. Notons que les éoliennes à axe horizontal sont obligées de s'orienter dans la direction du vent.[LEC 04]

Les éoliennes utilisant des organes capteurs à axe horizontal sont les plus répandues car leur rendement est supérieur [LEC01], [MAR] (figure 1.7). Ce sont les descendantes directes des moulins à vent. Dans la suite du mémoire, on parlera uniquement d'éoliennes à axe horizontal.

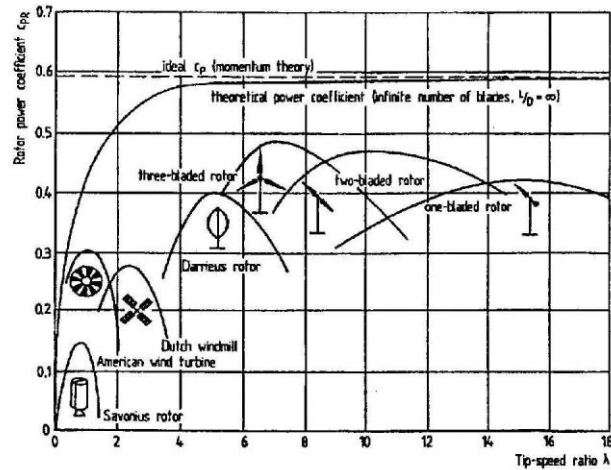


Figure 1.7. Coefficients de puissance de divers éoliennes.

La majorité de ces éoliennes possèdent 3 pales. Théoriquement, plus le nombre de pale est élevé, meilleur est le rendement aérodynamique. On augmente alors le coefficient de puissance de 10 % en passant d'une pale à deux, de 3 % en passant de deux à trois, de 1 % en passant de trois à quatre, etc ... (figure 1.8(a)). Une turbine possédant 3 pales est dynamiquement plus stable et a un meilleur impact visuel. Une turbine équipée d'une seule pale nécessite un contrepoids. Pour une turbine à 2 pales, des vibrations cycliques importantes peuvent apparaître lorsque la nacelle cherche à suivre le vent et que les pales sont à l'horizontale. Aussi, le couple de torsion sur l'arbre est beaucoup plus important dans le cadre d'éoliennes possédant une seule pale (figure 1.8(b)).

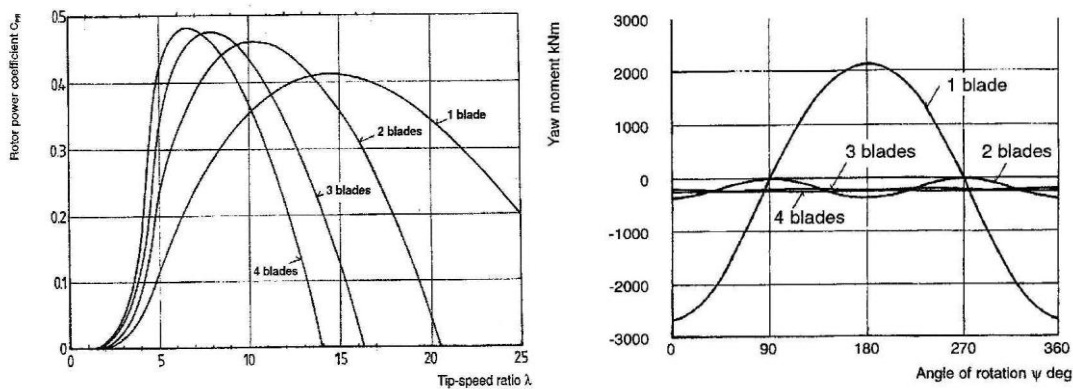


Figure 1.8. Influence du nombre de pales [HAU06].

## I.6. EOLIENNE A AXE HORIZONTAL ET A AXE VERTICAL

### I.6.1. Eolienne à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ressemblent un peu aux roues hydrauliques. En fait, certaines éoliennes à axe vertical pourraient également fonctionner avec un axe horizontal, mais il est peu probable qu'elles soient aussi efficaces qu'une éolienne munie d'un rotor du type hélice. La seule éolienne à axe vertical qui n'a jamais été fabriquée commercialement est l'éolienne de Darrius, nommée d'après l'ingénieur français Georges Darrius qui breveta la conception en 1931. La compagnie américaine FloWind fabriqua

## Chapitre 1

l'éolienne jusqu'à son faillite en 1997. L'éolienne de Darrieus est caractérisée par ses pales de rotor en forme de C qui la font ressembler un peu à un fouet à œufs. Elle est normalement construite avec deux ou trois pales. Les avantages théoriques d'une éolienne à axe vertical sont les suivants :

1. Elle permet de placer la génératrice, le multiplicateur, ... à terre, et on n'a pas besoin de munir la machine d'une tour.
2. Un mécanisme d'orientation n'est pas nécessaire pour orienter le rotor dans la direction du vent.

Les inconvénients principaux sont les suivants :

1. Les vents sont assez faibles à proximité de la surface du sol. Le prix d'omettre une tour est donc des vents très faibles sur la partie inférieure du rotor.
2. L'éolienne ne démarre pas automatiquement. (Ainsi, il faut par exemple pousser les éoliennes de Darrieus pour qu'elles démarrent. Cependant, ceci ne constitue qu'un inconvénient mineur dans le cas d'une éolienne raccordée au réseau, étant donné qu'il est alors possible d'utiliser la génératrice comme un moteur absorbant du courant du réseau pour démarrer l'éolienne).
3. Pour faire tenir l'éolienne, on utilise souvent des haubans ce qui est peu pratique dans des zones agricoles exploitées intensivement.
4. Pour remplacer le palier principal du rotor, il faut enlever tout le rotor. Ceci vaut tant pour les éoliennes à axe vertical que pour celles à axe horizontal, mais dans le cas des premières, cela implique un véritable démontage de l'éolienne entière.
5. Les éoliennes à axe vertical ont été prometteuses dans les années 80 et au début des années 90, mais elles ont très vite disparu du marché du fait de leur faible rendement et des fluctuations importantes de puissance provoquées.

### **I.6.2. Eolienne à axe horizontal**

Aujourd'hui, la majorité des éoliennes commerciales sont à axe horizontal. La raison est bien simple : toutes les éoliennes commerciales raccordées au réseau sont aujourd'hui construites avec un rotor du type hélice, monté sur un axe horizontal.

#### ***I.6.2.1. Conception bipale (avec un rotor basculant)***

Le grand avantage des éoliennes bipales par rapport aux éoliennes tripales est le fait qu'elles permettent d'économiser le coût d'une pale de rotor, ainsi que le poids de celle-ci bien évidemment.

Les éoliennes bipales ont cependant eu certaines difficultés à pénétrer le marché, entre autres parce qu'il leur faudra une vitesse de rotation bien plus élevée pour produire la même quantité d'énergie qu'une éolienne tripale, ce qui constitue un inconvénient tant à l'égard du bruit que de l'impact visuel. Actuellement, plusieurs fabricants d'éoliennes bipales ont donc choisi de passer à la production d'éoliennes tripales. La conception d'une éolienne mono-ou bipale est en fait très complexe vu qu'elle doit être munie d'un rotor basculant, il doit pouvoir basculer pour éviter que l'éolienne ne reçoive des chocs trop forts chaque fois qu'une pale de rotor passe devant la tour de l'éolienne. Le rotor est donc monté sur un arbre, perpendiculaire à l'arbre principal et tournant avec celui-ci. En outre, cette disposition requiert parfois des amortisseurs de choc supplémentaires afin d'empêcher les pales du rotor d'entrer en collision avec la tour.

Mais la société Vergnet a bien pari sur l'éolienne bipale car cette dernière est bien adaptée sur les zones cycloniques. Grâce à une conception innovante et particulièrement astucieuse, le transport, l'installation et la maintenance de la GEV HP sont étonnamment simples en comparaison d'une éolienne conventionnelle puisque la bipale a l'avantage que son rotor peut être mis à terre contrairement au tripale et aussi il est plus léger.

### I.6.2.2. Conception monopale

Il existe également des éoliennes monopales, et elles permettent effectivement d'économiser le coût d'une pale de plus. Toutefois, les éoliennes monopales commerciales sont assez rares, pour les mêmes raisons que celles citées ci-dessus, les problèmes étant cependant encore plus prononcés que dans le cas des éoliennes bipales. Outre une vitesse de rotation plus élevée et des problèmes de bruit et d'impact visuel, l'inconvénient de ce type d'éolienne est que, pour équilibrer le rotor, il faudra munir l'éolienne d'un balancier du côté du moyeu opposé à la pale. Cette disposition annule évidemment les économies de poids.

## I.7. LES EOLIENNES A VITESSE VARIABLE

Le générateur électrique transforme l'énergie mécanique en énergie électrique. Les générateurs disponibles dans le commerce installés actuellement sont le générateur asynchrone à cage de d'écureuil, le générateur doublement alimenté, le générateur synchrone à excitation bobinée, et le générateur synchrone à un aimant permanent. Basé sur la vitesse de rotation, généralement les éoliennes peuvent être classées en deux types :

- Eolienne à vitesse Fixe
- Eolienne à vitesse variable

La configuration électrique d'un aérogénérateur a une influence sur son fonctionnement. Le fait qu'une éolienne a vitesse fixe ou à vitesse variable dépend de cette configuration.

### I.7.1. Eolienne à vitesse fixe

Les premières éoliennes de grande puissance mises en œuvre reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage directement couplée sur le réseau électrique (Figure I.9). Cette machine est entraînée par un multiplicateur et sa vitesse est maintenue approximativement constante par un système mécanique d'orientation des pales (pitch control).

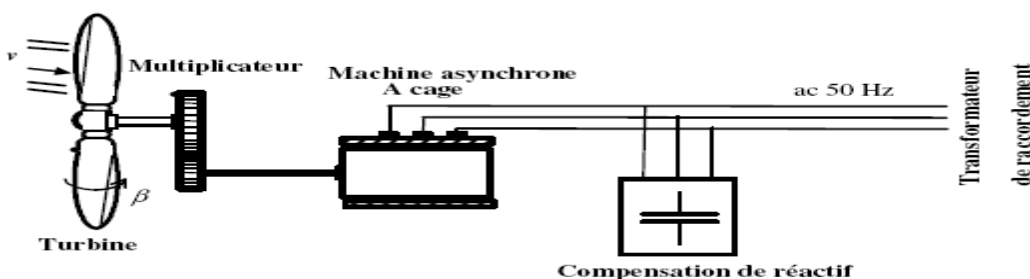


Figure I.9. Eolienne à vitesse fixe.

La caractéristique de réglage théorique puissance-vitesse du vent est représentée en trait continu à la Figure I.10, pour une éolienne de 300 kW. La dynamique relativement lente du pitch control (plusieurs dizaines de seconde) et les variations rapides de la vitesse du vent amènent ce type d'éolienne à suivre approximativement la caractéristique de réglage, comme illustré par les points

reportés sur la Figure I.10, mesurés sur une éolienne réelle (de l'ancien site éolien de Dunkerque). La Figure I.11 montre un enregistrement de la puissance générée par cette éolienne soumise à un vent moyen de 12 m/s. Cet enregistrement, qui illustre le caractère très fluctuant de la puissance générée par ce type d'éolienne, montre que cette puissance peut subir des variations de plus de 100 kW en 3 secondes et que la puissance nominale peut être dépassée de plus de 10 %. Ce type d'éolienne n'offre donc quasiment pas de possibilité de réglage de la puissance générée, d'autant plus que la connexion directe au réseau d'une génératrice asynchrone nécessite l'ajout de bancs de condensateurs afin de limiter la puissance réactive appelée à ce réseau.

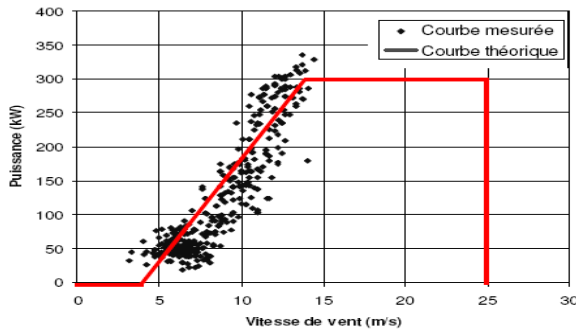


Figure I.10. Caractéristique de réglage d'une éolienne.

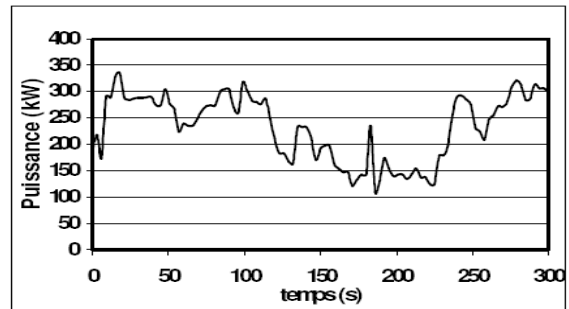


Figure I.11. Puissance générée par l'éolienne.

### I.7.2. Eolienne à vitesse variable basée sur une machine synchrone

Les éoliennes basées sur une génératrice asynchrone à rotor bobiné présentent l'inconvénient de nécessiter un système de bagues et de balais et un multiplicateur, induisant des coûts significatifs de maintenance en particulier pour les projets off-shore situés en milieu salin. Pour limiter ces inconvénients, certains constructeurs ont développé des éoliennes basées sur des machines synchrones à grand nombre de paires de pôles et couplées directement à la turbine, évitant ainsi le multiplicateur. Si, de plus, la génératrice est équipée d'aimants permanents ; le système de bagues et de balais est éliminé. L'inconvénient de cette structure, représentée à la Figure 39, est qu'elle nécessite pour sa connexion au réseau, des convertisseurs de puissance dimensionnés pour la puissance nominale de la génératrice. Cet inconvénient est cependant un avantage du point de vue du contrôle de l'éolienne. En effet, l'interfaçage avec le réseau peut être entièrement contrôlé via le convertisseur connecté à ce réseau, tandis que le convertisseur connecté à la génératrice permet de contrôler la puissance générée par celle-ci en limitant le pitch control à une fonction de sécurité par grand vent.

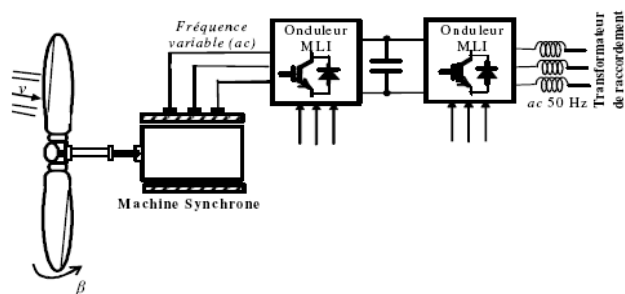


Figure I.12. Eolienne à vitesse variable basée sur une machine synchrone à grand nombre de paires de pôles.

### I.7.3. Type Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA)

Sur la caractéristique en puissance d'une turbine (Fig. I.13), le lieu du point représentant le maximum de la puissance convertie (représenté par la courbe en pointillés) peut être obtenu et parcouru en adaptant la vitesse de la turbine (courbe épaisse). Ainsi, afin de maximiser la puissance convertie, la vitesse de la turbine doit donc être adaptée par rapport à la vitesse du vent. C'est pourquoi les éoliennes de forte puissance raccordées aux réseaux moyenne et haute tension fonctionnent de plus en plus fréquemment à vitesse variable. Les principaux avantages des éoliennes à vitesse variable comparés aux générateurs à vitesse fixe sont les suivants :

- Elles augmentent la plage de fonctionnement, notamment pour les faibles vitesses de vent où le maximum de puissance est converti. Indirectement la disponibilité et la puissance générée du système sont augmentées.
- Elles nécessitent un système d'orientation des pales simplifié. En effet, la possibilité de contrôler la vitesse du générateur via le couple électromagnétique permet de réduire le rôle du système d'orientation des pales, qui interviendra essentiellement pour limiter la vitesse de la turbine et la puissance générée en présence de vitesses de vent élevées. En conséquence, pour de faibles vitesses de vent, l'angle d'orientation des pales devient fixe.

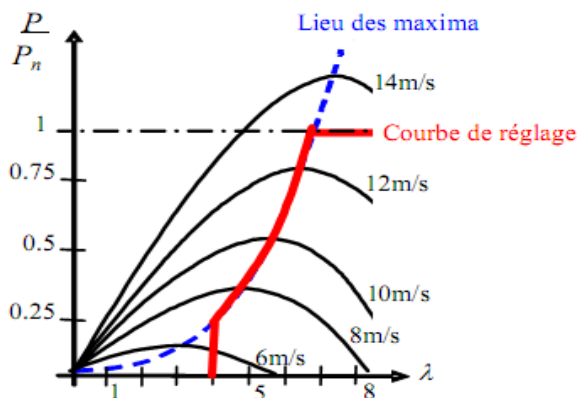


Figure I.13. Caractéristique en puissance d'une turbine.

- Elles réduisent les efforts mécaniques de par le fait que lors de variations du vent, la vitesse de la turbine est adaptée. L' "élasticité" ainsi créée permet d'amoindrir l'incidence des rafales de vent sur la puissance générée pour ce domaine de fonctionnement.
- Elles réduisent le bruit lors des fonctionnements à faible puissance car la vitesse est alors lente.
- Elles permettent une meilleure intégration de l'éolienne dans le réseau électrique.

Pour les générateurs à base de machine asynchrone, la différence entre la vitesse mécanique,  $\Omega$ , et la vitesse dite synchrone (imposée par la fréquence du réseau),  $\Omega_s$ , est définie par le glissement

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s}$$

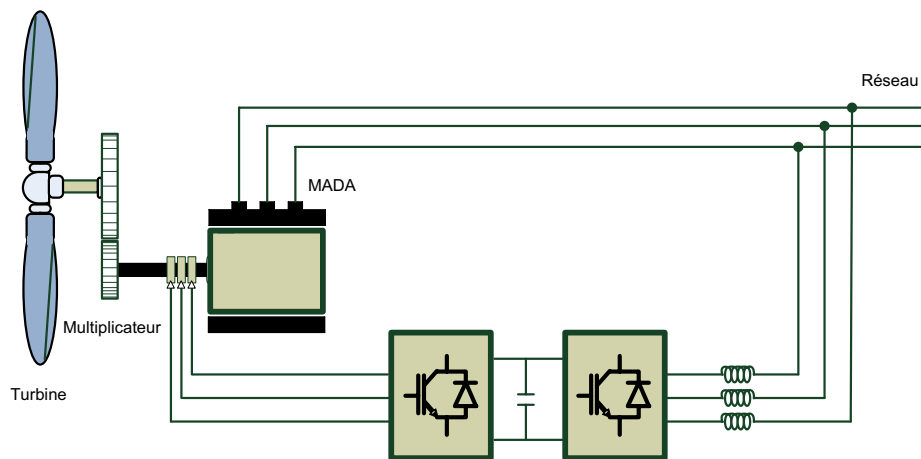


Figure I.14. Une turbine à base de MADA.

Le glissement est fonction de la résistance que présente le circuit rotorique. Ainsi, pour les machines à circuit rotorique bobiné, une façon de rendre variable la vitesse mécanique de ce générateur est de rendre variable le glissement en modifiant la résistance du circuit rotorique. Plutôt que de dissiper cette puissance, il est beaucoup plus intéressant de la renvoyer sur le réseau au moyen de deux convertisseurs d'électroniques de puissance reliés par un bus continu. Le circuit rotorique est rendu accessible grâce à un système de balais-bagues. En conséquence, la puissance transitant à travers le circuit rotorique est rendue variable et deux fonctionnements peuvent être distingués. Si la vitesse mécanique est supérieure à la vitesse synchrone ( $g < 0$ ,  $\Omega > \Omega_s$ ), un fonctionnement hypersynchrone est obtenu pour lequel la puissance est extraite du circuit rotorique et est envoyée sur le réseau à travers les convertisseurs de puissance. Sinon ( $g > 0$ ,  $\Omega < \Omega_s$ ), un fonctionnement hyposynchrone est obtenu et la puissance circule alors du réseau vers le circuit rotorique. Seule une variation de la vitesse de +/-30 % (correspondant à la valeur du glissement  $g$ ) autour de la vitesse de synchronisme est acceptable ; ceci va engendrer une limitation de la puissance circulant dans le circuit rotorique ( $|g.P|$ ). Comme seule une fraction de la puissance est rendue variable, la chaîne de conversion électronique est dimensionnée pour une moindre puissance et présente donc un coût réduit. Le facteur de puissance peut être réglé car la génératrice peut être contrôlée pour fonctionner de façon similaire à celui d'un alternateur synchrone. En effet, la puissance active et la puissance réactive peuvent être contrôlées de façon indépendante grâce au convertisseur connecté sur le circuit électrique du rotor. La Fig. I.15 montre les zones de fonctionnement caractéristiques mesurées sur une éolienne de 1,5 MW :

- La zone 1, où  $P = 0$  (la turbine ne fonctionne pas),
- La zone 2 est la zone pour laquelle une extraction maximale de la puissance est réalisée en adaptant la vitesse de la génératrice. La vitesse mécanique est très variable et correspond à une grande plage de variation de la puissance électrique produite. L'angle de calage des pales est maintenu constant, et seul le contrôle du couple électromagnétique de la génératrice est mis en œuvre dans cette zone. la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent.
- La zone 3 correspond à une vitesse mécanique quasiment constante de la génératrice. Dans cette zone la puissance générée est proportionnelle au couple (d'origine éolien) appliqué. La vitesse moyenne de la



## Chapitre 1

turbine est réglée par action sur l'orientation des pales, la puissance débitée au réseau est « lissée » impliquant un stockage inertiel dans les masses en rotation.

- Pour la zone 4, la puissance est limitée à sa valeur maximale grâce au système d'orientation des pales.

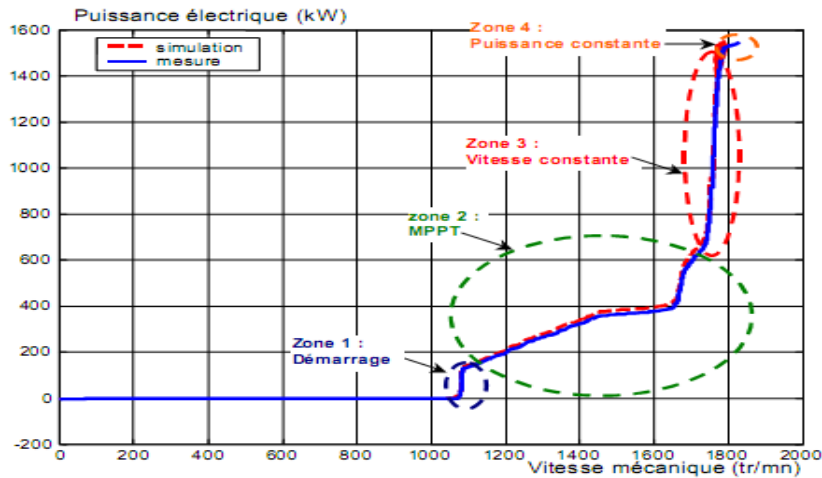


Figure I.15. Zone de fonctionnement.

Le contrôle de la puissance générée peut donc être réalisé en agissant sur l'orientation des pales, mais aussi en contrôlant le couple de la génératrice asynchrone au moyen du convertisseur de puissance connecté au rotor de celui-ci. Le contrôle de la puissance générée est dès lors nettement plus précis comme illustré sur la caractéristique puissance-vitesse du vent mesuré. La Fig. I.16 représente la puissance générée par l'éolienne soumise à un vent variant entre 2 et 16 m/s. On peut remarquer que la puissance maximale n'est pas dépassée. [CAM03] [ELA04] [ELM06]

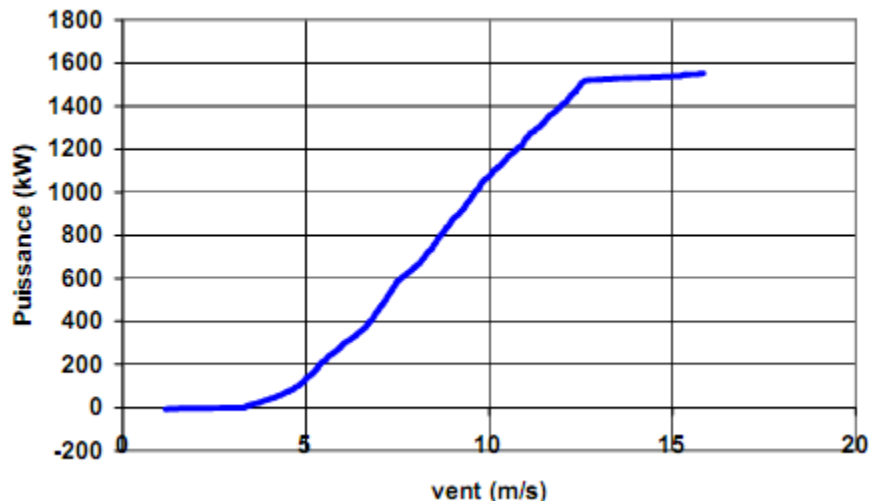


Figure I.16. Puissance générée par l'éolienne 1.5MW.

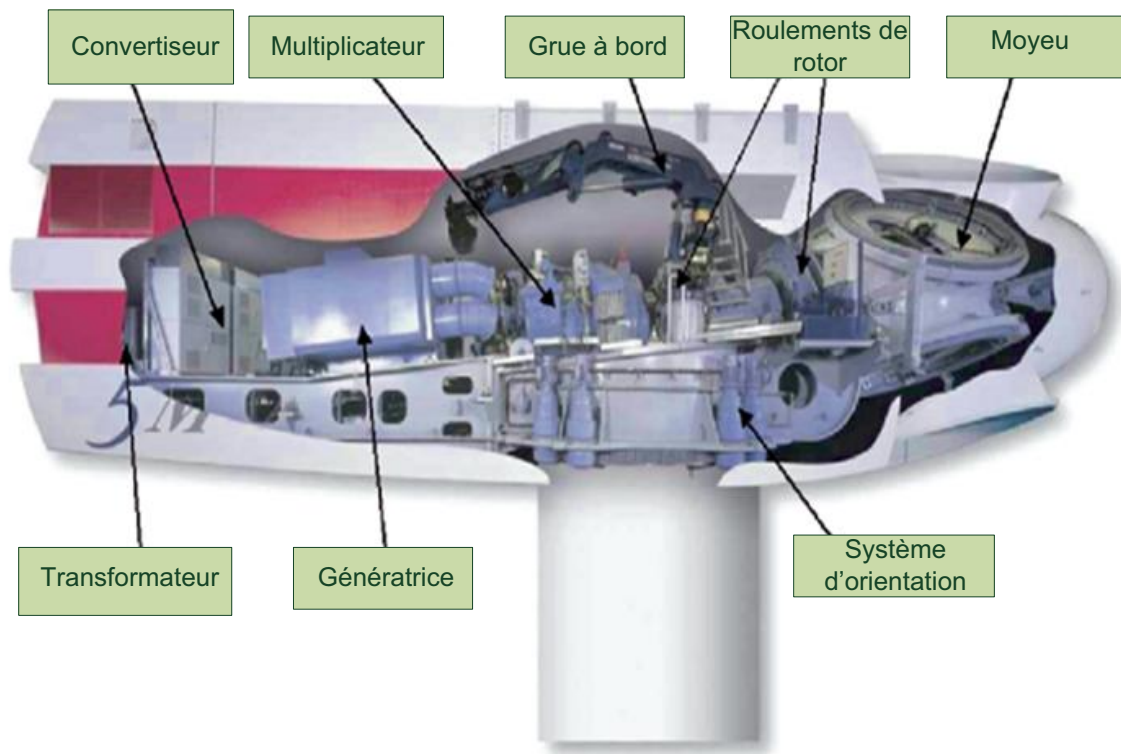
Il existe également une technologie d'éolienne basée sur une génératrice asynchrone à rotor bobiné dans laquelle les bobinages rotoriques sont reliés à une résistance de dissipation via un redresseur à thyristor. Cette structure simplifiée permet un réglage limité de la vitesse, offre peu de possibilité de réglage de la puissance générée et présente un rendement moindre sur la plage de fonctionnement [ACK05] [LAV04].

## I.8. PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES DIFFERENTES STRUCTURES DE PRODUCTION

Type d'éolienne	Avantages	Inconvénients
MAS Vitesse Fixe	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Machine robuste</li> <li>. Faible coût</li> <li>. Pas d'électronique de puissance</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Puissance extraite non optimisée</li> <li>. Maintenance boîte de vitesse</li> <li>. Pas de contrôle de l'énergie réactive</li> <li>. Magnétisation de la machine imposée par le réseau</li> </ul>
MADA Vitesse Variable	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Fonctionnement à vitesse variable</li> <li>. Puissance extraite optimisée</li> <li>. Electronique de puissance dimensionnée à 30% de la puissance nominale</li> <li>. Machine standard</li> <li>. Connexion de la machine plus facile à gérer</li> <li>. Une magnétisation de la machine gérée en cas de défaut sur le réseau</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Maintenance boîte de vitesse</li> <li>. Prix de l'électronique de puissance.</li> <li>. Contrôle – commande complexe</li> <li>. Contact glissant bagues - balais</li> </ul>
MSAP Vitesse Variable	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Fonctionnement à vitesse variable sur toute la plage de vitesse</li> <li>. Puissance extraite optimisée pour les vents faibles.</li> <li>. Connexion de la machine facile à gérer</li> <li>. Possibilité d'absence de boîte de vitesse</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Prix de l'électronique de puissance</li> <li>. Machine spécifique</li> <li>. Grand diamètre de machine</li> <li>. Electronique de puissance dimensionnée pour la puissance nominale de la génératrice</li> </ul>

Type d'éolienne	Interface réseau	Moyen de Contrôle	Fonctionnement possible	Services système
MAS Vitesse Fixe	<ul style="list-style-type: none"> <li>. (Facultatif)</li> <li>. Gradateur</li> <li>. Bancs de condensateurs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Pitch control</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Contrôle P approximatif</li> <li>. Contrôle Q approximatif si Condensateur</li> </ul>	NON
MADA Vitesse Variable	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Convertisseur électronique AC / AC au rotor (AC/DC puis DC/AC)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Pitch control</li> <li>. Couple génératrice</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Contrôle de P</li> <li>. Contrôle de Q</li> </ul>	Participation limitée au : <ul style="list-style-type: none"> <li>. Réglage de la fréquence</li> <li>. Réglage de la tension tant qu'il y a du vent</li> </ul>
MSAP Vitesse Variable	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Convertisseur électronique AC/AC au stator (AC/DC puis DC/AC)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Pitch control (ou stall)</li> <li>. Couple génératrice</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Contrôle de P</li> <li>. Contrôle de Q</li> <li>. Fonctionnement en isolé</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Réglage de la fréquence</li> <li>. Réglage de la tension</li> <li>. Ilotage tant qu'il y a du vent.</li> </ul>

## I.9. CARACTERISTIQUES TECHNOLOGIQUES DES EOLIENNES A AXE HORIZONTAL



### I.9.1. Le Mâts (pylônes)

Les mâts peuvent être réalisés en acier ou en béton armé. Ils peuvent être autoporteurs et auto résistants ou haubanés, ils doivent être de hauteur importante pour bénéficier au maximum de l'énergie de vent.

Actuellement les mats en caisson, souvent en acier et fortement ancrés au sol, sont très répandus pour les éoliennes de forte puissance.

Pour les supports autoporteurs, ils doivent être correctement calculés de façon à résister au moment dû à la trine en tête du support pour les vents forts et à ce que les fréquences propres soient bien découplées des fréquences d'excitations dues à l'aérogénérateur.

Les pylônes des machines à axe vertical sont courts, entre 0,1 et 0,5 fois la hauteur du rotor. Ils sont le plus souvent du type haubané.

Les problèmes de corrosion et de montage sont les paramètres principaux dans le choix de la solution à adopter.

### I.9.2. Rotor

Le rotor ou l'hélice d'une éolienne est constitué de pales montées sur un moyeu, il assure une fonction essentielle : transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. L'énergie captée par l'éolienne est en fonction de la surface balayée par l'hélice et la vitesse de vent. Plus le diamètre du rotor est grand et plus la surface balayée est importante.

### **I.9.3. Moyeu**

En générale c'est une pièce d'acier moulé, il reçoit les pales sur des brides normalisés et se monte sur l'arbre lent d'entrée du multiplicateur .pour sa conception on utilise les éléments finis. Il est souvent protégé par une coupe en polyester forme d'obus qui a une forme aérodynamique (plus esthétique que fonctionnelle).

### **I.9.4. Les pales**

Les pales sont une partie très importante des éoliennes. De leur nature dépendront le bon fonctionnement et la durée de vie de la machine ainsi que le rendement du moteur éolien. Plusieurs éléments caractérisent ces pales :

- la longueur
- la largeur
- le profil
- les matériaux
- le nombre

Parmi ces éléments, certains sont déterminés par les hypothèses de calcul, puissance et couple et d'autres sont choisis en fonction de critères tels que : coûts, résistance au climat,

#### **I.9.4.1. Longueur**

Le diamètre de l'hélice est fonction de la puissance désirée. La détermination de ce diamètre fixe aussi la fréquence de rotation maximum, que l'hélice ne devra pas dépasser pour limiter les contraintes en bout de pales dues à la force centrifuge. Il est essentiel de prendre en compte le travail en fatigue des pales et les risques de vibrations, surtout pour les très longues pales.

Pour les roues à marche lente, ayant une inertie importante, le diamètre reste limité à 8 m à cause de leur comportement lors de rafales de vent. Pour les roues à marche rapide, la longueur des pales peut être grande, supérieure à 30 m.

#### **I.9.4.2. Largeur**

La largeur des pales intervient pour le couple de démarrage qui sera d'autant meilleur que la pale sera plus large. Mais pour obtenir des vitesses de rotation élevées, on préférera des pales fines et légères. Le résultat sera donc un compromis.

#### **I.9.4.3. Le profil**

Il est choisi en fonction du couple désiré. Pour la plupart des aérogénérateurs de moyenne et de faible puissance, les pales ne sont pas vrillées. Par contre, pour la plupart des machines de grande puissance ( $\geq 100$  kW), elles le sont, c'est-à-dire qu'elles prennent la forme d'une hélice. Les caractéristiques des différents profils sont déterminées en soufflerie. Ils ont en général été étudiés pour l'aviation (ailes ou hélices).

#### ***1.9.4.4. Les matériaux***

Les matériaux utilisés pour la réalisation des pales sont variés et ont bénéficié de nombreux progrès, particulièrement ceux dus aux pales d'hélicoptère. Contrairement à ce que l'on croit fréquemment, ce n'est pas dans le domaine de l'aérodynamique que réside la difficulté mais bien dans celui de la construction et de la résistance des matériaux. En effet, c'est dans le mode de réalisation des pales qu'il y a le plus à faire pour augmenter la sécurité de marche.

Les matériaux utilisés pour la réalisation des pales sont donc essentiels et doivent répondre à plusieurs exigences : ils doivent être assez légers, résistants à la fatigue mécanique, à l'érosion et à la corrosion, et de mise en œuvre ou d'usinage simple. On rencontre plusieurs types de matériaux :

- le bois : il est simple, léger, facile à travailler et il résiste bien à la fatigue mais il est sensible à l'érosion, peut se déformer et est réservé pour des pales assez petites.
- le lamellé-collé : c'est un matériau composite constitué d'un empilement de lamelles de bois collées ensemble. Il est possible de réaliser des pales jusqu'à 5 à 6 m de longueur ayant une bonne tenue en fatigue.
- les alliages d'aluminium pour des pales allant principalement jusqu'à 20 m de longueur.
- les matériaux composites : leur intérêt est de permettre la réalisation de toutes les formes et dimensions, ainsi que d'obtenir les caractéristiques mécaniques exactes recherchées : pale vrillée, corde évolutive, changement de profil.

#### ***1.9.4.5. Nombre de pales***

Les éoliennes à marche lente ont en général entre 20 et 40 ailettes et ont un couple de démarrage proportionnel au nombre de pales et au diamètre ; leur rendement par rapport à la limite de Betz est faible car leur vitesse en bout de pale est limitée.

Les éoliennes à marche rapide sont généralement bipales ou tripales. La roue bipale est la plus économique et la plus simple mais elle est génératrice de vibrations qui peuvent être importantes. La roue tripale présente moins de risques de vibrations, d'où fatigue et bruit plus faibles, mais elle est plus compliquée et plus lourde.

#### ***1.9.4.6. Systèmes de protection et de régulation***

Quel que soit le type d'aéromoteur, il est nécessaire pour éviter sa destruction lorsque les vents sont trop violents qu'il soit équipé d'un système permettant de diminuer les contraintes mécaniques sur la machine.

Les systèmes peuvent agir de façons différentes et plus ou moins fines avec un degré d'automatisme nul ou intégral.

### **I.9.5. Le multiplicateur**

Les rotors dont le diamètre est supérieur à 5 m ont des vitesses de rotation trop faibles pour pouvoir entraîner directement un alternateur classique. Il est donc indispensable pour ces machines d'interposer entre l'aéromoteur et l'alternateur un multiplicateur.

3 types de multiplicateurs peuvent être utilisés avec les aéromoteurs :

- Le plus simple est le multiplicateur à engrenages à un ou plusieurs trains de roues dentées cylindriques ; d'une réalisation économique il est tout de même encombrant pour un rapport de multiplication élevé.
- L'utilisation de trains planétaires permet de réaliser des multiplications élevées sous un encombrement réduit. Leur utilisation se généralise ; cette technique permet de réaliser des rapports de multiplication élevés sous un encombrement réduit et avec un bon rendement de transmission. Les axes d'entrée et de sortie sont colinéaires voir coaxiaux.
- Le réducteur à couple conique permet une disposition de l'arbre de sortie perpendiculaire à l'arbre d'entrée.

## **I.10. MISE EN ŒUVRE DES EOLIENNES**

### **I.10.1. Recherche du rendement maximum MPPT**

Les éoliennes utilisées pour la production d'électricité doivent permettre de produire un maximum de puissance en exploitant au mieux l'énergie disponible dans le vent. C'est pour cela que de nombreux systèmes de commande de l'éolienne, agissant au niveau de la partie mécanique ou électrique, sont développés pour maximiser la conversion d'énergie.

On parle alors de recherche du point de fonctionnement à puissance maximum (MPPT) [ELA03], [EFT06], [HOF01]. Ces systèmes utilisent différents moyens afin d'obtenir ce point de puissance maximum. Il est possible de modifier l'angle de calage des pales, ou la vitesse de rotation de l'hélice ou bien encore jouer sur la commande de la génératrice.

La recherche du maximum se fait en permanence et l'éolienne s'adapte donc à chaque variation de vent pour être dans une configuration d'extraction maximale de puissance. De tels systèmes incorporent aussi des sécurités qui permettent par exemple de limiter la puissance produite lorsque le vent devient trop important et risque d'endommager l'éolienne.

### **I.10.2. Eolienne autonome**

Les éoliennes autonomes sont utilisées dans des gammes de puissances de quelques dizaines de Watts à quelques dizaines de KW pour l'alimentation d'appareils électriques d'instrumentation ou d'éclairage. Les plus petites éoliennes sont utilisées pour les bateaux, le camping ou les stations météo. Des machines de plus forte puissance sont utilisées, quant à elles, pour la production destinée à alimenter en énergie électrique des chalets isolés ou encore des villages [CHR02].

Les points communs entre toutes ces productions éoliennes sont leur faible puissance et leur association à une unité de stockage d'énergie, généralement constituée de batteries d'accumulateur.

## Chapitre 1

L'éolienne charge les batteries par la tension continue produite soit directement par une génératrice à courant continu pour les plus faibles puissances, soit par une génératrice de type synchrone, à aimants ou bobinée, via un pont redresseur et une électronique plus ou moins élaborée pour réguler leur charge.

La tension continue des batteries est ensuite utilisée soit directement pour de l'éclairage en tension continue ou alors mise en forme par un onduleur pour obtenir une alimentation sinusoïdale 50Hz permettant l'utilisation de tous les appareils électriques classiques.

### **I.10.3. Eolienne isolée raccordée au réseau**

Les éoliennes isolées connectées au réseau de distribution sont souvent en fonctionnement pour tester le potentiel éolien du site considéré, ou appartiennent à des industriels ou des privés qui produisent leur propre électricité et revendent l'excédent au distributeur local.

Ce type de production décentralisée se rencontre de plus en plus avec le développement des primes et autres aides à la production d'énergie électrique *propre*. Le prix de rachat du kWh étant important, cela facilite et encourage le développement de l'éolien

Les puissances de ces éoliennes peuvent varier, selon qu'il s'agit d'un exploitant privé ou d'industriel, de 50 kW à 5 MW pour les plus récentes éoliennes du marché. Les amortissements qui s'étalent normalement sur 20 à 30 années sont considérablement réduits par toutes les aides. Une telle installation peut être rentable en 10 à 15 ans.

Ces éoliennes fonctionnent en permanence et ont, le plus souvent, besoin d'être raccordées à un réseau puissant, dans le cas d'utilisation de génératrices asynchrones par exemple. Il n'y a pas d'unité de stockage pour ce type de production et la puissance produite fluctue beaucoup au gré du vent.[BOY06]

### **I.10.4. Parc éolien important**

En ce qui concerne les parcs éoliens, aussi appelés fermes éoliennes, on peut rencontrer différentes structures d'éoliennes, de génératrices et de modes de connexion au réseau. Pour ce qui est des modes de raccordement, il peut y avoir différentes stratégies selon la situation du parc et la technologie employée.

Principalement, on peut observer les structures suivantes :

- les éoliennes raccordées, une à une, directement au réseau de distribution ou de transport.
- les éoliennes connectées ensemble par un bus continu, alimentant un onduleur assurant la connexion avec le réseau.
- des solutions mixtes existent afin d'avoir des onduleurs de taille modérée fonctionnant proche de leurs charges nominales.

Ces parcs peuvent se situer sur terre comme en mer. Ainsi, une partie du transport de l'énergie peut être faite par un bus continu qui relie le parc éolien au littoral où peut se situer l'onduleur pour le raccordement au réseau.

L'agrégation de l'énergie éolienne fournit un effet positif important sur l'opération de système d'alimentation et la qualité de puissance. Le schéma suivant montre le principal de la production agrégée d'énergie éolienne. L'effet positif de l'agrégation d'énergie éolienne sur l'opération de système d'alimentation a deux aspects [ACK05]:

- un plus grand nombre de turbines dans une ferme de vent.
- la distribution des fermes de vent d'un secteur géographique plus large.

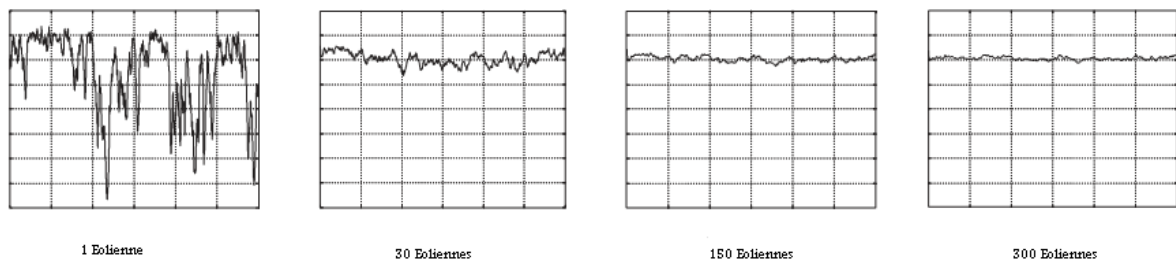


Figure 1.13. Impact de répartition géographique et de turbines de vent additionnelles sur la production d'énergie agrégée

### I.10.5. Gestion du réseau électrique

Pour pouvoir fonctionner correctement et produire de l'énergie électrique, la majorité des éoliennes a besoin d'un réseau puissant qui impose la fréquence et la tension. De plus, ce réseau doit aussi pouvoir fournir la puissance réactive nécessaire aux génératrices asynchrones par exemple et pouvoir absorber en permanence toute la puissance produite par les éoliennes [ARN].

Tout ceci est très complexe à gérer car la puissance produite par les éoliennes est très fluctuante à cause des aléas du vent [MUK99]. Une éolienne ne peut pas produire en permanence sa puissance nominale ; on ne peut compter que sur 20 à 30 % de cette puissance en moyenne. C'est pour cela qu'il est intéressant d'interconnecter un grand nombre d'éoliennes sur plusieurs sites entre elles afin d'avoir une production qui puisse se stabiliser.

Par contre, de par leur électronique et le réglage possible de l'angle de calage des pales, les éoliennes peuvent fournir des services système. En effet, il est possible de régler la puissance produite en modifiant le pas des pales de l'hélice. Si pendant une période de fort vent il y a un excédent d'énergie électrique au niveau du réseau, pouvant conduire à une déstabilisation de la fréquence, il est possible de limiter la puissance produite par les éoliennes. Ceci est effectué par l'action sur la commande de la partie électronique et sur l'angle de calage des pales afin de diminuer le rendement de l'hélice. [ELA03], [SAE01], [MIT91].

De plus, en intervenant sur la commande des onduleurs associés à la génératrice, on peut faire varier la valeur de la puissance réactive produite par un parc éolien. Ainsi, en fonction de la chaîne de conversion choisie, il est possible d'absorber ou fournir une puissance réactive donnée et de contrôler le plan de tension du réseau.

Le gestionnaire de réseau peut alors compter sur l'éolienne pour aider à la correction du facteur de puissance du réseau [LIE06], [ZHA04]. Cette option est désormais incorporée à la plupart des éoliennes utilisant des machines asynchrones à double alimentation.

Cependant, s'il y a une période sans vent, on ne peut rien faire et l'exploitant du réseau électrique ne peut donc pas compter sur les éoliennes comme source de production fiable. On peut cependant prédire les conditions de vent et donc de production d'énergie électrique avec quelques jours d'avance. Ceci reste de la prédiction météo et ne change rien lorsque le vent tombe.



Pour avoir une plus grande souplesse d'utilisation et une meilleure efficacité du système, il faudrait pouvoir stocker l'énergie durant les périodes de fort vent pour pouvoir la restituer quand il n'y a plus de vent [BLA05], [BAR04]. Ou alors associer les éoliennes avec d'autres sources de production comme des groupes diesel dans le cas de production sur réseau autonome.

### **I.10.6. Nécessité de stockage**

On a vu précédemment que le stockage d'énergie permettrait d'obtenir un service réseau appréciable [BLA05]. Il y a deux types de stockage à envisager: d'une part le stockage à court terme permettant de faire face aux bourrasques de vent et aux turbulences, et d'autre part le stockage de longue durée qui permettrait de restituer l'énergie lorsqu'il n'y a plus de vent.

- stockage à court terme :

Généralement dans l'inertie de l'hélice ou avec des accumulateurs cinétiques au pied de l'éolienne. Ces accumulateurs sont constitués de volants d'inerties entraînés par des machines asynchrones . On trouve aussi du stockage sous forme électrochimique dans des surcapacités. Ce stockage permet de lisser les fluctuations de puissance du vent.

- stockage à long terme :

Plusieurs solutions sont envisagées, notamment les batteries d'accumulateurs chimiques, l'air comprimé [ZUN03], la production d'hydrogène par électrolyse et la restitution avec une pile à combustible [ZHO09] .Ce stockage permet de compenser les périodes où le vent est insuffisant et contribue ainsi à maintenir constante la puissance fournie au réseau.

Ce stockage d'énergie associé à une gestion adéquate permettrait de garantir une production constante tout au long de l'année pour les parcs éoliens. Ceci faciliterait leur insertion dans les réseaux et soulagerait les gestionnaires des réseaux.

## Chapitre 2

# Modélisation de l'éolienne et Algorithmes de Poursuite de puissance Maximale MPPT

Dans ce chapitre, nous allons examiner et modéliser tous les éléments qui interviennent dans la conversion éolienne. Notamment, notre étude s'est focalisée sur l'élaboration d'une modélisation de l'éolienne en calculant la puissance créée par le vent sur les pales. Cette modélisation se démarque de la plupart des modélisations établies pour l'étude des éoliennes qui utilisent le calcul de la puissance disponible dans le vent et y affecte un coefficient pour obtenir la puissance disponible sur l'arbre.

L'MPPT ainsi que les systèmes de régulation intervenant sur l'hélice «système pitch», seront aussi développés ici.

## II.1. MODELISATION DE LA TURBINE

Il existe des modèles de turbine relativement complexes, prenant en compte l'effet de mât, de la pesanteur sur la rotation des pales, de leur élasticité ou encore de la variation de la vitesse du vent selon l'altitude. Les modèles les plus fréquemment rencontrés dans le cadre d'études électromécaniques sont relativement simplifiés. Cependant, ils permettent des temps de simulation relativement courts et le comportement dynamique global qui en résulte reste fidèle aux modèles réels.

Le dispositif, qui est étudié ici, est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur  $R$  entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain  $G$  (figure II.1).

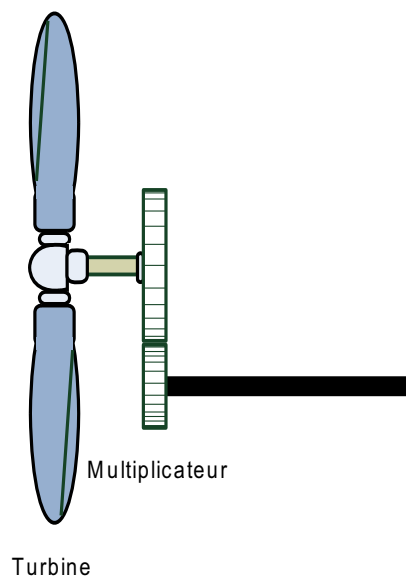


Figure II.1. Schéma de la turbine éolienne

La puissance du vent ou puissance éolienne est définie de la manière suivante [SAG 98]

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

Où : -  $\rho$  est la densité de l'air (approx.  $1.22 \text{ kg/m}^3$  à la pression atmosphérique à  $15^\circ\text{C}$ ).

-  $S$  est la surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pale.

-  $v$  est la vitesse du vent.

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

$$P_T = C_p \cdot P_v = \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \cdot C_p \quad (II.2)$$

Le coefficient de puissance  $C_p$  représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il dépend de la caractéristique de la turbine [SAG 98],[MUK99]. La figure 2.2 représente la variation de ce coefficient en

fonction du ratio de vitesse  $\lambda$  et de l'angle de l'orientation de la pale  $\beta$ .

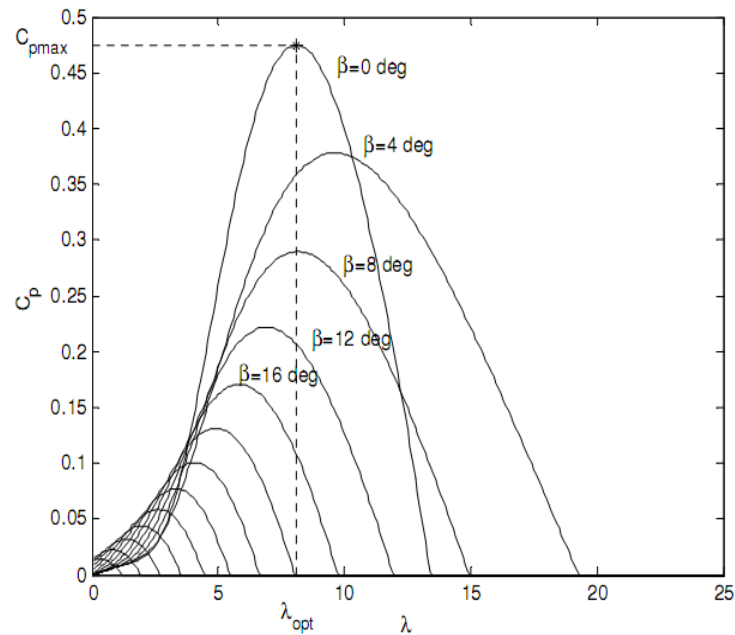


Figure. II.2. Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine

### II.1.1. Modélisations existantes du coefficient de puissance

On retrouve dans la littérature plusieurs types de modélisation du coefficient de puissance, souvent tous limités par les données d'entrée, donc généralement valables pour une turbine particulière : chaque turbine a un comportement spécifique et les constructeurs sont peu bavards sur leurs propres produits. Ainsi, tout le monde est confronté à ce problème de modélisation du coefficient de puissance. Néanmoins, l'allure des réseaux de courbes est toujours la même et l'handicap de modélisation peut être levé.

#### II.1.1.1. 1er type de modélisation

Cette première modélisation est présentée dans [LAV 05]. Elle propose une expression analytique de la courbe  $C_p(\lambda, \beta)$  en n'utilisant que 7 paramètres : 3 couples  $(C_p, \lambda)$  et une pente (m) en l'un des points. Trois zones (Figure II.3) sont définies pour cette modélisation :

Zone 1 :  $0 \leq \lambda \leq \lambda_p$

$$C_p(\lambda) = A \cdot \lambda^n \cdot e^{\lambda^n \cdot B} \quad (II.3)$$

Zone 2 :  $\lambda_p \leq \lambda \leq \lambda_m$

$$C_p(\lambda) = C(\lambda) \cdot C_{p_p} + D(\lambda) \cdot C_{p_m} + E(\lambda) \cdot (C_{p_p})^m + F(\lambda) \cdot (C_{p_m})^m \quad (II.4)$$

Zone 3 :  $\lambda_m \leq \lambda \leq \lambda_0$

$$C_p(\lambda) = G + H \cdot \lambda + I \cdot \lambda^2 \quad (II.5)$$

Ces 3 zones sont définies sur la Figure II.3:

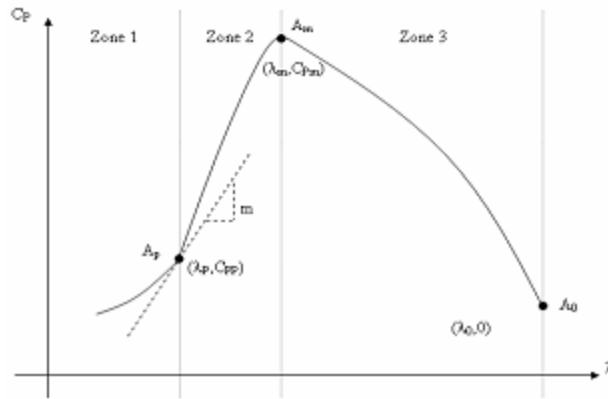


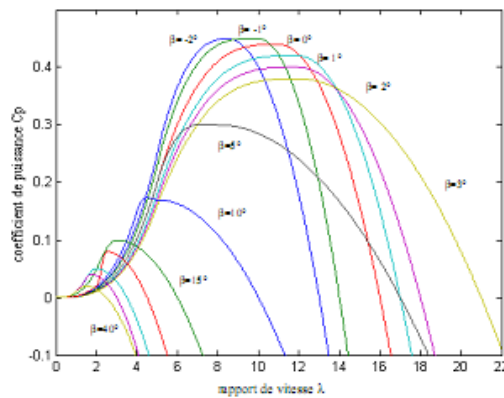
Figure II.3. Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine

Pour déterminer les paramètres  $A_p, \dots, I$ , les conditions suivantes sont imposées:

- la courbe  $C_p(\lambda)$  doit passer par les points  $A_p(\lambda_p, C_{pp})$ ,  $A_m(\lambda_m, C_{pm})$ ,  $A_0(\lambda_0, 0)$ .
- la courbe  $C_p(\lambda)$  doit présenter au point  $A_p$  une pente  $m$ .
- la courbe  $C_p(\lambda)$  doit présenter au point  $A_m$  une pente nulle (au maximum de la courbe).

Le Tableau suivant donne pour différentes valeurs de  $\beta$  les 7 paramètres nécessaires pour déterminer les courbes  $C_p(\lambda, \beta)$ . Ils correspondent à une turbine de 660kW.

$\beta$	$C_{pp}$	$\lambda_p$	$C_{pm}$	$\lambda_m$	$\lambda_0$	$m$	$N$
0	0.20	5	0.44	11	16	0.120	3
1	0.18	5	0.42	12	17	0.108	3
2	0.17	5	0.40	12	18	0.102	3
3	0.16	5	0.38	12	21	0.096	3
5	0.20	5	0.30	8	17	0.120	3
10	0.15	4	0.17	5	10	0.112	3
20	0.02	2	0.08	2.5	4.5	0.030	3
30	0.01	1	0.04	1.75	3.0	0.030	3



### II.1.1.2. 2ème type de modélisation

Cette modélisation, présentée dans [LUB 03], apparaît dans d'autres références [HAU 00]. Elle a l'avantage de se présenter sous la forme d'une seule équation, valable quel que soit l'angle de calage  $\beta$  et quel que soit le rapport de vitesse  $\lambda$ . L'équation donnant  $C_p$  se présente sous la forme suivante :

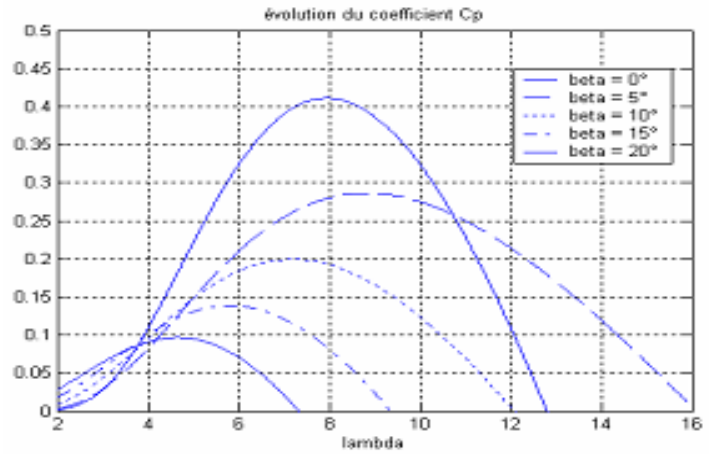
$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \cdot \left( C_2 \cdot \frac{1}{\Lambda} - C_3 \cdot \beta - C_4 \right) e^{\frac{-C_5}{\Lambda}} + C_6 \cdot \lambda \quad (II.6)$$

Dans cette formule, le paramètre  $\Lambda$  dépend également de  $\beta$  et  $\lambda$  :

$$\frac{1}{\Lambda} = \frac{1}{\lambda + 0.08 \cdot \beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (II.7)$$

Les six coefficients définis,  $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6$ , dépendent de la turbine considérée. L'exemple donné ci-dessous correspond à la turbine E-40 proposée par le constructeur allemand ENERCON [ENE] dont la puissance nominale est de 500kW :

coefficient	valeur
C1	0.5
C2	116
C3	0.4
C4	0
C5	5
C6	21



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

$$C_T = \frac{P_T}{\Omega_T} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_T} \quad (II.8)$$

## II.2. MODELE DU MULTIPLICATEUR

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice (figure 2.1). On a modélisé le multiplicateur comme un simple gain par l'équation suivante [ELA 04] :

$$\begin{bmatrix} C_g \\ \Omega_T \end{bmatrix} = \frac{1}{G} \begin{bmatrix} C_T \\ \Omega_{mec} \end{bmatrix} \quad (II.9)$$

## II.3. EQUATION DYNAMIQUE DE L'ARBRE

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie  $J_T$  comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale  $J$  constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice.

$$J = \frac{J_T}{G^2} + J_g \quad (II.10)$$

Il est à noter que l'inertie du rotor de la génératrice est très faible par rapport à l'inertie de la turbine reportée par cet axe. A titre illustratif, pour une éolienne Vestas de 2 MW, une pale a une longueur de 39m et pèse 6.5 tonnes. L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total ( $C_{mec}$ ) appliqué au rotor:

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (II.11)$$

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

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (II.12)$$

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

$$C_{vis} = f \cdot \Omega_{mec} \quad (II.13)$$

La turbine génère le couple aérodynamique qui est appliqué au multiplicateur. Les entrées de la turbine sont la vitesse du vent, l'angle d'orientation des pales, et la vitesse de rotation de la turbine. Le modèle du multiplicateur transforme la vitesse mécanique et le couple aérodynamique respectivement en vitesse de la turbine et en couple de multiplicateur. Le modèle de l'arbre décrit la dynamique de la vitesse mécanique, il a donc deux entrées : le couple du multiplicateur, le couple électromagnétique fourni par la génératrice.

La vitesse de la turbine peut être contrôlée par action sur deux entrées : l'angle de la pale et le couple électromagnétique de la génératrice. La vitesse du vent est considérée comme une entrée perturbatrice à ce système.

Le schéma bloc correspondant à cette modélisation de la turbine est représenté sur la figure II.4

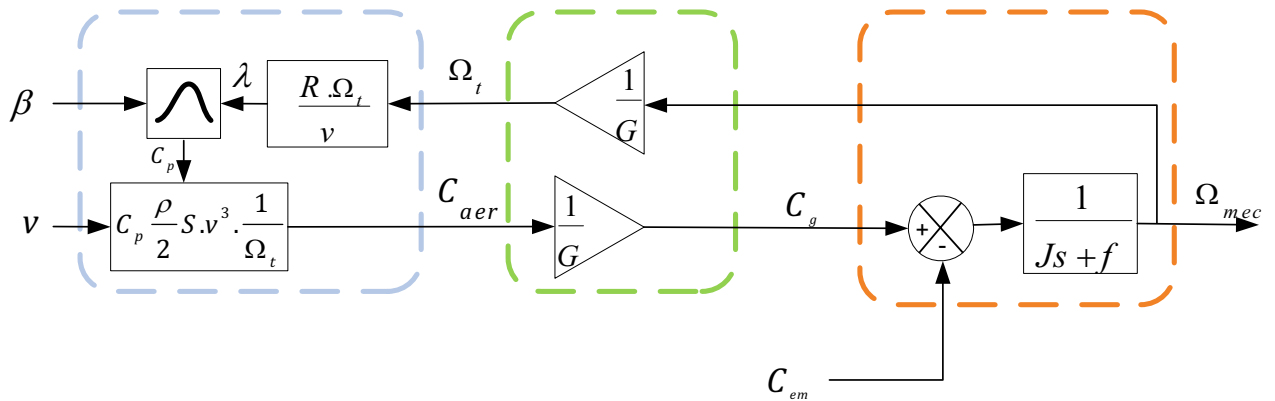


Figure II.4. Schéma bloc du modèle de la turbine

## II.4. STRATEGIES DE COMMANDE DE LA TURBINE EOLIENNE

### II.4.1. Caractéristique puissance vitesse d'éoliennes de grande puissance

La caractéristique Puissance-vitesse d'une éolienne peut se décomposer en quatre zones (figure II.5).

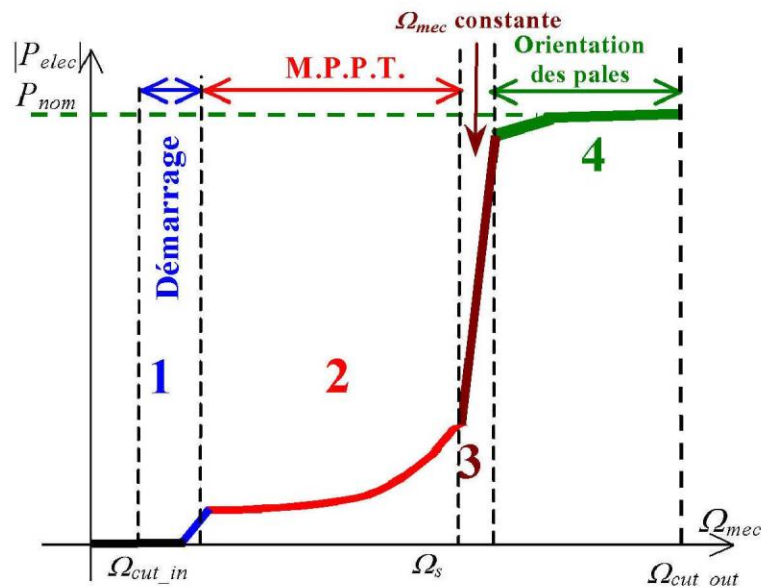


Figure II.5 - Caractéristique puissance vitesse typique d'une éolienne de grande puissance

La caractéristique équivalente mesurée sur l'éolienne de type GE de 1.5 MW est représentée sur la figure II.6.

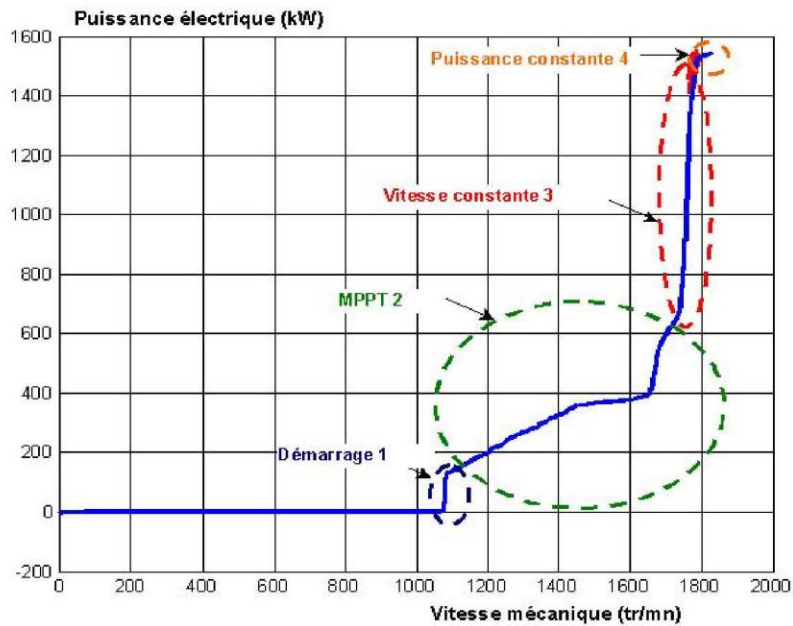


Figure II.6. Caractéristique puissance vitesse mesurée d'une éolienne de 1.5 MW

Quatre zones principales de fonctionnement peuvent être distinguées :

Zone 1 : C'est la zone de démarrage de la machine, elle commence lorsque la vitesse mécanique est supérieure à une certaine vitesse  $\Omega_{cut-in}$ .

Zone 2 : Lorsque la vitesse de la génératrice atteint une valeur seuil, un algorithme de commande permettant l'extraction de la puissance maximale du vent est appliqué. Pour extraire le maximum de la puissance, l'angle de la pale est maintenu constant à sa valeur minimale, c'est à dire  $\beta = 0^\circ$ . Ce processus continue jusqu'à atteindre une certaine valeur de la vitesse mécanique.

Zone 3 : Au delà, l'éolienne fonctionne à vitesse constante. Dans cette zone, la puissance de la génératrice atteint des valeurs plus importantes, jusqu'à 90% de la puissance nominale  $P_{nom}$ .

Zone 4 : Arrivée à la puissance nominale  $P_{nom}$ , une limitation de la puissance générée est effectuée à l'aide d'un système d'orientation des pales : pitch control.

Au delà de la vitesse  $\Omega_{cut-out}$ , un dispositif d'urgence est actionné de manière à éviter une rupture mécanique.

En pratique, le passage de la zone 2 à la zone 4 est un peu particulier. En effet, la vitesse de rotation est contrôlée par le couple électromagnétique  $C_{em}$  en zone 2 et, en zone 4, c'est la puissance qui doit être contrôlée par le dispositif d'orientation des pales. Le système d'orientation des pales a une dynamique bien plus lente que la dynamique électrique de la machine. Ainsi, la lenteur de la régulation de l'angle de calage peut entraîner un dépassement de la vitesse de rotation limite lors d'une rafale se produisant pendant un fonctionnement entre les zones 2 et 4. Il est, dans ce cas, intéressant de Concevoir une procédure permettant d'anticiper l'action du dispositif d'orientation en réglant le couple électromagnétique de manière à contrôler la vitesse de rotation, dans cette zone 3 intermédiaire. La conception des dispositifs de commande pour chaque zone de fonctionnement est maintenant expliquée.



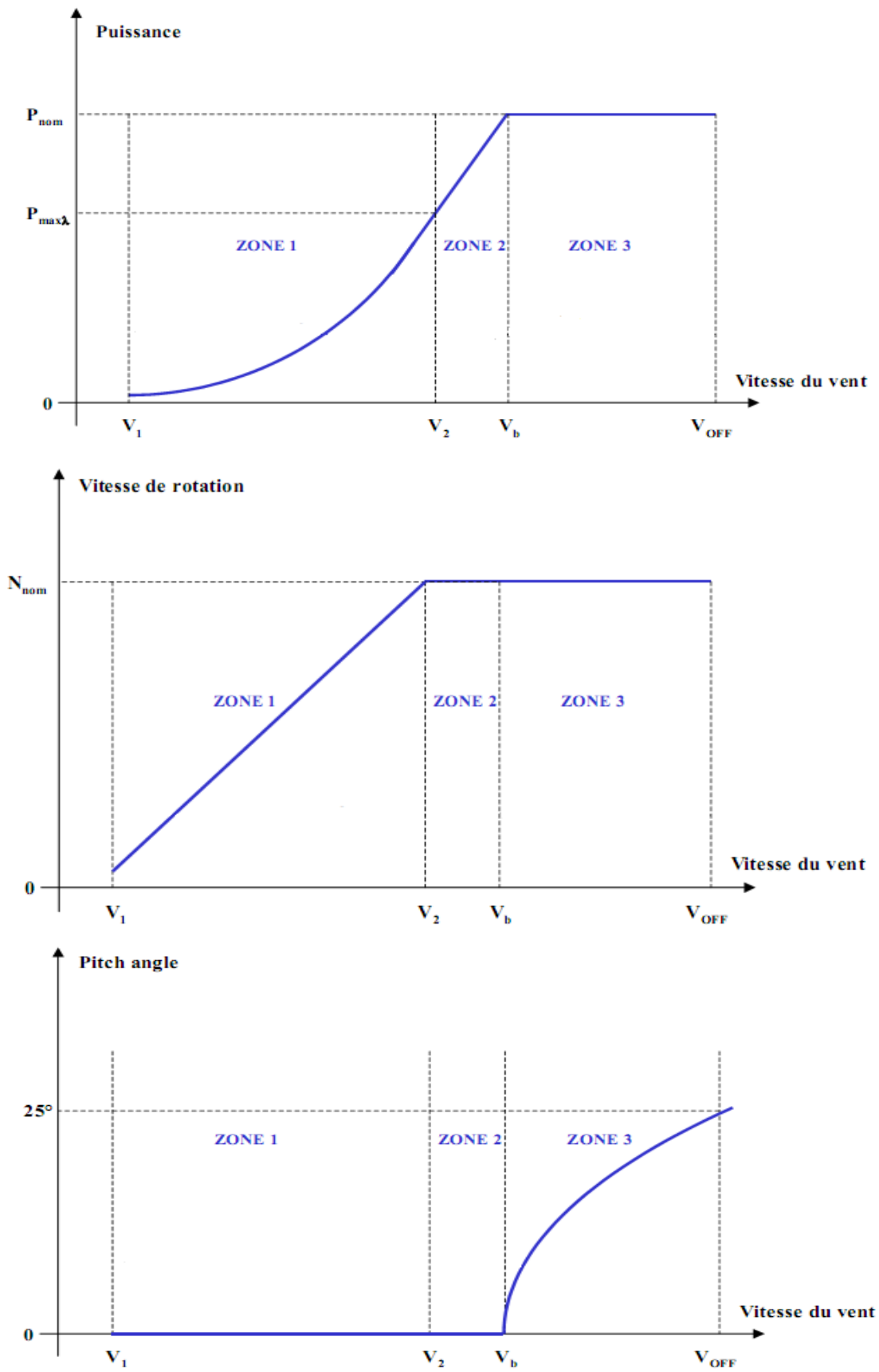


Figure II.7. Caractéristique d'une éolienne à vitesse variable.

Dans l'espace  $(v, \Omega, \beta)$  on obtient

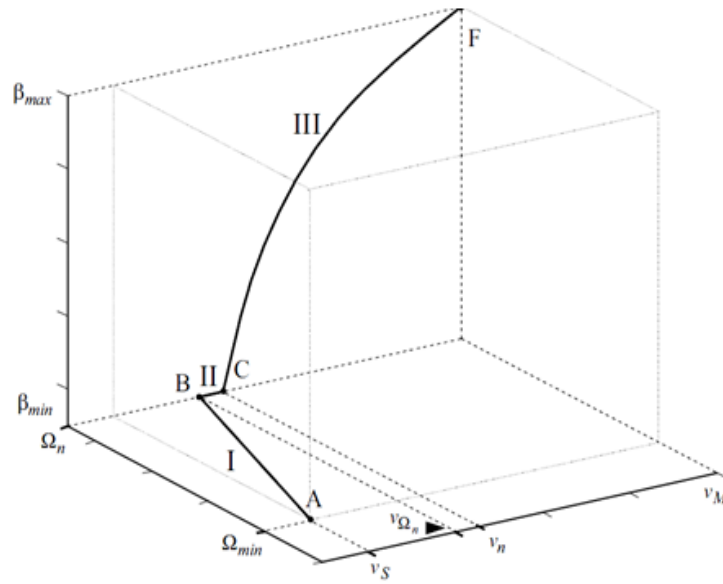


Figure II.8. Caractéristique d'une éolienne à vitesse variable dans l'espace  $(v, \Omega, \beta)$  [IUL08] .

## II.5. ZONE 1

L'utilisation des turbines éoliennes à vitesse variable permet de régler la vitesse de variation de la génératrice. Ceci s'avère très utile pour extraire le maximum de puissance en charge partielle. Lorsque l'on trace les courbes donnant la puissance extraite en fonction de la vitesse de rotation de la génératrice, pour différentes vitesses de vent, on s'aperçoit qu'elles passent chacune par un unique maximum. Le but de ce contrôle est la recherche permanente de ce maximum, technique que l'on retrouve sous le nom de MPPT (Maximum Power Point Tracking) dans la littérature [WAN 99], [DAT 03], [SIM 97], [CHE 00]. Cette technique est aussi très utilisée dans les systèmes photovoltaïques où la recherche du MPPT dans le plan courant – tension permet à terme de réduire le coût du kWh produit. Si l'on relie les différents maximums des courbes de puissance, on obtient celle donnant la puissance maximale extractible pour chaque vitesse de vent.

En considérant le rapport de vitesse optimal  $\lambda_{opt}$  pour lequel le coefficient de puissance est maximal, on peut en déduire l'expression analytique de la puissance maximale:

$$P_{max} = C_{p_{max}} \cdot \frac{\rho \cdot S}{2} \cdot \left( \frac{R}{\lambda_{opt}} \right)^3 \cdot \Omega_T^3 \quad (II.14)$$

Que l'on peut écrire sous la forme :

$$P_{max} = K \cdot \Omega_T^3, \quad K = C_{p_{max}} \cdot \frac{\rho \cdot S}{2} \cdot \left( \frac{R}{\lambda_{opt}} \right)^3 \quad (II.15)$$

Il existe plusieurs techniques pour poursuivre le MPPT. Ces techniques diffèrent selon le type d'informations dont elles ont besoin pour délivrer la référence de vitesse. On peut classer ces techniques en deux familles, selon que la vitesse du vent est nécessaire ou non à la genèse de référence.

## Chapitre 2

Parmi les méthodes présentées, la commande en rapport de vitesse ainsi que la commande en puissance ont besoin de la mesure de la vitesse du vent pour générer  $\Omega_{T_{ref}}$ . Par contre, la méthode du gradient s'en affranchit. Les commandes utilisant la logique floue ne sont que le prolongement de ces différentes stratégies.

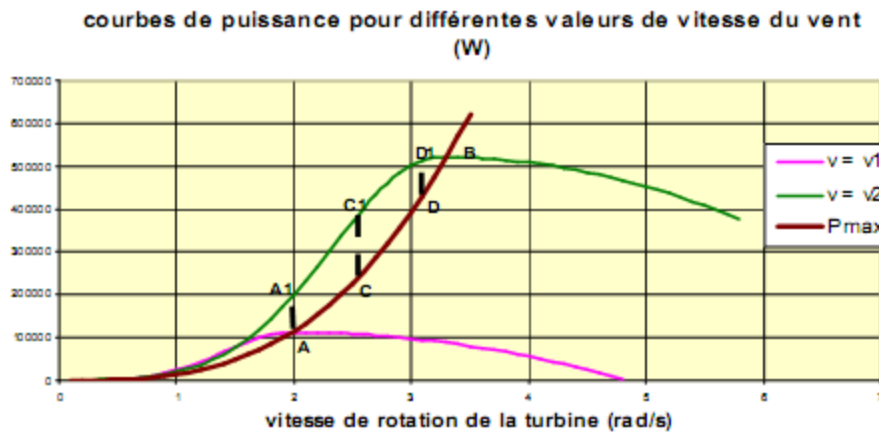
### II.5.1.1. Commande en puissance :

La base de la méthode est de comparer la puissance disponible  $P_{disp}$  et la puissance maximale  $P_{max}$  pour une vitesse de rotation  $\Omega_T$  donnée :

$$P_{disp} = C_p(v, \Omega_T) \cdot \frac{\rho \cdot S}{2} \cdot v^3 \quad (II.16)$$

$$P_{max} = C_{p_{max}} \cdot \frac{\rho \cdot S}{2} \cdot \left( \frac{R}{\lambda_{opt}} \right)^3 \cdot \Omega_T^3 \quad (II.17)$$

L'algorithme est le suivant : on considère que l'on se trouve au point A. On suppose qu'à un instant  $t_1$ , la vitesse du vent varie et passe de  $v_1$  à  $v_2$ . Le but est d'aller au point B, correspondant au nouveau point où la puissance est maximale.



Etat 1 : point A (état initial)

Vitesse du vent :  $v_1$

Vitesse de rotation de la turbine :  $\Omega_{T_1}$

$$P_{disp} = C_p(v_1, \Omega_{T_1}) \cdot \frac{\rho \cdot S}{2} \cdot v_1^3 = C_{p_{max}} \cdot \frac{\rho \cdot S}{2} \cdot \left( \frac{R}{\lambda_{opt}} \right)^3 \cdot \Omega_{T_1}^3 = P_{max} \quad (II.18)$$

Etat 2 :

Vitesse du vent :  $v_2$

Vitesse de rotation de la turbine :  $\Omega_{T_1}$

$$P_{disp} = C_p(v_2, \Omega_{T_1}) \cdot \frac{\rho \cdot S}{2} \cdot v_2^3 = P(A_1) \quad (II.19)$$

$$P_{max} = C_{p_{max}} \cdot \frac{\rho \cdot S}{2} \cdot \left( \frac{R}{\lambda_{opt}} \right)^3 \cdot \Omega_{T_1}^3 = P(A) \quad (II.20)$$

On voit graphiquement que  $P(A_1) > P(A)$ . Il existe donc une puissance d'accélération qui va faire augmenter la vitesse de rotation  $\Omega_T$ . On se retrouve au point C.

Etat 3 : point C

Vitesse du vent :  $v_2$

Vitesse de rotation de la turbine :  $\Omega_C$

$$P_{disp} = C_p(v_2, \Omega_C) \cdot \frac{\rho \cdot S}{2} \cdot v_2^3 = P(C_1) \quad (II.21)$$

$$P_{max} = C_{pmax} \cdot \frac{\rho \cdot S}{2} \cdot \left(\frac{R}{\lambda_{opt}}\right)^3 \cdot \Omega_C^3 = P(C) \quad (II.22)$$

On voit graphiquement que  $P(C_1) > P(C)$ . La vitesse de rotation  $\Omega_T$  continue à augmenter. On se retrouve au point D.

Etat 4 : point B (état final)

Graphiquement, on voit que  $P_{disp}$  et  $P_{max}$  convergent vers  $P(B)$ .

$$P_{disp} = C_p(v_2, \Omega_{T_2}) \cdot \frac{\rho \cdot S}{2} \cdot v_2^3 = C_{pmax} \cdot \frac{\rho \cdot S}{2} \cdot \left(\frac{R}{\lambda_{opt}}\right)^3 \cdot \Omega_{T_2}^3 = P_{max} \quad (II.23)$$

### II.5.1.2. Méthode du gradient :

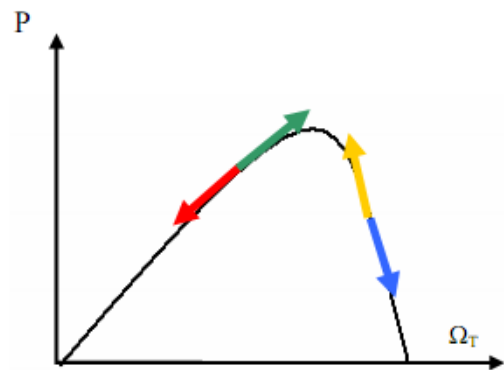
Cette méthode vient de l'observation de la courbe donnant la puissance extraite en fonction de la vitesse de rotation de la turbine.

Pour agir sur la vitesse de rotation  $\Omega_T$  de la turbine, on s'intéresse au sens de variation de la grandeur  $(dP/d\Omega_T)$ . Ce gradient vaut 0 lorsque l'on a atteint le maximum de la courbe, point que l'on recherche.

On le déduit à partir de cette équation :

$$\frac{dP}{d\Omega_T} = \frac{dP}{dt} \cdot \left(\frac{d\Omega_T}{dt}\right)^{-1} \quad (II.24)$$

$\frac{dP}{dt} \backslash \frac{d\Omega_T}{dt}$	<0	>0
<0	Augmenter $\Omega$ <b>Cas 1</b>	Diminuer $\Omega$ <b>Cas 2</b>
>0	Diminuer $\Omega$ <b>Cas 3</b>	Augmenter $\Omega$ <b>Cas 4</b>



La commande C à appliquer s'écrit :  $C = \frac{d\Omega_T}{dt} \oplus \frac{dP}{dt} \quad (II.25)$

### II.5.1.3. Commande par logique floue :

Cette méthode est en fait une amélioration des méthodes où l'incrément (ou le décrétement) de vitesse est constant (méthode du gradient, commande en puissance). Par exemple, la méthode du gradient permet de savoir si, au pas suivant, il faut augmenter ou diminuer la référence de vitesse. Cette variation (positive ou

négative)  $\Delta\Omega_T$  est constante, choisie de façon à trouver un compromis entre une recherche rapide de l'optimum et des oscillations faibles autour de cet optimum en régime établi.

La commande par logique floue reprend les bases de la méthode du gradient pour savoir dans quelle direction aller, mais avec une variation de vitesse de référence  $\Delta\Omega_T$  variable [SIM 97], [CHE 00]. Cette méthode a été implantée au cours de ces travaux.

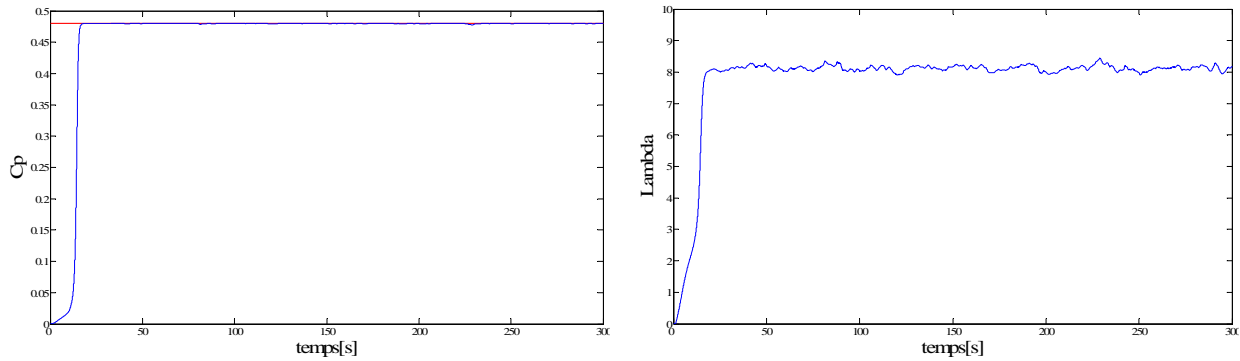


Figure II.9. Le coefficient de puissance et la vitesse spécifique.

## II.5.2. Techniques d'extraction du maximum de la puissance

### II.5.2.1. Commande en rapport de vitesse $\lambda$ :

La première méthode vient de la seule observation de la courbe donnant le coefficient de puissance en fonction de  $\lambda$ , qui passe par un unique maximum, pour  $\lambda = \lambda_{opt}$ . Le but, comme pour les autres méthodes, est donc de rester constamment au point  $(\lambda_{opt}, C_{p_{max}})$ . Or, il existe une relation très simple entre  $\lambda$  et la vitesse de rotation de la turbine :

$$\Omega_T = \frac{\lambda \cdot v}{R} \quad (II.26)$$

Par conséquent, si la vitesse de vent évolue, on obtient la vitesse de référence avec la formule suivante :

$$\Omega_{T_{ref}} = \frac{\lambda_{opt} \cdot v}{R} \quad (II.27)$$

L'avantage est la simplicité de la méthode. Cependant, elle dépend fortement de la mesure de la vitesse de vent, c'est-à-dire de la qualité de l'image du vent fournie par l'anémomètre. De plus, la fiabilité de la méthode tient de la justesse de la courbe programmée du lieu de la puissance maximale en fonction de la vitesse du vent (données constructeur).

Dans cette partie, nous présenterons différentes stratégies pour contrôler le couple électromagnétique (et indirectement la puissance électromagnétique convertie) afin de régler la vitesse mécanique de manière à maximiser la puissance électrique générée. Ce principe est connu sous la terminologie Maximum Power Point Tracking (M.P.P.T.) et correspond à la zone 2 de la caractéristique de fonctionnement de l'éolienne. On distingue deux familles de structures de commande qui sont maintenant expliquées [ELA 03]:

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

### II.5.2.2. Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse

Le vent est une grandeur stochastique, de nature très fluctuante. Les fluctuations du vent constituent la perturbation principale de la chaîne de conversion éolienne et créent donc des variations de puissance.

Pour cette étude, on supposera que la machine électrique et son variateur sont idéaux et donc, que quelle que soit la puissance générée, le couple électromagnétique développé est à tout instant égal à sa valeur de référence.

$$C_{em} = C_{em-ref} \quad (II.28)$$

Les techniques d'extraction du maximum de puissance consistent à déterminer la vitesse de la turbine qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée. Plusieurs dispositifs de commande peuvent être imaginés.

Comme expliqué avant, la vitesse est influencée par l'application de trois couples : un couple éolien, un couple électromagnétique et un couple résistant. En regroupant l'action de ces trois couples, la vitesse mécanique n'est plus régie que par l'action de deux couples, le couple issu du multiplicateur  $C_g$  et le couple électromagnétique  $C_{em}$  :

$$\frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \frac{1}{J} (C_g - C_{em} - C_{vis}) \quad (II.29)$$

Une première structure de commande est obtenue en inversant la relation causale propre à l'inertie.

Cette structure de commande consiste à régler le couple apparaissant sur l'arbre de la turbine de manière à fixer sa vitesse à une référence. Pour réaliser ceci, les règles d'inversion obligent à l'utilisation d'un asservissement de la vitesse (système Optispeed du constructeur Vestas par exemple).

le couple électromagnétique de référence  $C_{em-ref}$  permettant d'obtenir une vitesse mécanique de la génératrice égale à la vitesse de référence  $\Omega_{ref}$  est obtenu par une relation inverse indirecte:

$$C_{em-ref} = PI. (\Omega_{ref} - \Omega_{mec}) \quad (II.30)$$

$PI$  est le régulateur de vitesse.

$\Omega_{ref}$  est la vitesse mécanique de référence.

Cette vitesse de référence dépend de la vitesse de la turbine à fixer ( $\Omega_{T-ref}$ ) pour maximiser la puissance extraite. En prenant en compte le gain du multiplicateur, on a donc:

$$\Omega_{ref} = G. \Omega_{T-ref} \quad (II.31)$$

La référence de la vitesse de la turbine correspond à celle correspondant à la valeur optimale du ratio de vitesse  $\lambda_{opt}$  (à  $\beta$  constant et égal à  $0^\circ$ ) permettant d'obtenir la valeur maximale du  $C_p$  (figure II.10).

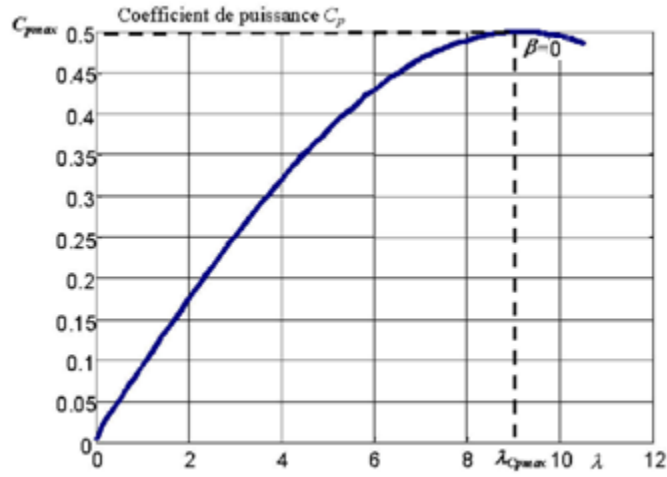


Figure II.10. Fonctionnement optimal de la turbine

$$\Omega_{T-ref} = \frac{\lambda_{opt}.v}{R} \tag{II.32}$$

### II.5.2.2.1. Conception du correcteur de vitesse

L'action du correcteur de vitesse doit accomplir deux tâches:

- Il doit asservir la vitesse mécanique à sa valeur de référence.
- Il doit atténuer l'action du couple éolien qui constitue une entrée perturbatrice.

La représentation simplifiée sous forme de schéma blocs se déduit facilement (figure II.11).

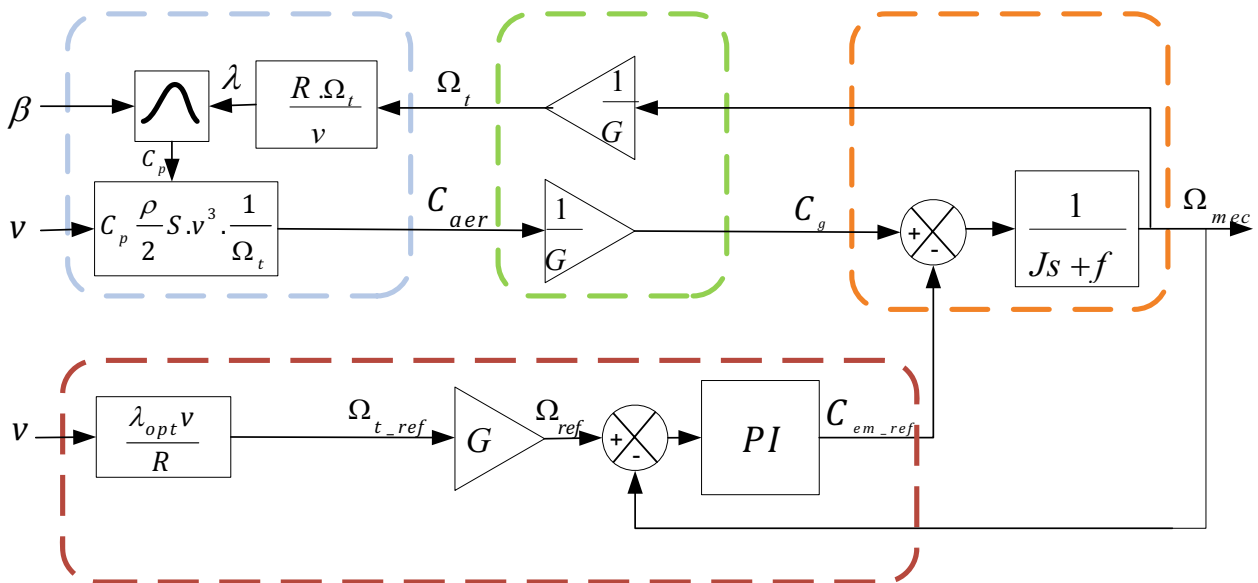


Figure II.11 - Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite avec asservissement de la vitesse

Différentes technologies de correcteurs peuvent être considérées pour l'asservissement de la Vitesse. Dans l'annexe 2, nous détaillons le calcul du régulateur : le correcteur Proportionnel Intégral (PI)

### II.5.2.3. Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse

En pratique, une mesure précise de la vitesse du vent est difficile à réaliser. Ceci pour deux raisons:

L'anémomètre est situé derrière le rotor de la turbine, ce qui errone la lecture de la vitesse du vent.

Ensuite, le diamètre de la surface balayée par les pales étant important (typiquement 70 m pour une éolienne de 1.5 MW), une variation sensible du vent apparaît selon la hauteur où se trouve l'anémomètre. L'utilisation d'un seul anémomètre conduit donc à n'utiliser qu'une mesure locale de la vitesse du vent qui n'est donc pas suffisamment représentative de sa valeur moyenne apparaissant sur l'ensemble des pales.

Une mesure erronée de la vitesse conduit donc forcément à une dégradation de la puissance captée selon la technique d'extraction précédente. C'est pourquoi la plupart des turbines éoliennes sont contrôlées sans asservissement de la vitesse [MUL 01].

Cette seconde structure de commande repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent. Dans ce cas, à partir de l'équation dynamique de la turbine, on obtient l'équation statique décrivant le régime permanent de la turbine :

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} = 0 = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (II.33)$$

Ceci revient à considérer le couple mécanique  $C_{mec}$  développé comme étant nul. Donc, en négligeant l'effet du couple des frottements visqueux ( $C_{vis} = 0$ ), on obtient :

$$C_g = C_{em} \quad (II.34)$$

Le couple électromagnétique de réglage est déterminé à partir d'une estimation du couple éolien :

$$C_{em-ref} = \frac{C_{T-est}}{G} \quad (II.35)$$

Le couple éolien peut être déterminé à partir de la connaissance d'une estimation de la vitesse du vent et de la mesure de la vitesse mécanique en utilisant l'équation

$$C_{T-est} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot v_{est}^3}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{T-est}} \quad (II.36)$$

Une estimation de la vitesse de la turbine  $\Omega_{T-est}$  est calculée à partir de la mesure de la vitesse mécanique :

$$\Omega_{T-est} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (II.37)$$

La mesure de la vitesse du vent apparaissant au niveau de la turbine étant délicate, une estimation de sa valeur peut être obtenue à partir de l'équation

$$v_{est} = \frac{R \cdot \Omega_{T-est}}{\lambda} \quad (II.38)$$

En regroupant ces quatre équations précédentes, on obtient une relation globale de contrôle :

$$C_{em-ref} = \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5}{2} \cdot \frac{C_p}{\lambda^3} \cdot \frac{\Omega_{mec}^2}{G^3} \quad (II.39)$$

Pour extraire le maximum de la puissance générée, il faut fixer le ratio de vitesse à la valeur  $\lambda_{opt}$  qui correspond au maximum du coefficient de puissance  $C_{pmax}$ . Le couple électromagnétique de référence



## Chapitre 2

doit alors être réglé à la valeur suivante :

$$C_{em-ref} = \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5}{2} \cdot \frac{C_p(\lambda_{opt})}{\lambda_{opt}^3} \cdot \frac{\Omega_{mec}^2}{G^3} \quad (II.40)$$

L'expression du couple de référence devient alors proportionnelle au carré de la vitesse de la génératrice :

$$C_{em-ref} = K \cdot \Omega_{mec}^2 \quad (II.41)$$

Avec

$$K = \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5}{2 \cdot G^3} \cdot \frac{C_p(\lambda_{opt})}{\lambda_{opt}^3} \quad (II.42)$$

La représentation sous forme de schéma-blocs est montrée à la figure II.12

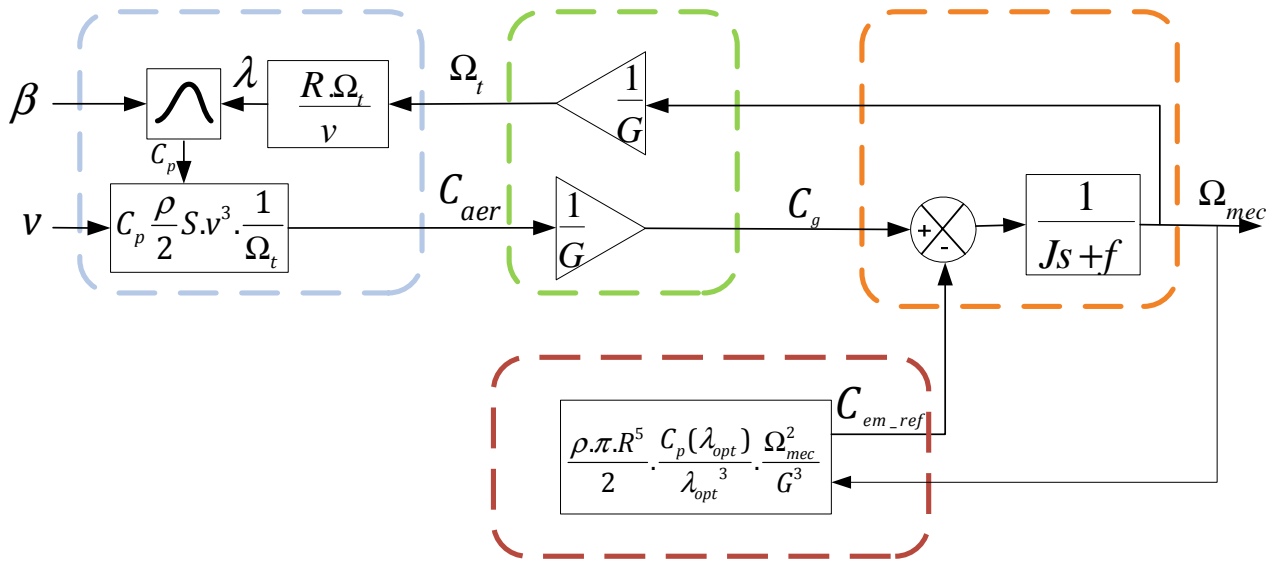


Figure II.12 - Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse

### II.5.3. Résultats obtenus

Ces deux structures de commande ont été simulées en considérant un profil de vent moyen autour de (8 m/s)( figure II.13). Nous montrons les résultats obtenus pour les différentes stratégies de commande utilisées.

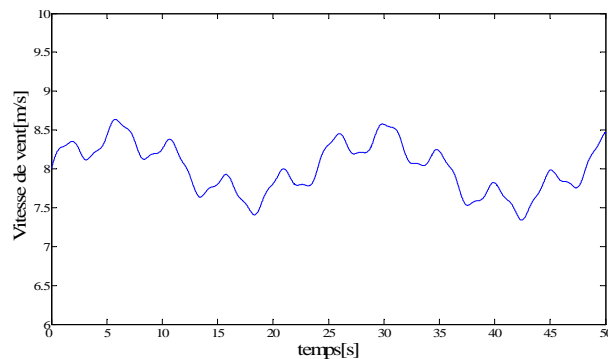


Figure II.13 - Profil du vent appliqué

En négligeant les pertes d'origine électrique la puissance électrique devient égale à la puissance électromagnétique. Cette puissance sera comptabilisée négativement car elle s'oppose à la puissance

aérodynamique. Lorsque ces deux puissance sont égales, l'éolienne tourne à vitesse constante (fonctionnement en zone 3).

### II.5.4. Résultats obtenus

#### Résultats obtenus avec la structure de commande sans asservissement de vitesse

Les résultats de simulation correspondant à cet algorithme de commande montrent que les variations de la vitesse de la génératrice sont adaptées à la variation de la vitesse du vent (figure II.13). La puissance électromagnétique convertie en puissance électrique produite est très fluctuante.

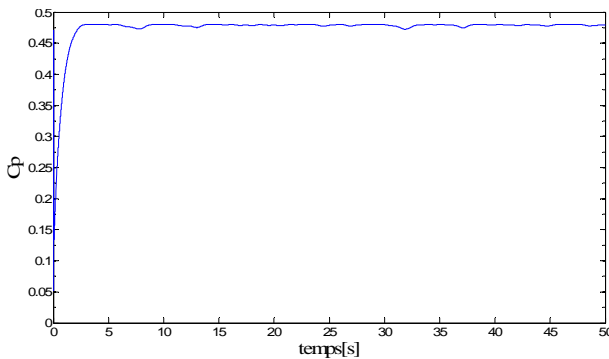


Figure II.14 – Le coefficient de puissance.

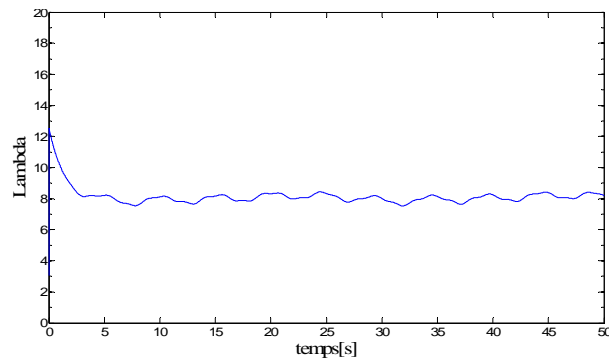


Figure II.15 – La vitesse spécifique.

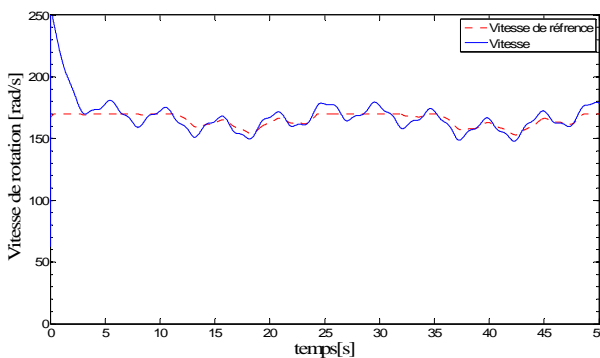


Figure II.16 – La vitesse mécanique.

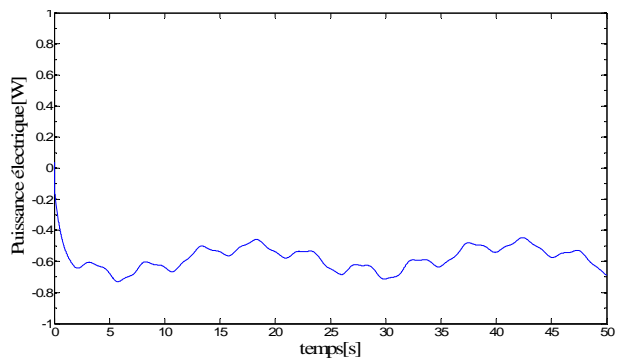


Figure II.17 – La Puissance électrique produite.

#### Résultats obtenus avec la structure de commande avec asservissement de la vitesse

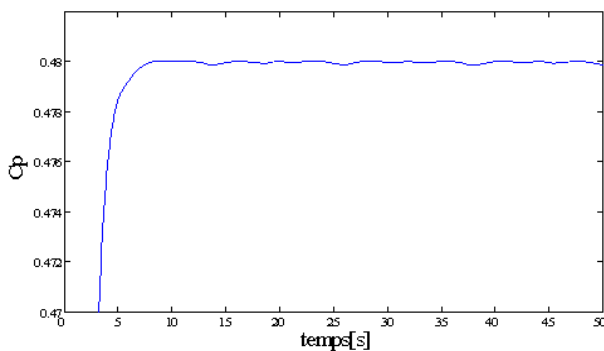


Figure II.18 – Le coefficient de puissance.

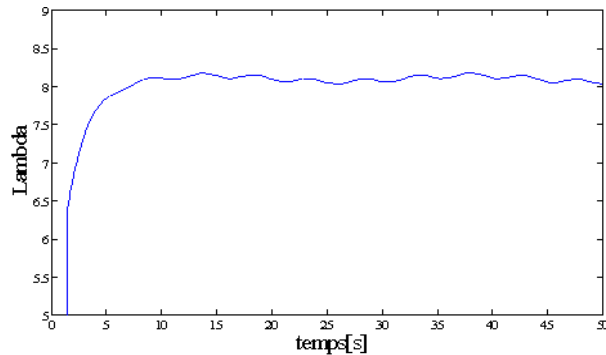


Figure II.19 – La vitesse spécifique.

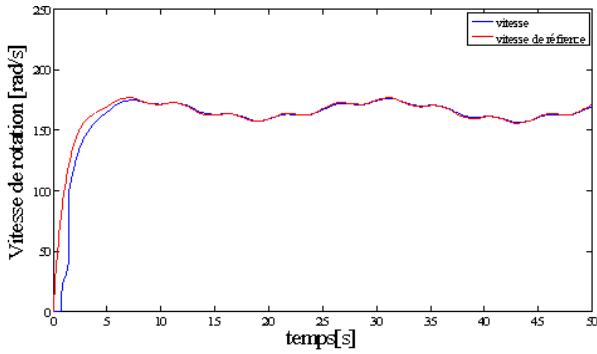


Figure II.20 – La vitesse mécanique.

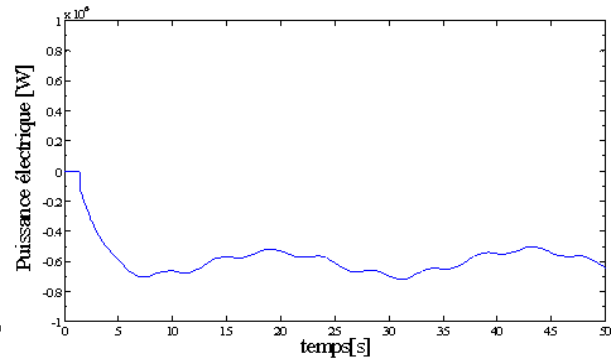


Figure II.21 – La Puissance électrique produite.

Les résultats de simulation inhérents à cet algorithme sont montrés sur la figure II.18. Ces résultats montrent qu'un meilleur contrôle en boucle fermée de la vitesse est obtenu en régime transitoire et en régime permanent. Ce contrôle est très dynamique et la puissance obtenue en régime transitoire est donc plus importante.

## II.6. ZONE 2(FONCTIONNEMENT A VITESSE CONSTANTE)

Lorsque la vitesse de la turbine arrive à environ 90% de la vitesse nominale, la turbine ne doit plus être contrôlée pour extraire le maximum de la puissance éolienne. La vitesse de la turbine doit alors être rendue constante. Ce mode de contrôle correspond à la zone 3 du fonctionnement de la turbine (figure II.5). Pour ce faire, deux moyens sont mis en œuvre :

- Une orientation des pales pour réduire la portance.
- Un réglage électrique de la vitesse.

L'algorithme de maximisation de la puissance (M.P.P.T) doit être remplacé par un algorithme permettant d'obtenir un fonctionnement à vitesse constante. Deux cas sont à considérer selon qu'un contrôle avec asservissement de vitesse est utilisé ou non.

Lorsqu'un contrôle avec asservissement de vitesse est utilisé, il suffit d'appliquer une vitesse de référence constante plutôt que celle générée par l'algorithme de maximisation de puissance (figure II.22).

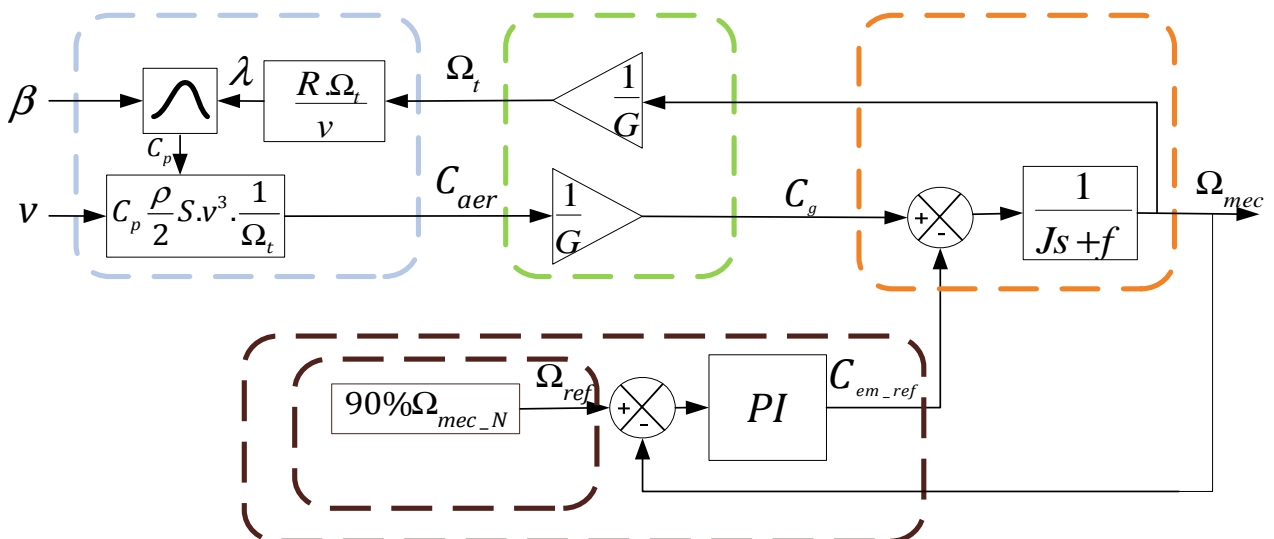


Figure II.22 –Fonctionnement à vitesse constante en zone 2 et asservissement de vitesse

Lorsqu'un contrôle sans asservissement de vitesse est utilisé, le ratio de vitesse doit être réglé pour maintenir une vitesse constante (figure II.23). Pour cela, on utilise une mesure de la puissance électrique ( $P_{elec}$ ) qu'on suppose égale à la puissance aérodynamique.

$$P_{elec} = P_T \tag{II.43}$$

$$P_{elec} = \frac{1}{2} C_p \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v^3 \tag{II.44}$$

Précédemment, on a montré que pour ce mode de réglage, la vitesse du vent est liée à la vitesse de la turbine. On a donc :

$$P_{elec} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \cdot \frac{C_p}{\lambda^3} \cdot \Omega_T^3 \tag{II.45}$$

Dès lors, la relation de vitesse permettant d'obtenir une vitesse constante s'écrit:

$$\lambda_{\Omega const} = \sqrt[3]{\frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \cdot \frac{1}{P_{elec}} \cdot \Omega_{T-est}^3} \tag{II.46}$$

$$\lambda_{\Omega const} = \sqrt[3]{\frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \cdot \frac{1}{P_{elec}} \cdot \frac{1}{G} \cdot \Omega_{mec}^3} \tag{II.47}$$

La représentation sous forme de schéma-blocs devient :

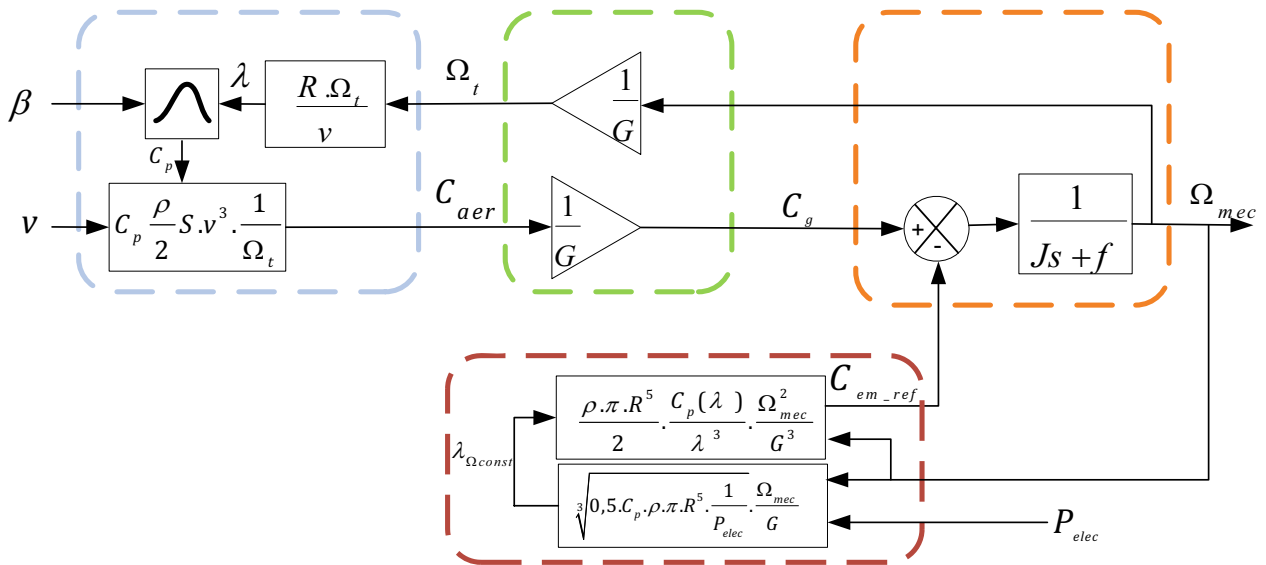


Figure II.23 – Fonctionnement à vitesse constante en zone 2 sans asservissement de vitesse

## II.7. ZONE 3(FONCTIONNEMENT A PUISSANCE CONSTANTE)

Dans cette partie, nous allons décrire les différentes méthodes permettant de contrôler la turbine pour un fonctionnement à puissance constante (zone 4 de la caractéristique de fonctionnement de la figure II.5).

### II.7.1. Modélisation du système d'orientation des pales

La plupart des grandes turbines éoliennes utilise deux principes de contrôle aérodynamique pour limiter la puissance extraite de la génératrice à sa valeur nominale :

- Un système d'orientation des pales qui permet d'ajuster la portance des pales à la vitesse du vent pour maintenir une puissance sensiblement constante.
- Un système à décrochage aérodynamique qui consiste à concevoir la forme des pales de manière à augmenter les pertes de portance au delà d'une certaine vitesse de vent.

Les éoliennes à vitesse fixe de petites puissances utilisent généralement le système à décrochage dynamique [AKE 02], plus économique. Les éoliennes à vitesse variable, de puissance nettement supérieure, utilisent un système d'orientation des pales. Les constructeurs justifient ces choix par des considérations technico-économiques [MUL 03].

Le système d'orientation des pales sert essentiellement à limiter la puissance générée. Avec un tel système, la pale est tournée par un dispositif de commande appelé "pitch control".

En réglant l'angle d'orientation des pales, on modifie les performances de la turbine, et plus précisément le coefficient de puissance. Les pales sont face au vent en basses vitesses, puis, pour les fortes vitesses de vent, s'inclinent pour de grader le coefficient de puissance. Elles atteignent la position " en drapeau" à la vitesse maximale  $\Omega_{cut-out}$ .

Le système de régulation de la puissance par orientation des pales possède les avantages suivants :

- Il permet d'effectuer un contrôle actif de la puissance pour de larges variations du vent (bien sur en dessous de la limite de sécurité).
- Il offre une production d'énergie plus importante que les éoliennes à décrochage STALL pour la plage de fonctionnement correspondant aux fortes vitesses de vent.
- Il facilite le freinage de l'éolienne, en réduisant la prise du vent des pales, ce qui limite l'utilisation de freins puissants.
- Ce type de régulation réduit les efforts mécaniques lors des fonctionnements sous puissance nominale et sous grandes vitesses.

L'entrée de commande du système d'orientation des pales est la puissance électrique mesurée [POP 04].

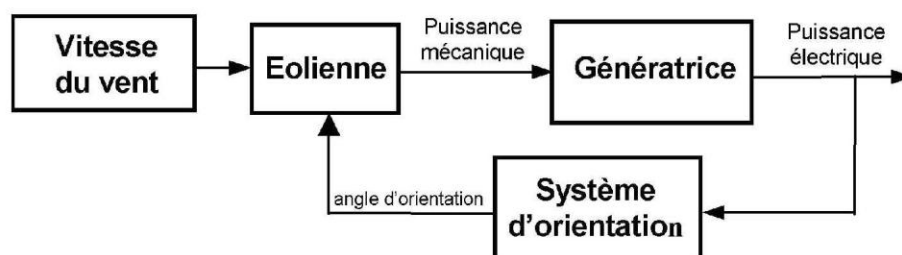


Figure II.24 –Application du système d'orientation des pales

### II.7.1.1. *Système d'orientation*

On retrouve peu d'informations dans la littérature concernant le système d'orientation des pales. Il existe divers types de systèmes de régulation de l'angle de calage des pales. L'angle peut être variable tout le long de la pale, ou simplement sur le bout des pales. L'angle de calage est commandé soit par des masses en rotation utilisant la force centrifuge, soit par un système hydraulique ou des moteurs électriques qui nécessitent une source d'énergie externe [HEI06]. Le transfert de cette énergie jusqu'aux pales en rotation augmente considérablement les coûts de fabrication. Le système hydraulique est néanmoins le plus utilisé dans les aérogénérateurs de petite et moyenne puissance alors que le système électrique est uniquement utilisé pour les éoliennes de forte puissance.

Le régulateur est conçu soit pour le calage de toutes les pales soit pour celui de chacune d'elles indépendamment. Cette régulation indépendante donne plus de degrés de liberté au système de commande. L'exploitation de ces degrés de liberté supplémentaires est en train d'être étudiée par certains chercheurs. Cette exploitation permettrait notamment de diminuer les efforts subis par les pales. La régulation indépendante du pas des pales est une innovation importante qui introduira plus d'intelligence dans le système de commande des aérogénérateurs.

Cette indépendance est cependant dangereuse car elle peut entraîner un déséquilibre aérodynamique dans la turbine, au risque d'augmenter considérablement les charges subies par certains éléments de l'éolienne. Un système précis de mesure de la position angulaire est par conséquent utilisé pour assurer que l'angle de calage de chacune des pales soit le même.

L'actionneur génère un couple électromoteur  $C_{mot}$  à partir de la tension  $U$  qui lui est appliquée. Le moment d'inertie de la pale et le coefficient de frottement sont notés respectivement  $J_{pale}$  et  $f_{pale}$ . Le dispositif de commande est composé par quatre fonctions : le contrôle de l'actionneur, la régulation de la vitesse de l'angle, la régulation de l'angle, la génération de l'angle de référence permettant d'obtenir une puissance électrique constante. Ces fonctionnalités sont maintenant détaillées.

### II.7.1.2. *Génération de l'angle de référence :*

L'angle d'orientation des pales doit être régulé de manière à maintenir constante la puissance électrique générée. La forme des pales et, plus généralement, les caractéristiques de la turbine jouent un rôle primordial dans ce réglage de puissance.

Le modèle non-linéaire de la turbine rend complexe une conception analytique de ce réglage. De plus, de très grandes disparités (dues aux élasticités) peuvent apparaître d'une turbine à l'autre. C'est pourquoi il est plus pratique d'utiliser une caractéristique expérimentale de la puissance électrique mesurée pour différentes orientations de la pale. La caractéristique de réglage inverse permet de donner directement pour une puissance donnée, l'angle de la pale correspondant à la variation.

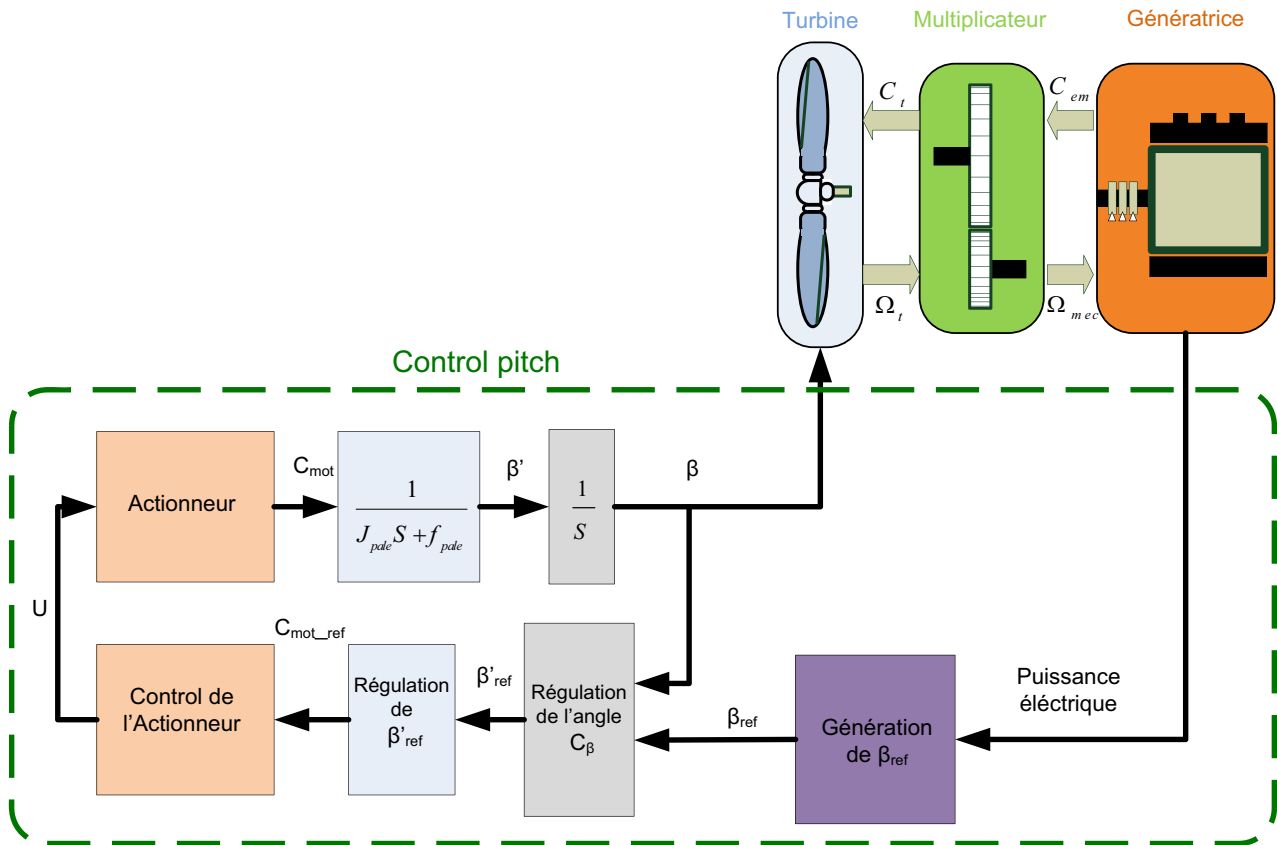


Figure II.25 –Schéma bloc de du système d'orientation des pales

La caractéristique issue des mesures sur une éolienne réelle montre que l'angle de calage est fixé à la valeur de  $0^\circ$  pour une variation de puissance allant de 0 jusqu'à environ 1.5 MW. Ensuite, cet angle varie verticalement pour atteindre des valeurs très importantes, jusqu'à  $85^\circ$ , dans l'objectif de maintenir la puissance constante à environ 1550 kW. Cette caractéristique est donc introduite dans le programme de simulation, pour compléter le modèle du système d'orientation des pales.

### II.7.1.3. Système de régulation de l'angle d'orientation

Le régulateur peut être théoriquement conçu soit pour le calage de toutes les pales, soit pour celui de chacune d'elles indépendamment. Mais, dans un but de simplicité, on supposera que l'angle de référence est appliqué sur les trois actionneurs d'orientation.

Il existe deux technologies d'actionneurs électriques :

- Pour un actionneur pas à pas, l'angle de calage est obtenu à partir d'une variation pas à pas en fonction de la vitesse du vent.
- Pour un actionneur linéaire, la variation de l'angle de calage est réalisée, selon une fonction linéaire de la vitesse du vent.

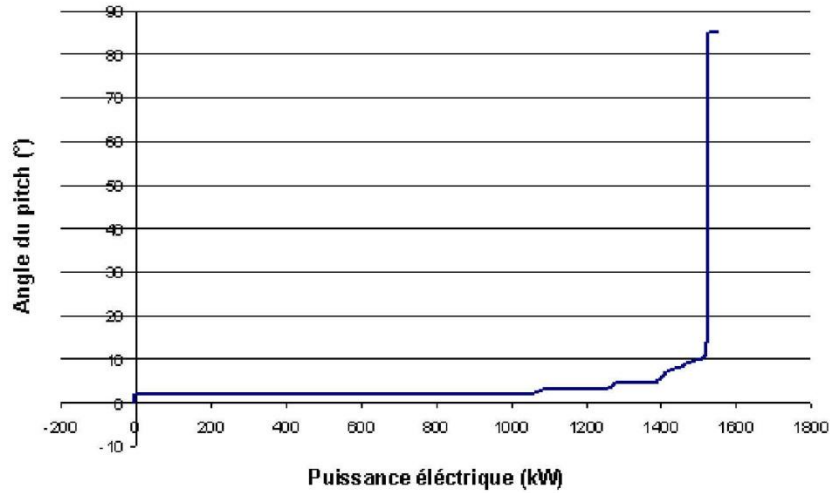


Figure 2.26 – Génération de l'angle de référence

Beaucoup de couples entrent en jeu dans l'étude dynamique du système de régulation du pas d'une pale [HEI 06]. La représentation de ces couples ou moments exige la modélisation de la dynamique des structures de la pale, du comportement de l'air autour des pales ou encore la prise en compte des frictions dans les paliers. De plus, la régulation de la vitesse de rotation autour de l'axe longitudinal des pales a une bande passante bien plus grande que celle de la régulation de l'angle lui-même. Compte tenu de ces deux dernières observations, on décide d'approcher la boucle de régulation de la vitesse de variation de l'angle de calage par un système linéaire du premier ordre contenant la dynamique principale définie par la constante de temps  $T_\beta$ .

Généralement, le système d'orientation de l'angle d'orientation est approché par une fonction de transfert du 1<sup>er</sup> ordre [KOD 01]. En effet, si l'on considère que la régulation de la vitesse de l'angle de calage et le contrôle de l'actionneur sont parfaitement réalisés (ou en un temps court par rapport à la dynamique de réglage de l'angle)

Dans ces conditions, la figure II.25 peut être simplifiée par la figure II.27.



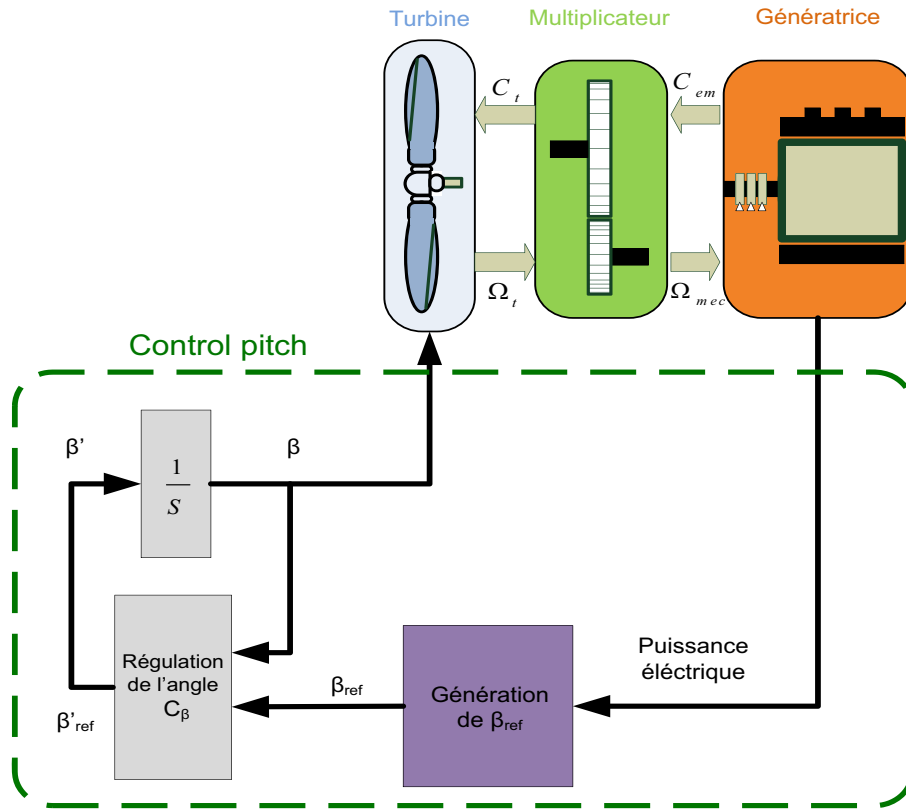


Figure II.27 – Schéma bloc de l'orientation des pales en boucle fermée

On obtient donc le modèle simplifié sous forme de schéma-blocs de la figure 2.28.

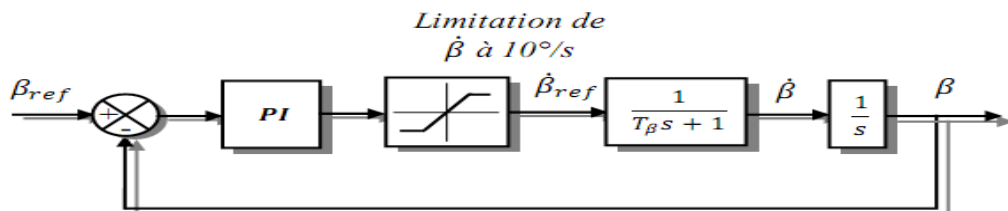


Figure II.28 – Modélisation du système de régulation de l'angle de calage en boucle fermée

Lors de la modélisation du système de commande de l'orientation des pales, il est très important de modéliser la vitesse de variation de cet angle. En effet, compte tenu des efforts subis par les pales, la variation de l'angle de calage doit être limitée à environ  $10^\circ/s$  [SLO 03] lors d'un fonctionnement normal et à  $20^\circ/s$  pour des cas d'urgence [HEI 06]. La régulation de l'angle de calage est donc modélisée par un régulateur générant une référence de vitesse de variation de l'angle. Il existe plusieurs façons de concevoir le système de régulation de l'angle des pales en boucle fermée.

La régulation de l'angle de calage est donc modélisée, comme illustré dans la Figure II.28, par un régulateur à action proportionnelle P générant une référence de vitesse de variation du pitch ; cette référence est limitée puis un système du premier ordre, de constante de temps  $T_\beta$ , donne le comportement dynamique de la commande de vitesse de variation du pitch. L'angle de calage lui-même est ensuite obtenu en intégrant les variations de l'angle.

Nous présentons deux techniques de réglage d'angle de la pale rencontrées dans la littérature.

### II.7.1.3.1. Régulation de l'angle à partir de gains

Cette technique de régulation n'utilise que deux gains et un comparateur et a donc l'avantage d'être facilement réalisable sous format analogique (figure II.29).

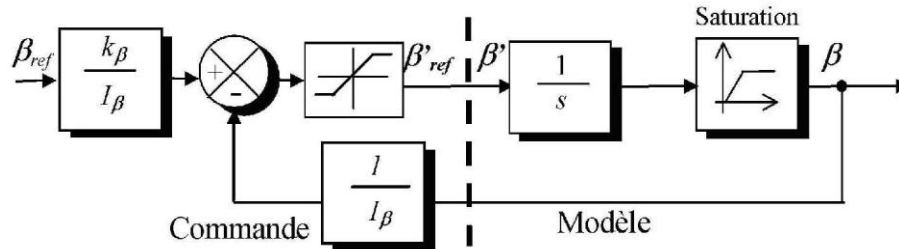


Figure II.29 – Schéma bloc d'une boucle de régulation de l'angle de la pale

La réponse de ce système en boucle fermée correspond à un système du 1<sup>er</sup> ordre:

$$G(s) = \frac{\beta}{\beta_{ref}} = \frac{k_{\beta}}{1+I_{\beta} \cdot s} \quad (II.48)$$

Le temps de réponse est fixé par le gain  $I_{\beta}$ , et le gain statique par le gain  $k_{\beta}$ .

### II.7.1.3.2. Régulation de l'angle avec régulateur PI

Généralement, les régulateurs utilisés pour la régulation de l'angle d'orientation sont les régulateurs PI [HAN 99]. Le correcteur PI utilisé a pour expression:

$$\frac{\beta'_{ref}(s)}{\epsilon(s)} = C_{\beta} = k_{\beta} + \frac{I_{\beta}}{s} \quad (II.49)$$

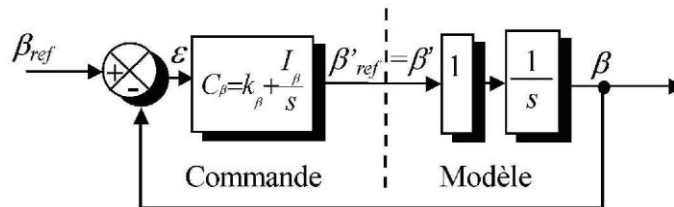


Figure II.30 – Régulation de l'angle avec un correcteur PI

La réponse de ce système en boucle fermée est la suivante :

$$\beta = \frac{\left(\frac{k_{\beta}}{I_{\beta}} \cdot s + 1\right)}{\frac{s^2 + \frac{k_{\beta}}{I_{\beta}} \cdot s + 1}{I_{\beta} + I_{\beta} \cdot s + 1}} \cdot \beta_{ref} \quad (II.50)$$

Les paramètres du dénominateur de cette fonction correspondent à ceux d'un second ordre et sont calculés de manière classique pour avoir un facteur d'amortissement égal à 1 et une pulsation naturelle donnée. On trouve alors :  $I_{\beta} = \omega_n^2$  et  $k_{\beta} = 2 \cdot \xi \cdot \omega_n$

**II.7.1.4. Résultats de simulation**

Pour valider le système de régulation de l'angle, nous avons appliqué à la turbine un profil de vent variable autour de 11m/s avec des rafales allant jusqu'à 12m/s (valeur permettant d'avoir environ 1.55 MW), (figure II.31). Le régulateur utilisé est le régulateur PI.

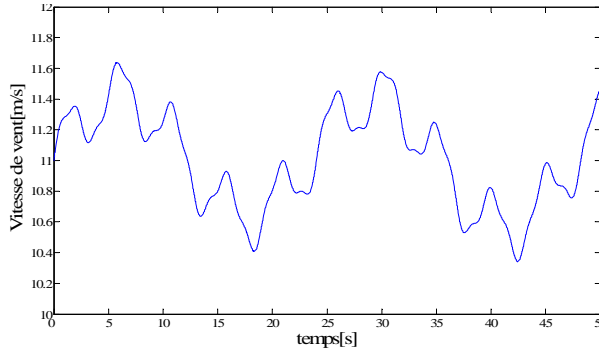


Figure II.31 – Profil du vent appliqué à la turbine éolienne

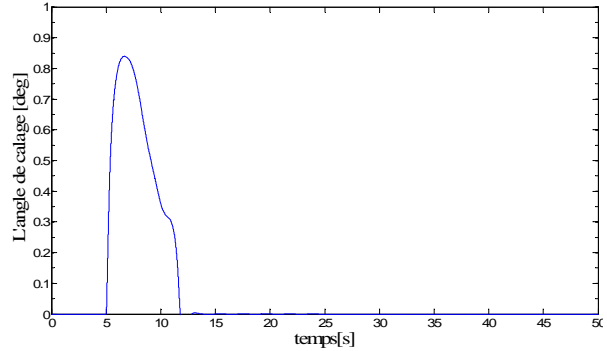


Figure II.32 - Le système d'orientation des pales

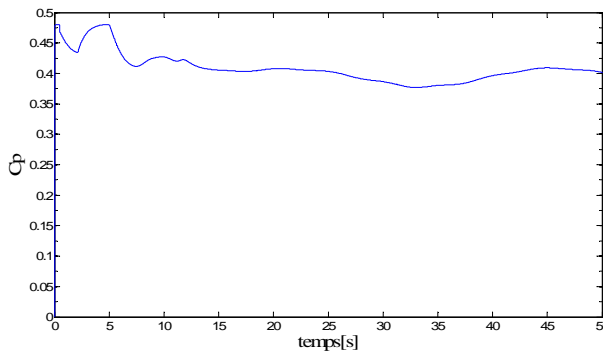


Figure II.33 – Le coefficient de puissance.

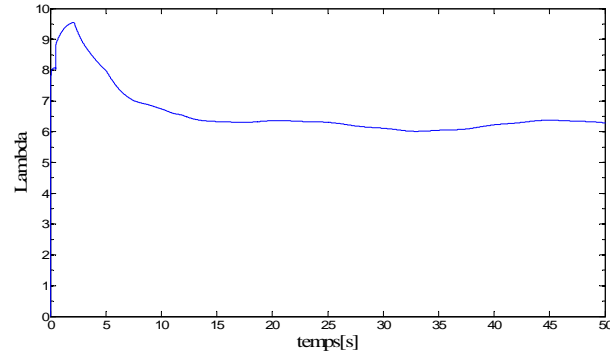


Figure II.34 – La vitesse spécifique.

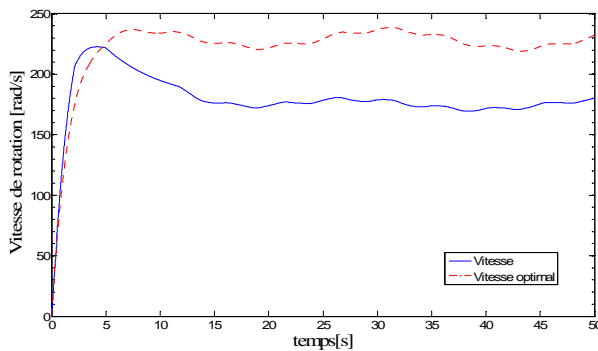


Figure II.35 – La vitesse mécanique.

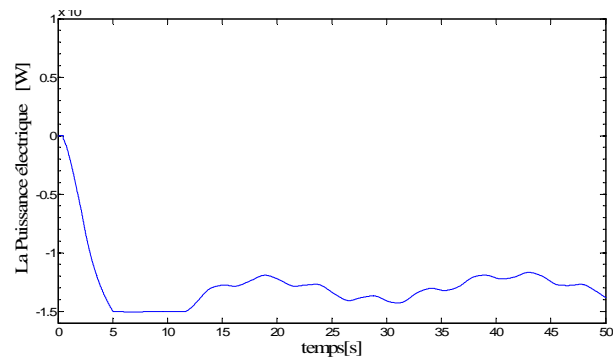


Figure II.36 – La Puissance électrique produite.

Nous présentons sur la (figure II.36), l'évolution temporelle de la puissance électrique et celle du coefficient de puissance (figure II.33) en fonction du ratio de vitesse et de l'angle de calage. On constate notamment que la puissance produite est fluctuante suivant les fluctuations de la vitesse du vent, avec une valeur maximale pour la puissance de 1555 kW. lorsque le vent est supérieur à 11.6m/s. Le coefficient de puissance décroît en fonction du ratio de vitesse lorsque la puissance est limitée.

## 2.9 Conclusion

Nous nous sommes intéressés aux éoliennes à vitesse variable. Après avoir présenté les différentes zones de fonctionnement, nous avons, détaillé la zone particulière, où la maximisation de l'énergie extraite du vent est effectuée. Cette opération est réalisée par le contrôle du couple électromagnétique généré. Pour ce faire, différentes techniques de maximisation de la puissance extraite de la turbine ont été explicitées.

Ces algorithmes ont été validés par des résultats de simulation, qui ont montré leurs inconvénients et leurs avantages.

La dernière partie de ce chapitre a fait l'objet d'une étude permettant d'illustrer les principales méthodes pour contrôler la puissance aérodynamique recueillie par la turbine et ainsi limiter cette puissance lorsque le vent devient trop élevé. Dans cette partie, nous avons décrit deux correcteurs permettant le réglage de l'angle pour un fonctionnement à puissance électrique constante. Une de ces stratégies a été validée au moyen de résultats de simulation.

## Chapitre 3

# Modélisation d'une Chaîne éolienne Utilisant MPPT

Maintenant que nous disposons d'une modélisation l'éolienne, il nous faut choisir et modéliser la génératrice. Après avoir présenté les différentes stratégies de commande au chapitre 2, nous cherchons un type de génératrice qui nous permettra de commander indépendamment des puissances actives et réactives.

Ainsi, nous nous sommes orientés vers le choix d'une machine asynchrone à double alimentation afin de permettre une production optimale d'électricité quelles que soient les conditions de vent et de vitesse de l'éolienne. De plus, nous avons pu noter au chapitre 1 que la plupart des éoliennes de forte puissance étaient équipées de MADA (Machine Asynchrone à Double Alimentation). Cette machine présente des avantages de par son contrôle et son fonctionnement pour la production d'électricité, en plus de son prix compétitif et de sa grande robustesse.

En comparaison avec la machine asynchrone à cage, la MADA permet d'avoir une plage de vitesse de rotation variant de +30% autour de la vitesse de synchronisme. De plus, le contrôle des tensions rotoriques nous permet de maîtriser les puissances produites tant au niveau actif que réactif, ce qui est un point très intéressant pour la gestion de l'éolienne et la participation

### III.1. MODELE DE LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION(MADA)DANS LE PLAN ABC

Cette section décrit le modèle dynamique d'une machine asynchrone à double alimentation. La machine asynchrone à double alimentations se compose principalement de deux parties, *stator* et *rotor* (Fig III.1). Le rotor tourne à l'intérieur de la cavité de la machine et est séparé du stator par *un entrefer*. En principe les circuits électriques du stator et du rotor sont constitués de trois enroulements identiques couplés en étoile (ou en triangle) à la seule différence est que celui du rotor relié à trois ou quatre bagues sur lesquelles glissent des balais. Les trois enroulements du stator (A, B et C) sont parallèles aux enroulements du rotor et sont distribués sinusoïdalement, décalés de 120 degrés l'un par rapport à l'autre. La figure (I.2) illustre la distribution des enroulements dans une machine asynchrone à rotor bobiné à une paire de pôle  $P=1$ . Souvent la machine sera construite avec plusieurs paires de pôles en reliant les enroulements en parallèle et les bobines seront décalées de  $120/P$ . Dans ce cas la machine donne un couple plus grand et une vitesse de rotation réduite.[ZHA99].

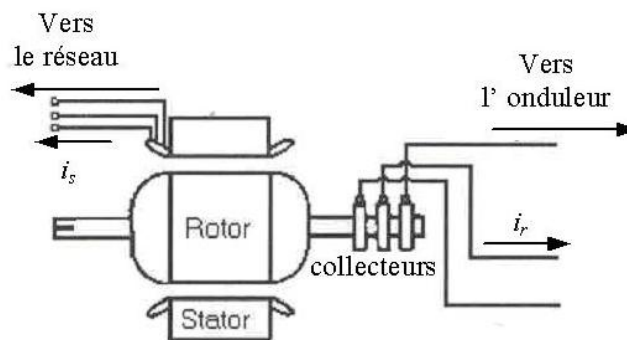


Figure III.1- Constitution du MADA

#### III.1.1. Hypothèses simplificatrices

La machine asynchrone à double alimentation (MADA), avec la répartition de ses enroulements et sa géométrie propre est très complexe pour se prêter à une analyse tenant compte de sa configuration exacte. De ce fait, la mise en équations nous impose certaines hypothèses simplificatrices, dans le but d'établir un modèle simple, qui sont [CHA83],:

- La machine est de constitution symétrique.
- On suppose que le circuit magnétique est parfaitement feuilleté au stator et au rotor (seuls les enroulements sont parcourus par des courants) et que la densité de courant peut être considérée comme uniforme dans la section des conducteurs élémentaires (absence d'effet pelliculaire).
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température.
- On suppose que le circuit magnétique n'est pas saturé, condition nécessaire pour considérer les flux comme fonction linéaire des courants.

- On considère que la force magnétomotrice créée par chacune des phases statoriques et rotoriques est à répartition sinusoïdale.
- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encoche est négligé, les inductances propres sont constantes et les inductances mutuelles sont des fonctions sinusoïdales de l'angle entre les axes rotoriques et statoriques.

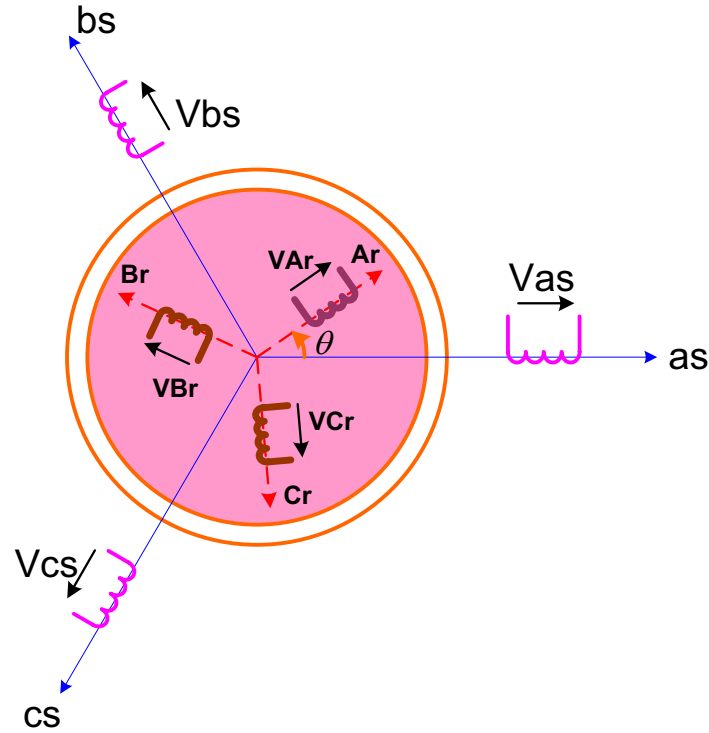


Figure III.2- Représentation de la Machine asynchrone à double alimentation

$a_s, b_s, c_s$  : phase du stator.

$A_r, B_r, C_r$ : phase du rotor.

### III.1.2. Equations électriques de la machine

Avec les hypothèses citées ci dessus, les équations des tensions des phases statoriques et Rotoriques qui décrivent le fonctionnement de la machine s'écrivent comme suit :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d[\varphi_s]}{dt} \\ [V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d[\varphi_r]}{dt} \end{cases} \quad (III.1)$$

Les flux sont donnés par :

$$\begin{cases} [\varphi_s] = [L_{ss}] \cdot [I_s] + [M_{sr}] \cdot [I_r] \\ [\varphi_r] = [L_{rr}] \cdot [I_r] + [M_{rs}] \cdot [I_s] \end{cases} \quad (III.2)$$

avec :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix}, \quad [I_s] = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix}, \quad [\varphi_s] = \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix}$$

$$[V_r] = \begin{bmatrix} v_{Ar} \\ v_{Br} \\ v_{Cr} \end{bmatrix}, \quad [I_r] = \begin{bmatrix} i_{Ar} \\ i_{Br} \\ i_{Cr} \end{bmatrix}, \quad [\varphi_r] = \begin{bmatrix} \varphi_{Ar} \\ \varphi_{Br} \\ \varphi_{Cr} \end{bmatrix}$$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}, \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

$R_s, R_r$ : Résistances des enroulements statoriques et rotoriques.

Les flux sont donnés par:

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix}, \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix}$$

$l_s, l_r$ : Inductances de fuites des statoriques et rotoriques.

$M_s, M_r$ : inductances mutuelles.

la matrice des inductances mutuelles ( matrice de couplage rotor-stator) s'écrit :

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t M \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (III.3)$$

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t$$

En remplaçant (III.2) dans (III.1),on obtient le système suivant :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} ([L_{ss}] \cdot [I_s] + [M_{sr}] \cdot [I_r]) \\ [V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt} ([L_{rr}] \cdot [I_r] + [M_{rs}] \cdot [I_s]) \end{cases} \quad (III.4)$$

### III.1.3. Equations mécaniques de la machine

Le couple électromagnétique est donné par l'expression générale suivante :

$$C_{em} = p [I_s]^t \cdot \frac{d}{d\theta} ([M_{sr}] \cdot [I_r]) \quad (III.5)$$

Donc, l'équation mécanique de la machine s'écrit :

$$J \frac{d}{dt} \Omega = C_{em} - C_r - K_f \cdot \Omega \quad (III.6)$$

La résolution analytique dans ce repère est très difficile car le système d'équations est à coefficients variables en fonction de  $\theta$  (angle de rotation de la machine).



### III.2. MODELE DE LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION DANS LE PLAN DQ

#### III.2.1. La transformation de Park

La transformation de Park consiste à transformer les enroulements statoriques et rotoriques en enroulements orthogonaux équivalents, afin d'obtenir un modèle mathématique plus simple que le modèle physique du système [BAR82]

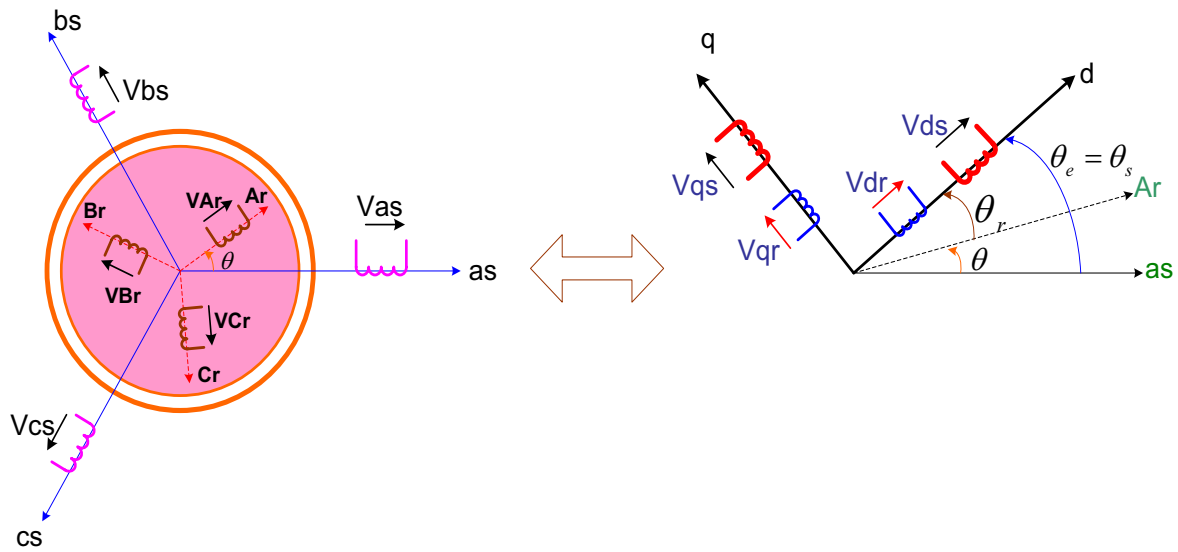


Figure III.3 – Passage du triphasé au biphasé .

La matrice de transformation est définie par :

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (III.7)$$

L'angle  $\theta$  est au choix de l'utilisateur et peut dépendre du temps. Le fait que  $[P(\theta)]$  soit orthonormée implique que son inverse est égale à sa transposée.

$$[P(\theta)]^{-1} = [P(\theta)]^t$$

### III.3. MODELISATION DE LA MADA DANS LE REPERE DE PARK

Les tensions, courants et les flux se transforment de la manière suivante :

$$\begin{cases} [V_{dqo}]_s = [P(\theta_s)] \cdot [V_s] \\ [V_{dqo}]_r = [P(\theta_r)] \cdot [V_r] \end{cases} \begin{cases} [I_{dqo}]_s = [P(\theta_s)] \cdot [I_s] \\ [I_{dqo}]_r = [P(\theta_r)] \cdot [I_r] \end{cases} \begin{cases} [\varphi_{dqo}]_s = [P(\theta_s)] \cdot [\varphi_s] \\ [\varphi_{dqo}]_r = [P(\theta_r)] \cdot [\varphi_r] \end{cases}$$

Les relations entre les flux et les courants sont données par :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s \cdot I_{ds} + M \cdot I_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s \cdot I_{qs} + M \cdot I_{qr} \end{cases} \begin{cases} \varphi_{dr} = L_r \cdot I_{dr} + M \cdot I_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r \cdot I_{qr} + M \cdot I_{qs} \end{cases} \quad (III.8)$$

tel que :

$L_r = l_r - M_r$  : Inductance cyclique rotorique.

$L_s = l_s - M_s$  : Inductance cyclique statorique.

$M = \frac{3}{2} M_{sr} = \frac{3}{2} M_{rs}$  Mutuelle cyclique entre rotor-stator.

Les équations électriques sont :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} + \frac{d}{dt} \varphi_{ds} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \frac{d}{dt} \varphi_{qs} + \omega_s \varphi_{ds} \\ V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d}{dt} \varphi_{dr} - (\omega_s - \omega) \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d}{dt} \varphi_{qr} + (\omega_s - \omega) \varphi_{dr} \end{cases} \quad (III.10)$$

Avec :  $\begin{cases} \omega_e = \frac{d\theta_e}{dt} \\ \omega = \frac{d\theta}{dt} \end{cases}$  avec  $\theta_e = \theta_s = \theta + \theta_r$

### III.4. CHOIX DU REFERENTIEL

#### III.4.1. Référentiel lié au stator

$$\frac{d\theta_s}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{d\theta_r}{dt} = -\frac{d\theta}{dt} = -\omega$$

Ce référentiel est mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées .

#### III.4.2. Référentiel lié au rotor

Ce référentiel est caractérisé par  $\omega_e = \omega$ . Il est intéressant dans l'étude des régimes transitoires où la vitesse est supposée constante.

Il se traduit par la condition :

$$\frac{d\theta_r}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{d\theta_s}{dt} = \frac{d\theta}{dt} = \omega$$

### III.4.3. référentiel lié au champ tournant

Ce référentiel est caractérisé par  $\omega_e = \omega_s$ . Dans ce cas les grandeurs statoriques et rotoriques sont connues en régime permanent. Il est donc préférable de travailler dans ce repère lors d'une étude de la commande des machines. [KRI87]

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s, \quad \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - \omega = g\omega_s$$

Le modèle de la machine asynchrone à double alimentation s'écrit dans le repère de PARK lié au champ tournant comme suit :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} + \frac{d}{dt} \varphi_{ds} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \frac{d}{dt} \varphi_{qs} + \omega_s \varphi_{ds} \end{cases} \quad (III.11)$$

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d}{dt} \varphi_{dr} - (\omega_s - \omega) \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d}{dt} \varphi_{qr} + (\omega_s - \omega) \varphi_{dr} \end{cases} \quad (III.12)$$

Avec :

$$\begin{cases} C_{em} = p \frac{M}{L_r} (\varphi_{dr} i_{qs} - \varphi_{qr} i_{ds}) \\ J \frac{d}{dt} \Omega = C_{em} - C_r - C_f \end{cases} \quad (III.13)$$

### III.5. MISE SOUS FORME D'EQUATIONS D'ETAT

Vu la nécessité de représenter le modèle non linéaire de la machine asynchrone à double alimentation sous forme d'équation d'état. Nous allons choisir dans tout ce qui suivra, le vecteur  $[\varphi_{ds}, \varphi_{qs}, i_{dr}, i_{qr}, \omega]^T$  comme vecteur d'état et les grandeurs  $V_{dr}, V_{qr}$  comme variable de commande. [PET03].

Après le calcul, nous aboutissons au système suivant:

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_{ds}}{dt} = -\alpha_s \varphi_{ds} + \omega_s \varphi_{qs} + \alpha_s M i_{dr} + V_{ds} \\ \frac{d\varphi_{qs}}{dt} = -\alpha_s \varphi_{qs} - \omega_s \varphi_{ds} + \alpha_s M i_{qr} + V_{qs} \\ \frac{di_{dr}}{dt} = -\gamma_r i_{dr} + (\omega_s - \omega) i_{qr} + \alpha_s \beta \varphi_{ds} - \beta p \omega \varphi_{qs} - \beta V_{ds} + \frac{1}{\sigma_r} V_{dr} \\ \frac{di_{qr}}{dt} = -\gamma_r i_{qr} - (\omega_s - \omega) i_{dr} + \alpha_s \beta \varphi_{qs} + \beta p \omega \varphi_{ds} - \beta V_{qs} + \frac{1}{\sigma_r} V_{dr} \\ \frac{d\omega}{dt} = \left[ \frac{p\mu}{J} (\varphi_{qs} i_{dr} - \varphi_{ds} i_{qr}) - \frac{1}{J} C_r - \frac{f_r}{J} \omega \right] \end{cases} \quad (III.14)$$

Avec :

$$\alpha_s = \frac{R_s}{L_s}, \quad \sigma_r = L_r \left(1 - \frac{M^2}{L_s L_r}\right), \quad \gamma_r = \frac{R_r}{\sigma_r} + \frac{R_s M^2}{L_s^2 \sigma_r}$$

$$\beta = \frac{M}{L_s \sigma_r}, \mu = \frac{3M}{2L_s}$$

### III.6. STRATEGIE DE COMMANDE DE LA MADA

Il a été montré dans le premier chapitre que l'utilité de la MADA est de permettre le fonctionnement à vitesse variable, ceci est nécessaire pour extraire le maximum de puissance à partir du vent et ainsi augmenter le rendement de la machine.

Pour avoir un fonctionnement à vitesse de rotation donnée correspondant à une vitesse de vent, il faut que la machine impose un couple résistant permettant ce fonctionnement. Etant donné que la puissance est le produit de la vitesse et du couple il suffit d'avoir une référence de puissance qu'il faut suivre pour fonctionner à vitesse optimale. Ainsi une commande vectorielle de la MADA sera réalisée, celle-ci sera détaillée dans la suite de notre travail.

### III.7. COMMANDE VECTORIELLE DE LA MADA

#### III.7.1. Procédé d'orientation du flux

La méthode du flux orienté est basée sur le choix du repère de référence [MAH99]. Par le choix du repère lié au champ tournant, il découle que le flux à orienter (statorique, rotorique ou d'entrefer) doit coïncider avec l'axe « d ».

Afin d'obtenir un couple maximal, nous devons imposer l'une des conditions suivantes [YAZ96]:

- Orientation du flux rotorique:

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = \varphi_r \\ \varphi_{qr} = 0 \end{cases}$$

- Orientation du flux statorique:

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = \varphi_s \\ \varphi_{qs} = 0 \end{cases}$$

- Orientation du flux magnétisant:

$$\begin{cases} \varphi_{dm} = \varphi_m \\ \varphi_{qm} = 0 \end{cases}$$

Avec:

$\varphi_r$  : flux rotorique       $\varphi_s$  : flux statorique       $\varphi_m$  : flux magnétisant

Dans notre étude nous optons pour l'orientation du flux statorique.

On a constaté que la technique d'orientation du flux rotorique ne permet pas de découpler le flux et le couple.

La commande par orientation du flux rotorique où on a utilisé deux convertisseurs l'un au stator et l'autre au rotor. Cette commande a permis non seulement le contrôle des puissances active et réactive mais aussi le découplage entre le flux et le couple

Le référentiel diphasé choisi est celui lié au champ tournant. L'avantage d'utiliser ce référentiel est d'avoir des grandeurs constantes en régime permanent. Il est alors plus aisé d'en faire la régulation. Afin de simplifier la commande de la machine, le vecteur flux statorique  $\varphi_s$  est aligné avec l'axe « d » du repère diphasé (Figure III.4), d'où :

$$\varphi_{ds} = \varphi_s \quad (III.15)$$

$$\varphi_{qs} = 0 \quad (III.16)$$

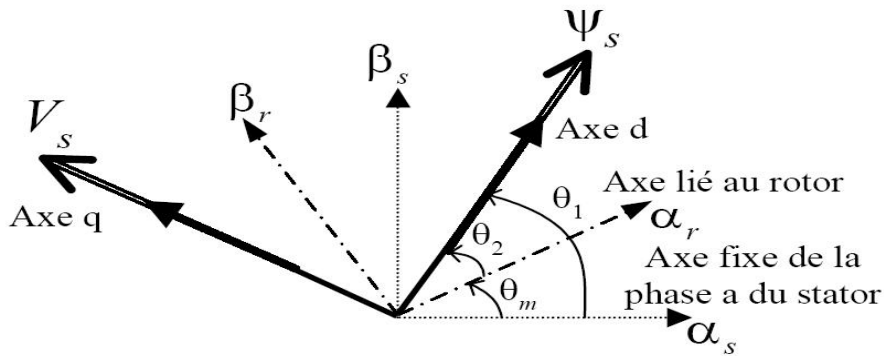


Figure III.4 - vecteurs courant et flux dans le système d'axe choisi.

L'équation du couple électromagnétique devient alors :

$$C_{em} = p \frac{M}{L_s} i_{qr} \varphi_{ds} \quad (III.17)$$

Dans l'hypothèse où le réseau auquel est connecté la MADA est stable, le flux  $\varphi_{ds}$  devient alors constant. Le choix de ce repère rend le couple électromagnétique produit par la machine et par conséquent la puissance active uniquement dépendant du courant rotorique d'axe q.

Dans le repère triphasé les tensions statoriques s'expriment par l'expression (III.1):

$$[V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d[\varphi_s]}{dt}$$

$R_s$  Étant négligeable pour les machines de forte puissance utilisées dans les turbines éoliennes [MER07], l'expression de la tension statorique devient alors :

$$V_s \cong \frac{d\varphi_s}{dt} \quad (III.18)$$

Dans le même référentiel et dans l'hypothèse où le flux statorique est constant grâce à une alimentation par un réseau stable, les équations des tensions s'exprimeront par :

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s = \omega_s \varphi_s \end{cases} \quad (III.19)$$

En utilisant les simplifications précédentes, les équations des flux s'exprimeront comme suit :

$$\begin{cases} \varphi_s = L_s \cdot I_{ds} + M \cdot I_{dr} \\ 0 = L_s \cdot I_{qs} + M \cdot I_{qr} \end{cases} \quad (III.20)$$

### III.7.2. Relations entre les courants statoriques et rotoriques

A partir des équations des composantes directes et quadrature du flux statorique (III.20), nous pouvons écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques comme suit :

$$\begin{cases} I_{ds} = \frac{\varphi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} \cdot I_{dr} \\ I_{qs} = -\frac{M}{L_s} \cdot I_{qr} \end{cases} \quad (III.21)$$

### III.7.3. Expression des puissances actives et réactives dans le repère synchrone

Dans un repère diphasé quelconque les puissances actives et réactives sont exprimées par :

$$\begin{cases} P = V_{ds} \cdot I_{ds} + V_{qs} \cdot I_{qs} \\ Q = V_{qs} \cdot I_{ds} - V_{ds} \cdot I_{qs} \end{cases} \quad (III.22)$$

L'application des hypothèses choisies ainsi que le système d'axes nous permet d'établir la simplification suivante :

$$\begin{cases} P = V_s \cdot I_{qs} \\ Q = V_s \cdot I_{ds} \end{cases} \quad (III.23)$$

Ainsi en remplaçant  $I_{ds}$  et  $I_{qs}$  par leurs expressions en fonction des courants rotoriques :

$$\begin{cases} P = -V_s \cdot \frac{M}{L_s} \cdot I_{qr} \\ Q = \frac{V_s \varphi_s}{L_s} - \frac{V_s M}{L_s} \cdot I_{dr} \end{cases} \quad (III.24)$$

De l'expression (III.19) nous pouvons écrire :

$$\varphi_s = \frac{V_s}{\omega_s} \quad (III.25)$$

D'où d'après (III.24)

$$Q = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - \frac{V_s M}{L_s} \cdot I_{dr} \quad (III.26)$$

En considérant la mutuelle constante, le système obtenu lie de façon proportionnelle la puissance active au courant rotorique d'axe q et la puissance réactive au courant rotorique d'axe d à la constante  $\frac{V_s^2}{\omega_s L_s}$  prés imposée par le réseau.

### III.7.4. Expressions des tensions rotoriques en fonction de courants rotoriques

Les flux rotoriques s'expriment en fonction des courants rotoriques, après avoir remplacé les courants statoriques par leur expression, de la façon suivante :

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \cdot I_{dr} + \frac{M \cdot V_s}{\omega_s L_s} \\ \varphi_{qr} = (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \cdot I_{qr} \end{cases} \quad (III.27)$$

En injectant ces équations dans les expressions des tensions rotoriques :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \cdot \frac{dI_{dr}}{dt} - g \omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \cdot I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \cdot \frac{dI_{qr}}{dt} + g \omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \cdot I_{dr} + g \omega_s \frac{M \cdot V_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (III.28)$$

En régime permanent, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques diphasés disparaissent, nous pouvons donc écrire :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} - g \omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \cdot I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + g \omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \cdot I_{dr} + g \omega_s \frac{M \cdot V_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (III.29)$$

L'étude précédemment établie nous permet de définir le schéma bloc du système à réguler (Figure III.5).

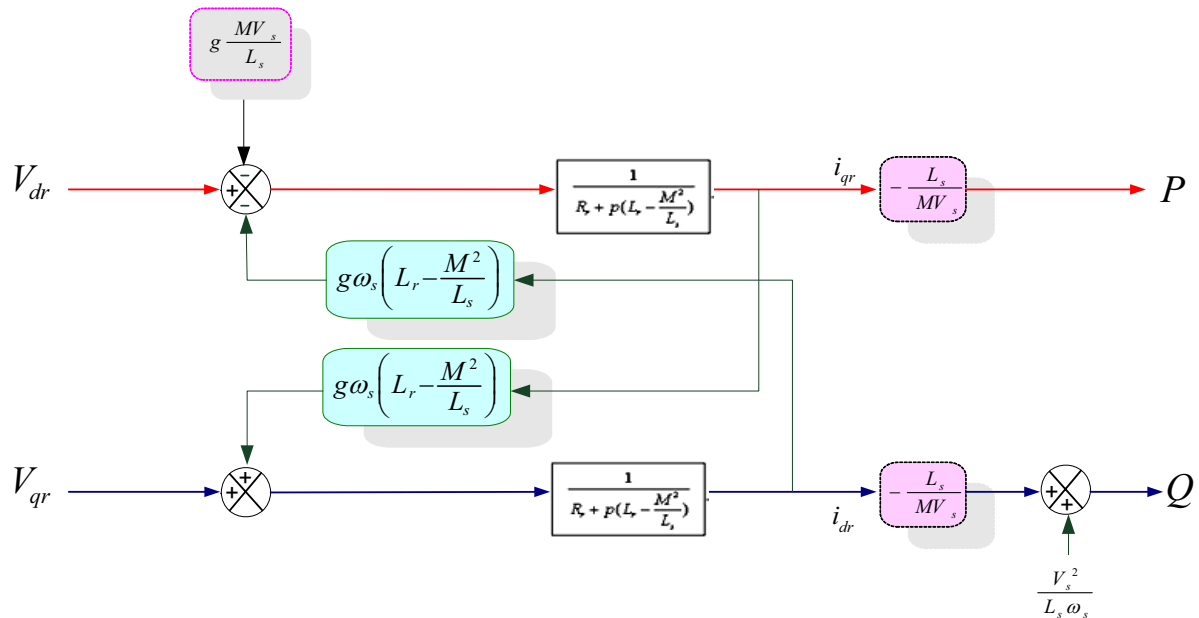


Figure III.5 – Schéma bloc du système à réguler.

Les tensions rotoriques diphasées sont les grandeurs à imposer pour contrôler les courants rotoriques.  $V_{dr}$  et  $V_{qr}$  sont ainsi considérés comme des variables de commande qui sont générées par le bloc de contrôle à flux orienté (Figure III.6) et les courants rotoriques  $I_{dr}$  et  $I_{qr}$  comme des variables d'état. Les tensions rotoriques sont ainsi fonction des grandeurs de consigne  $P_{ref}$  et  $Q_{ref}$ .

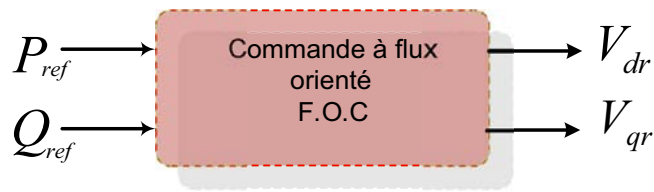


Figure III.6 – Bloc de contrôle à flux orienté.

Il est à noter que les puissances et les tensions sont liées par une fonction de transfert du premier ordre. Du fait du faible couplage entre les axes d et q (glissement faible) il est possible d'établir aisément une commande pour ce système. Ainsi les deux axes pourront être commandés séparément avec leurs propres régulateurs.

Cette commande utilisant les puissances actives et réactives comme des consignes est appelée « Commande en P et Q ».

### III.8. CALCUL DES TENSIONS ROTORIQUES DE REFERENCE POUR LA COMMANDE EN PUISSANCE ACTIVE ET REACTIVE DE LA MADA

#### III.8.1. Principe général

Dans le souci de simplifier la synthèse des régulateurs, un certain nombre d'hypothèses ont été émises. Ceci dans le but de linéariser et de simplifier le modèle de la MADA (Figure III.7).

La première simplification consiste à considérer que la dynamique des onduleurs est très rapide par rapport à celle de la MADA.

La seconde simplification consiste à considérer les termes de couplage négligeables et donc les deux axes seront ainsi considérés comme découplés.

La troisième simplification est de considérer le terme  $\frac{V_s^2}{\omega_s L_s}$  constant car il est admis que le réseau est stable et très puissant. Ainsi, cette constante n'intervient pas dans la loi de commande.

A partir du modèle précédent apparaissent deux solutions pour effectuer la commande en puissances de la MADA :

- La méthode directe consiste à réguler indépendamment chaque axe pour le contrôle des puissances. Les régulateurs de cette méthode contrôlent directement les tensions rotoriques d'où le nom explicite de ce type de commande.
- La méthode indirecte consiste à réguler indirectement les courants rotoriques. La consigne de ce type de régulation est estimée à partir des puissances de référence et le retour sur les comparateurs sera fait à partir des courants rotoriques directs et quadratures mesurés.

Il est à noter que d'autres configurations (Sans prise en compte des hypothèses simplificatrices) telles que la linéarisation autour d'un point de fonctionnement existent mais les performances obtenues ne sont meilleures qu'avec le modèle simplifié.



### III.8.2. Commande directe

En prenant en compte les hypothèses simplificatrices précédemment retenues, la commande directe sera réalisée par la mise en place d'une boucle de régulation sur chaque axe (Figure III.9).

Le découplage entre ces axes étant considéré total, la régulation sera indépendante pour chacune des puissances active et réactive. Concernant la synthèse des régulateurs celle-ci sera détaillée dans un chapitre ultérieur

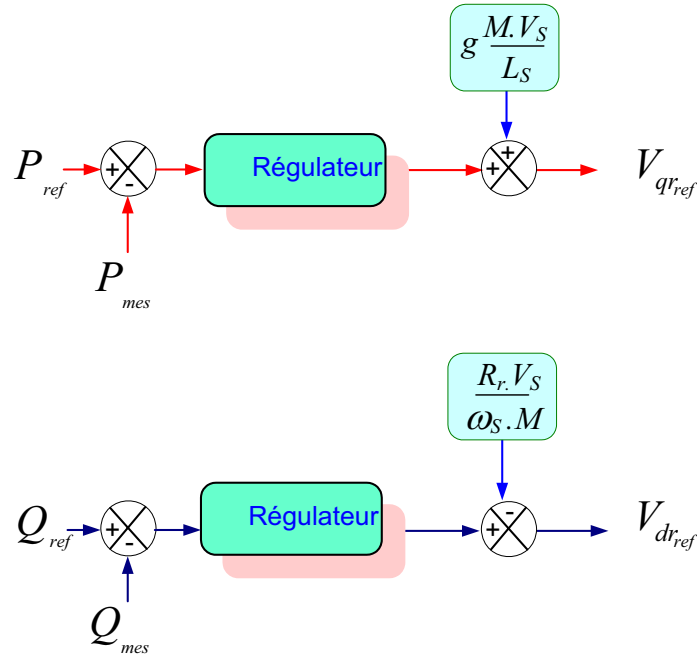


Figure III.7 – Commande indirecte sans boucle de puissance.

### III.8.3. Commande indirecte

Cette méthode consiste à estimer les valeurs des tensions rotoriques à partir des valeurs des puissances actives et réactives. Ainsi, les courants rotoriques seront régulés indirectement. Cette démarche aboutit à un modèle qui correspond à celui de la MADA mais dans le sens inverse.

Nous aurons donc un bloc de commande constitué de deux sous-systèmes. Le premier (Figure 2.10) calcule les courants de référence à partir des consignes (Puissances actives et réactives), le deuxième (Figure 2.11) calcule les tensions de référence à partir des courants rotoriques calculés par le premier sous-système.

A partir du bloc de commande nous pouvons élaborer deux structures, l'une utilise une boucle régulant le courant, et l'autre se base sur la première en lui ajoutant une boucle régulant les puissances.

#### III.8.3.1. Commande indirecte sans boucle de puissance

Cette commande consiste à réguler les courants par une boucle dans chaque axe. Les consignes de régulation sont déduites à partir des valeurs de références telles qu'illustrées dans la (figure III.7)

Les régulateurs de cette structure sont calculés de la même façon que pour la commande directe. Ils sont identiques pour chaque axe.

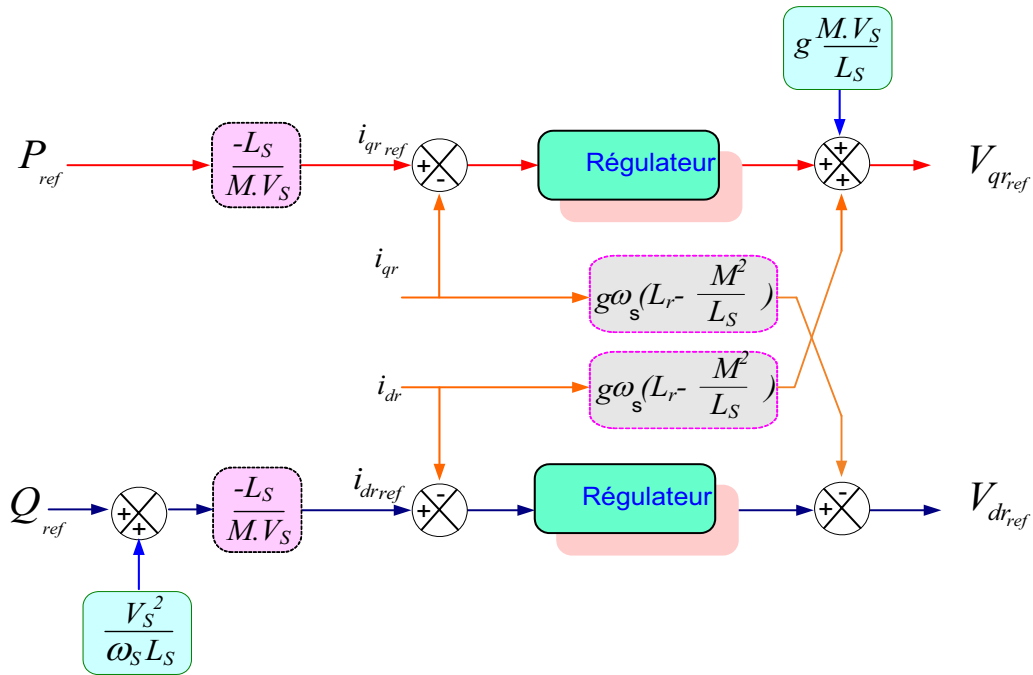


Figure III.8 – Commande indirecte sans boucle de puissance.

### III.8.3.2. Commande indirecte avec boucle de puissance

Ce type de structure (Figure III.9) est composé de deux boucles, la première est celle du courant tel qu’effectuée dans la section précédente, et la deuxième boucle est celle des puissances. Ainsi on aboutit à une régulation de la puissance à partir de consignes que l’on impose.

Les gains des régulateurs de courants sont établis de la même manière que précédemment. Les régulateurs intervenants dans la boucle de puissance sont de type proportionnel intégral, car celui-ci offre des résultats suffisamment probants

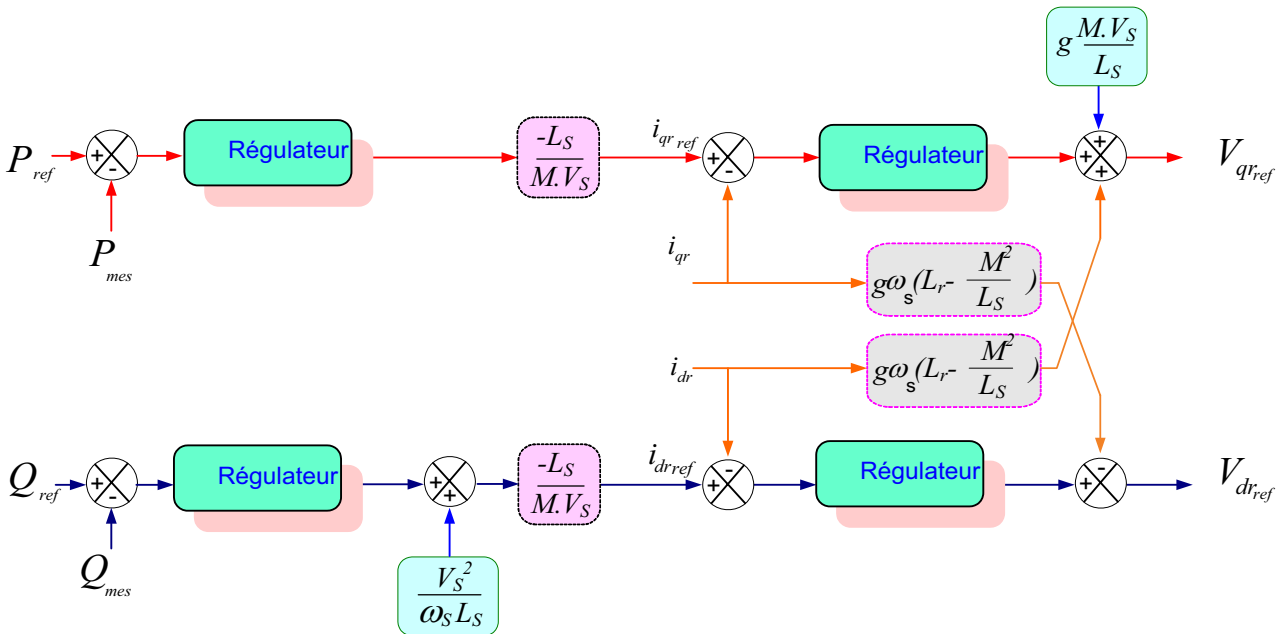


Figure III.9 – Commande indirecte avec boucle de puissance.

### III.8.3.3. Résultats de simulation

Cet essai consiste à réaliser des échelons de puissances actives et réactives tout en maintenant une vitesse d'entraînement de la MADA constante à 1410 tr/min.

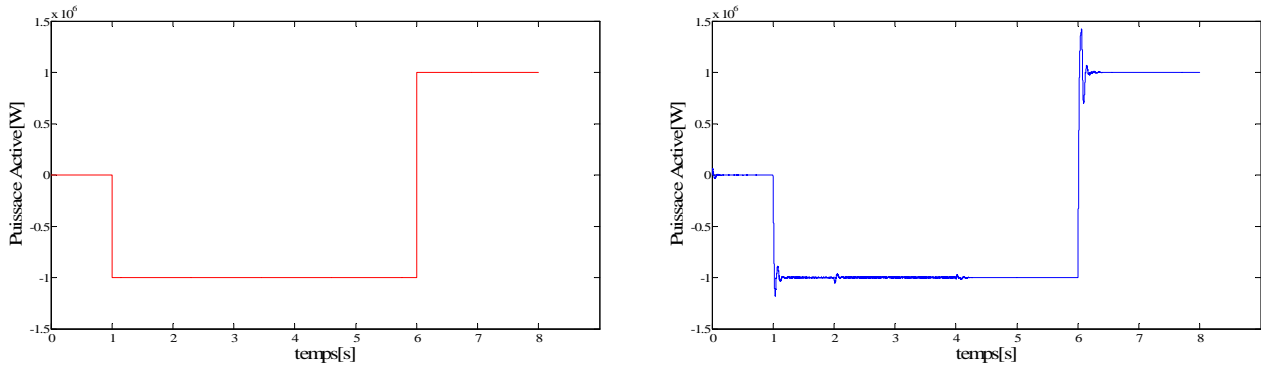


Figure III.10 – La puissance Active de référence et mesuré .

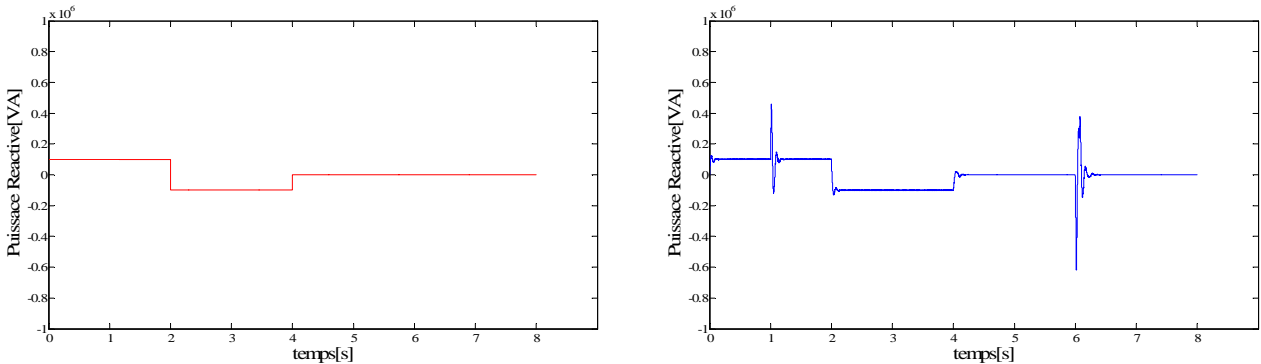


Figure III.11 – La puissance Réactive de référence et mesuré

Les résultats de la simulation (Figures III.10 et III.11) présentent les différentes courbes des puissances obtenues par la commande des puissances actives et réactives générées au niveau du stator de la MADA. Cette commande permet de découpler les expressions des puissances actives et réactives statoriques

On constate un bon suivi de consigne pour les puissances active et réactive statorique. Les résultats de simulation ont montré une bonne conformité au comportement dynamique de la machine.

La partie mécanique n'a pas été encore introduite. La machine a été entraînée à une vitesse fixe de 1350 tr/min, alimentée au rotor par un convertisseur à trois niveaux. La tension est fixée à 2000V. Nous avons soumis le système à des échelons de puissance active et réactive afin d'analyser le comportement de la régulation.

Au regard des figure de à on peut remarquer que les puissances de la machine suivent bien les références qu'on lui a appliquées. Cependant, l'effet de couplage entre les deux axes est faible et du fait de la faible valeur du glissement.

### III.9. LA CASCADE BASEE SUR UNE MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION ASSOCIE A DEUX CONVERTISSEURS A TROIS NIVEAUX

De nos jours pour la récupération de la puissance disponible au rotor, on utilise un système statique de conversion d'énergie constitué de convertisseur de puissance ainsi qu'un transformateur. Ce convertisseur qui sera donc dimensionné pour transiter seulement la puissance rotorique [MAR07]. notre étude sera basée sur la structure de "cherbius" avec convertisseurs à MLI.

Dans cette partie, nous étudions le redresseur triphasé à trois niveaux puis l'onduleur triphasé à trois niveaux. Après ça, nous présenterons le modèle du filtre intermédiaire de la cascade qui sera élaboré. Ensuite en essayant de faire l'association redresseur à MLI et l'onduleur à trois niveaux.

### III.10. DESCRIPTION DU MONTAGE

La chaîne de conversion d'énergie éolienne est constituée de la turbine éolienne étudiée dans le chapitre II, et de la machine asynchrone double alimentation associée à un convertisseur de puissance pour assurer son alimentation au rotor. La cascade présentée, comporte deux convertisseurs à MLI. L'utilisation de ce type de convertisseurs permet d'obtenir des allures de signaux de sortie en Modulation de Largeur d'Impulsion dont la modularité permet de limiter les perturbations

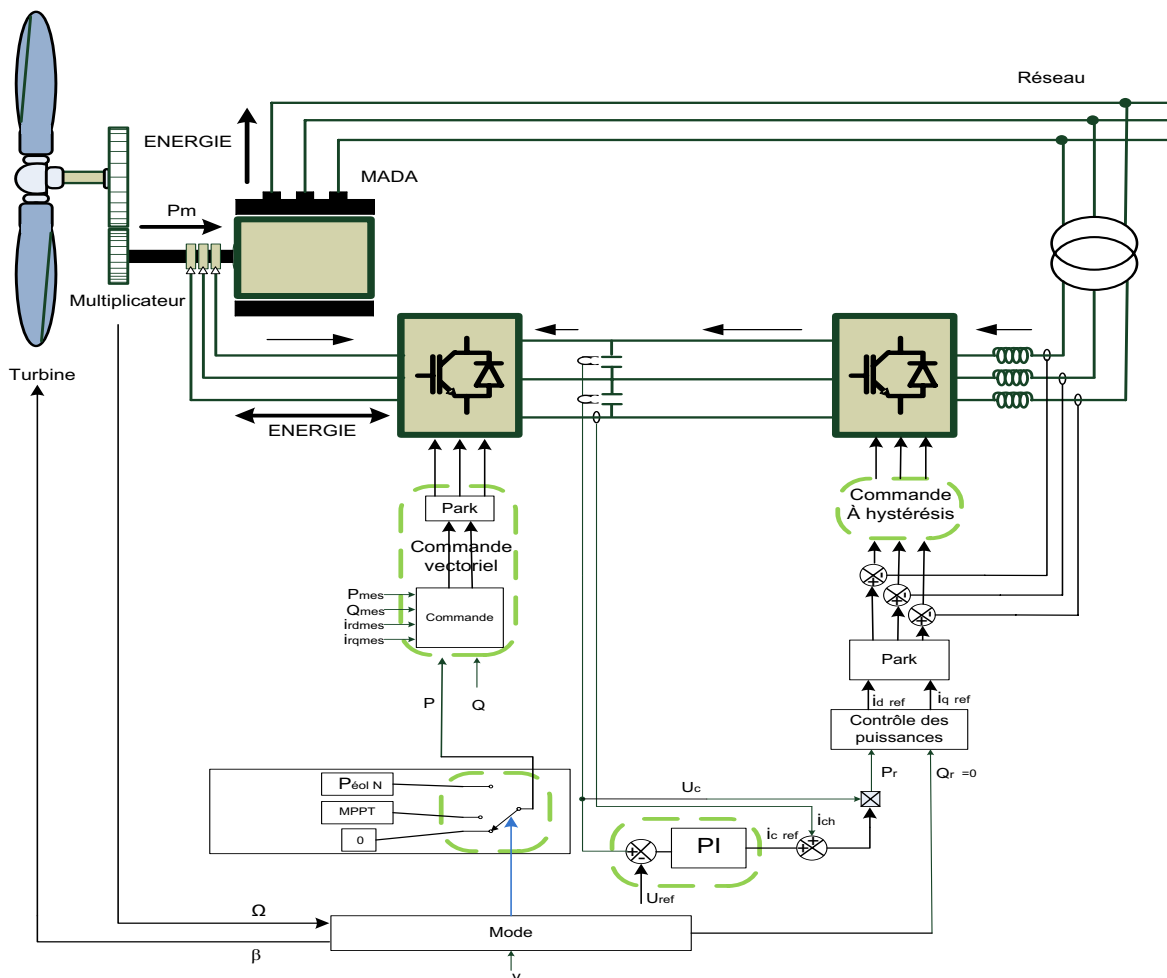


Figure III.12 Synoptique d'une éolienne à base d'une MADA.

Comme montré sur la figure ci-dessus, nous avons introduit un deuxième convertisseur de puissance pour faire la liaison du rotor au réseau électrique à travers un filtre passif R-L. Le convertisseur de puissance aura deux rôles :

- Assurer le transit de puissance entre le rotor de la machine et le réseau électrique.
- Maintenir la tension du bus continu constante en contrôlant le transit de puissance entre le rotor de la machine et le réseau.

Le rôle du filtre est d'atténuer les harmoniques d'ordre supérieur générés par le convertisseur de puissance du côté du réseau. Notons qu'un éventuel transformateur aurait dû être introduit entre le filtre et le réseau pour adapter la tension de sortie du convertisseur à celle du réseau. Dans notre cas, le transformateur est considéré comme un simple gain de tension.

### III.10.1. Modélisation de l'onduleur à trois niveaux

Un onduleur est un convertisseur statique capable de transformer l'énergie d'une source à tension continue en une énergie à tension alternative. Il existe plusieurs structures d'onduleurs. L'apparition de nouveaux composants d'électronique de puissance a permis de développer de nouvelles structures d'une grande performance par rapport aux structures classiques, en l'occurrence, l'onduleur triphasé à trois niveaux à structure N.P.C .

Les études faites sur les onduleurs monophasés et triphasés à trois niveaux à structure NPC ont montré que l'onduleur à trois niveaux peut être considéré comme l'association de deux onduleur à deux niveaux [BER95]. Ces études ont montré que les onduleurs à trois niveaux offrent une grande amélioration sur la qualité des tensions de sortie. Ces améliorations peuvent être plus importantes par l'insertion des différentes stratégies de commande.

#### III.10.1.1. structure de l'onduleur à trois niveaux

L'onduleur triphasé à trois niveaux à structure NPC étudié se compose de trois bras symétriques constitué chacun de quatre interrupteurs en série, plus deux diodes. La représentation schématique de cet onduleur est donnée par la figure (III-13);

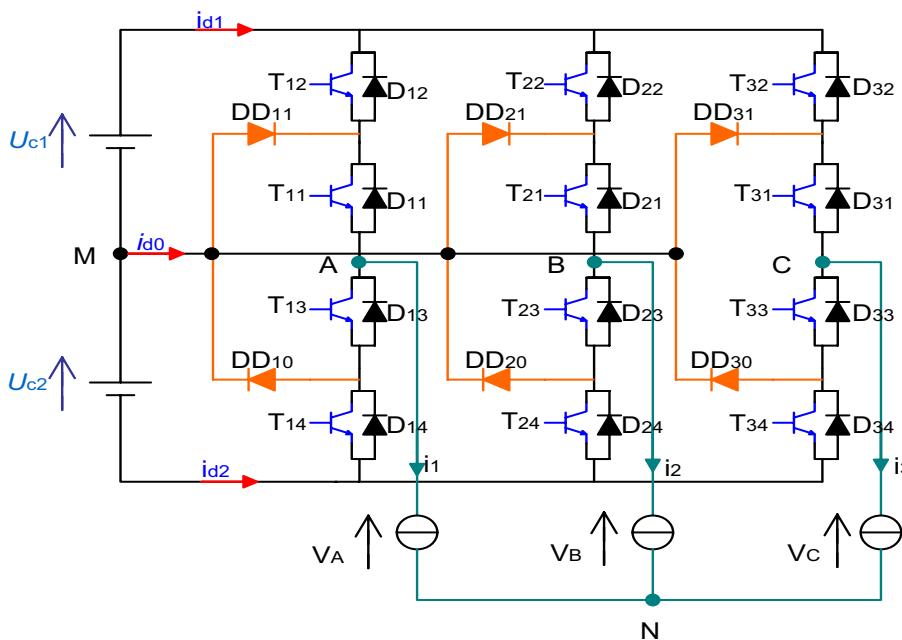


Figure III.13 Onduleur triphasé à trois niveaux.

**III.10.1.2. Modélisation du fonctionnement d'un bras d'onduleur à trois niveaux**

La symétrie des onduleurs à trois niveaux permet leur modélisation par bras sans à priori sur la commande.

**III.10.1.3. Différentes configuration d'un bras d'onduleur à trois niveaux**

Un bras de l'onduleur définit cinq configurations possibles :

La configuration	E0	E1	E2	E3	E4
La grandeur électrique	$I_k=0$	$V_k=U_{c1}$	$V_k=0$	$V_k=-U_{c2}$	$V_k=0$

Tableau III.1 Grandeurs électriques caractérisant chaque configuration possible d'un bras k

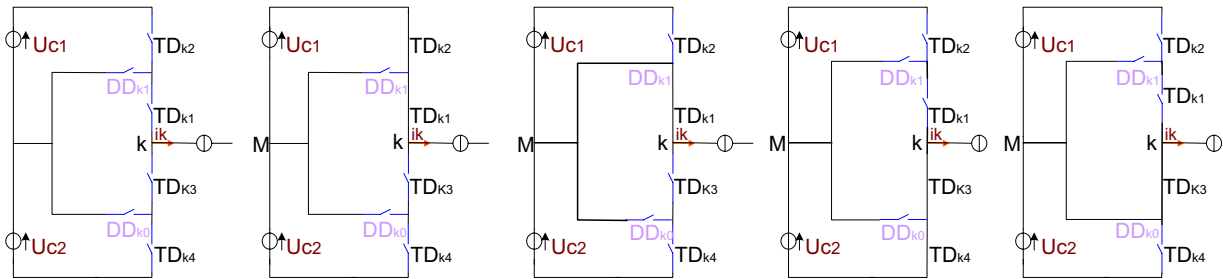


Figure III.14 Les cinq configurations d'un bras d'onduleur triphasé à trois niveaux.

**III.10.1.4. Fonctionnement d'un bras d'onduleur à trois niveaux**

Chaque bras est équivalent à un interrupteur à trois positions permettant d'obtenir en sortie trois niveaux de tension  $U_{c1}$ , 0 et  $-U_{c2}$ .

**III.10.2. Modèle de connaissance de l'onduleur à trois niveaux**

Un convertisseur est dit en mode commandable si les transitions entre ses différentes configurations dépendent uniquement de la commande externe (commande des bases des semi-conducteurs) et par suite une conduction continue de ce convertisseur [BER95].

Pour éviter la conduction simultanée des quatre interrupteurs d'un seul bras, on définit la commande complémentaire suivante :

$$\begin{cases} B_{k1} = \bar{B}_{k4} \\ B_{k2} = \bar{B}_{k3} \end{cases} \quad (III.30)$$

Avec  $B_{ks}$  est le signal de la commande du transistor  $T_{ks}$  du bras k

Le tableau (III.2) montre la table d'excitation associée à cette commande complémentaire.

Bk1	Bk2	Bk3	Bk4	Vk
0	0	1	1	$-U_{c2}$
0	1	0	1	inconnue
1	0	1	0	0
1	1	0	0	$U_{c1}$

Tableau III.2

### III.10.3. fonctions de connexion des interrupteurs

On définit la fonction de connexion de chaque interrupteur TD<sub>ks</sub> comme étant une fonction qui décrit l'état ouvert ou fermé de celui-ci :

$$\begin{cases} F_{ks} = 1 & \text{si } TD_{ks} \text{ est fermé} \\ F_{ks} = 0 & \text{si } TD_{ks} \text{ est ouvert} \end{cases} \quad (III.31)$$

En traduisant la commande complémentaire par les fonctions de connexion des interrupteurs du bras k, on trouve :

$$\begin{cases} F_{k1} = 1 - F_{k4} \\ F_{k2} = 1 - F_{k3} \end{cases} \quad (III.32)$$

### III.10.4. Fonctions de connexion des demi-bras

Pour l'onduleur à trois niveaux, on définit en plus la fonction de connexion d'un demi-bras notée  $F_{km}^b$

Où K : Numéro du bras (K=1; 2; 3)

$$m = \begin{cases} 0 & \text{pour le demi-bras du bas} \\ 1 & \text{pour le demi-bras du haut} \end{cases}$$

Les fonctions de connexion des demi-bras s'expriment au moyen des fonctions de connexion des interrupteurs comme suit :

$$\begin{cases} F_{k1}^b = F_{k1} \cdot F_{k2} \\ F_{k0}^b = F_{k3} \cdot F_{k4} \end{cases} \quad (III.33)$$

### III.10.5. Fonction de conversion

Les potentiels aux nœuds A, B et C de l'onduleur par rapport au point milieu M s'expriment au moyen des fonctions de connexion des interrupteurs et des tensions d'entrée comme suit :

$$\begin{cases} V_{AM} = F_{11} \cdot F_{12} \cdot U_{c1} - F_{13} \cdot F_{14} \cdot U_{c2} \\ V_{BM} = F_{21} \cdot F_{22} \cdot U_{c1} - F_{23} \cdot F_{24} \cdot U_{c2} \\ V_{CM} = F_{31} \cdot F_{32} \cdot U_{c1} - F_{33} \cdot F_{34} \cdot U_{c2} \end{cases} \quad (III.34)$$

En introduisant les fonctions de connexion des demi-bras, on aura :

$$\begin{cases} V_{AM} = F_{11}^b \cdot U_{c1} - F_{10}^b \cdot U_{c2} \\ V_{BM} = F_{21}^b \cdot U_{c1} - F_{20}^b \cdot U_{c2} \\ V_{CM} = F_{31}^b \cdot U_{c1} - F_{30}^b \cdot U_{c2} \end{cases} \quad (III.35)$$

Les tensions composées s'écrivent comme suit :

$$\begin{cases} U_{AB} = V_{AM} - V_{BM} \\ U_{BC} = V_{BM} - V_{CM} \\ U_{CA} = V_{CM} - V_{AM} \end{cases} \quad (III.36)$$

D'où le système matriciel suivant exprimant ces tensions composées au moyen des fonctions de connexion des demi-bras :

$$\begin{bmatrix} U_{AB} \\ U_{BC} \\ U_{CA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \left\{ \begin{bmatrix} F_{11}^b \\ F_{21}^b \\ F_{31}^b \end{bmatrix} U_{C1} - \begin{bmatrix} F_{10}^b \\ F_{20}^b \\ F_{30}^b \end{bmatrix} U_{C2} \right\} \quad (III.37)$$

Les tensions simples sont déduites comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \left\{ \begin{bmatrix} F_{11}^b \\ F_{21}^b \\ F_{31}^b \end{bmatrix} U_{C1} - \begin{bmatrix} F_{10}^b \\ F_{20}^b \\ F_{30}^b \end{bmatrix} U_{C2} \right\} \quad (III.38)$$

Les courants d'entrée  $i_{d1}$  et  $i_{d2}$  sont exprimés en fonction des courants de charge  $i_1$ ,  $i_2$  et  $i_3$  par les relations suivantes :

$$\begin{cases} i_{d1} = F_{11} \cdot F_{12} \cdot i_1 + F_{21} \cdot F_{22} \cdot i_2 + F_{31} \cdot F_{32} \cdot i_3 \\ i_{d2} = F_{13} \cdot F_{14} \cdot i_1 + F_{23} \cdot F_{24} \cdot i_2 + F_{33} \cdot F_{34} \cdot i_3 \end{cases} \quad \text{d'où} \quad \begin{cases} i_{d1} = F_{11}^b \cdot i_1 + F_{21}^b \cdot i_2 + F_{31}^b \cdot i_3 \\ i_{d2} = F_{10}^b \cdot i_1 + F_{20}^b \cdot i_2 + F_{30}^b \cdot i_3 \end{cases} \quad (III.39)$$

Cette relation montre, que pour l'onduleur à trois niveaux, tout se passe comme si le courant  $i_{d1}$  était le courant d'entrée de l'onduleur à deux niveaux du haut, et  $i_{d2}$  le courant d'entrée de l'onduleur à deux niveaux du bas.

Le courant  $i_{d0}$  est lié aux courants de charge comme suit :

$$i_{d0} = F_{11} \cdot F_{13} \cdot i_1 + F_{21} \cdot F_{23} \cdot i_2 + F_{31} \cdot F_{33} \cdot i_3 \quad (III.40)$$

Des relations (II.2) et (II.39), on déduit que  $i_{d0}$  s'écrit sous la forme :

$$i_{d0} = i_1 + i_2 + i_3 - i_{d1} - i_{d2} \quad \text{d'où} \quad i_{d0} = (1 - F_{11}^b - F_{10}^b) i_1 + (1 - F_{21}^b - F_{20}^b) i_2 + (1 - F_{31}^b - F_{30}^b) i_3 \quad (III.41)$$

### III.11. STRATEGIE DE COMMANDE DE L'ONDULEUR TRIPHASE A TROIS NIVEAUX

#### III.11.1. Commande triangulo-sinusoidale à deux porteuses

Le principe de cette stratégie consiste à utiliser les intersections d'une onde de référence ou modulante (qui est l'image de l'onde de sortie qu'on veut obtenir) généralement sinusoïdale avec deux porteuses triangulaires bipolaires [BER95].

Deux paramètres caractérisent cette stratégie:

L'indice de modulation "m" qui est défini comme étant le rapport de la fréquence de la porteuse  $f_p$  à la fréquence de la tension de référence  $f$ .

Taux de modulation "r" qui est le rapport de l'amplitude de la tension de référence ( $V_m$ ) et celle de la porteuse ( $U_{pm}$ ).



Les deux porteuses sont identiques et déphasé d'une demi période de hachage  $\frac{1}{2.f_p}$  l'une de l'autre afin d'améliorer le taux d'harmoniques de la tension de sortie [BER95]. La porteuse choisie est celle en dents de scie bipolaire, elle permet une réduction de taux d'harmoniques qui seront centré autour des fréquences multiple de  $2.m.f$ .

**III.11.2. L'algorithme de commande**

L'algorithme de la commande de la stratégie triangulo-sinusoidale à deux porteuses pour l'onduleur à trois niveaux pour un bras K, peut être résumé en deux étapes:

Etape 1 : la détermination des signaux intermédiaires  $V_{k1}$  et  $V_{k2}$

$$\begin{cases} V_{refk} \geq U_{p1} \Rightarrow V_{k1} = \frac{E}{2} \\ V_{refk} < U_{p1} \Rightarrow V_{k1} = 0 \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} V_{refk} \geq U_{p2} \Rightarrow V_{k0} = 0 \\ V_{refk} < U_{p1} \Rightarrow V_{k0} = -\frac{E}{2} \end{cases} \quad (III.42)$$

Etape 2 : détermination du signal  $V_{k2}$  et des ordres de commande  $B_{ks}$  des interrupteurs :

$$\begin{cases} V_{k2} = \frac{E}{2} \Rightarrow B_{k1} = 1, B_{k2} = 1 \\ V_{k2} = -\frac{E}{2} \Rightarrow B_{k1} = 0, B_{k2} = 0 \\ V_{k2} = 0 \Rightarrow B_{k1} = 1, B_{k2} = 0 \end{cases} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} V_{k2} = V_{k1} + V_{k0} \\ B_{k3} = \bar{B}_{k2} \\ \bar{B}_{k4} = \bar{B}_{k1} \end{cases} \quad (III.43)$$

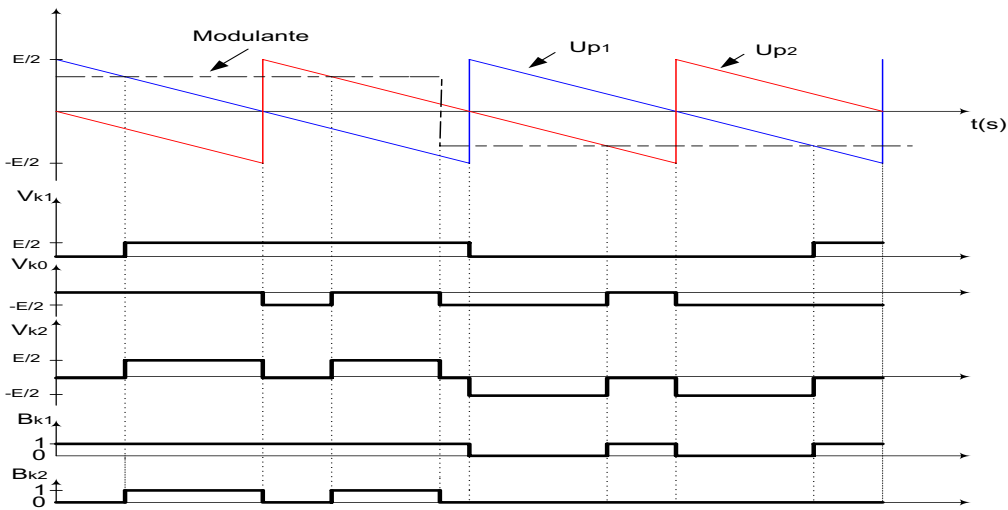


Figure III.15 principe de la stratégie triangulo-sinusoidale à deux porteuses.

**III.12. REDRESSEUR TRIPHASÉ À TROIS NIVEAUX**

Nous avons vu que l'onduleur triphasé à trois niveaux utilise deux tensions d'entrée  $U_{C1}$  et  $U_{C2}$  qu'on a supposées égales et constantes. Ces deux tensions sont généralement délivrées en pratique par un redresseur.

Il existe plusieurs types de redresseurs pour assurer l'alimentation réelle de l'onduleur à trois niveaux.

**III.12.1. Modélisation du redresseur**

La structure de l'onduleur à trois niveaux est réversible par sa conception. Ceci lui permet de fonctionner aussi en redresseur. On adoptera la convention génératrice pour la source de courant et la convention récepteur pour la source de tension.

La figure III.16 représente la structure générale du redresseur de courant triphasé à M.L.I à trois niveaux à structure NPC.

Le modèle de connaissance et de commande de ce redresseur est le même que celui élaboré pour l'onduleur de tension à trois niveaux, en tenant compte des nouvelles conventions des deux sources du redresseur.

Ce redresseur va être commandé par la M.L.I, c'est-à-dire les grandeurs de sortie  $U_{C1}$  et  $U_{C2}$  seront modulées pour générer les grandeurs d'entrée  $V_A$ ,  $V_B$  et  $V_C$ .

Pratiquement les paramètres du réseau (résistance et inductance) sont difficiles à identifier. Généralement, on ajoute en série un filtre d'entrée R.L de valeurs plus importantes pour pouvoir négliger les paramètres du réseau. L'inductance dans le filtre permet également de respecter l'alternance des sources et de filtrer les harmoniques des courants du réseau.

Le redresseur de courant triphasé à trois niveaux est représentée dans la figure (III.16).

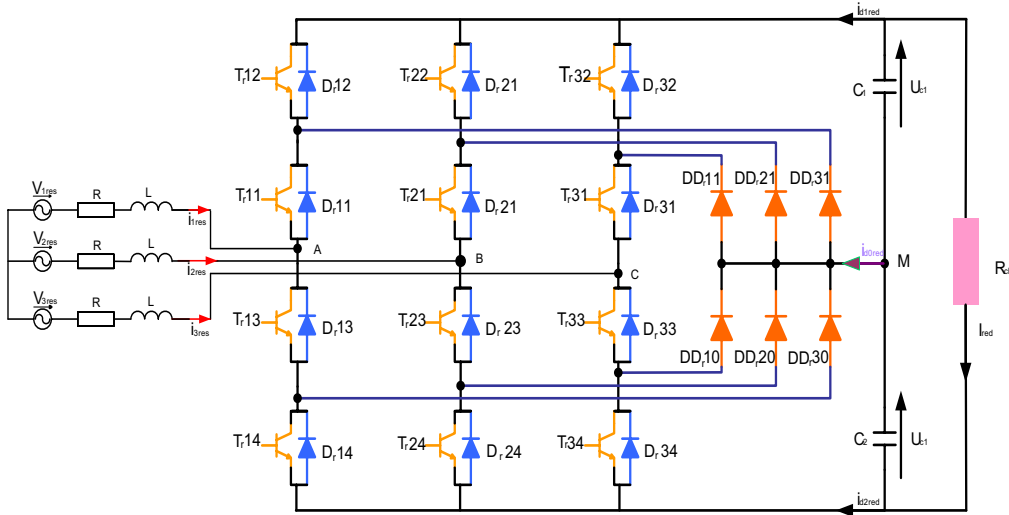


Figure III.16 Redresseur de courant triphasé à M.L.I à trois niveaux à structure NPC.

**III.12.2. Modélisation du filtre passif**

Les courants transités entre le convertisseur et le réseau sont imposés par les bobines constituant le filtre passe bas [11]. La tension aux bornes du filtre est donnée par :

$$\begin{bmatrix} V_{b1} \\ V_{b2} \\ V_{b3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ma} \\ V_{mb} \\ V_{mc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{resa} \\ V_{resb} \\ V_{resc} \end{bmatrix} = R_f \begin{bmatrix} I_{fa} \\ I_{fb} \\ I_{fc} \end{bmatrix} + L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{fa} \\ I_{fb} \\ I_{fc} \end{bmatrix} \tag{III.44}$$

**III.13. CONTROLE DU CONVERTISSEUR COTE RESEAU**

Le convertisseur MLI2 est situé entre le bus continu et le filtre passif. Sa topologie permet de générer et également d'appeler un courant provenant du réseau suivant le besoin.

### III.13.1. Commande par hystérésis en courant appliquée au redresseur

Toutes les stratégies de commande possibles utilisées avec l'onduleur triphasé à trois niveaux sont aussi utilisables pour la commande du redresseur triphasé à trois niveaux [BER95].

La commande en courant par hystérésis présente une bonne dynamique, une implantation simple, mais la fréquence de commutation des interrupteurs, non contrôlée.

Dans notre cas, nous avons choisi la stratégie de commande par hystérésis pour commander notre redresseur, afin d'avoir un courant de réseau pratiquement sinusoïdal et en phase avec la tension.

Les courants de référence qui alimentent notre redresseur à trois niveaux sont définis par le système ci-dessous.

$$\begin{cases} i_{1ref} = \sqrt{2}.I_{eff}.\sin(\omega t - \varphi) \\ i_{2ref} = \sqrt{2}.I_{eff}.\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \varphi) \\ i_{3ref} = \sqrt{2}.I_{eff}.\sin(\omega t - \frac{4\pi}{3} - \varphi) \end{cases} \quad (III.45)$$

Les valeurs efficaces  $I_{eff}$  des courants de référence, calculées afin de vérifier la conservation de la puissance à l'entrée et à la sortie du redresseur.

Les redresseurs sont supposés sans pertes (interrupteurs idéals), alors on aura le cas d'une charge résistive

$$V_{1res} \cdot i_{1res} + V_{2res} \cdot i_{2res} + V_{3res} \cdot i_{3res} = \frac{(U_{C1} + U_{C2})^2}{R_{ch}} \quad (III.46)$$

$$3.V_e \cdot I_e \cdot \cos \varphi + 3.R.I_e^2 = \frac{(U_{C1} + U_{C2})^2}{R_{ch}} \quad (III.47)$$

$V_e$  : étant la valeur efficace des tensions du réseau.

$I_e$  : étant la valeur efficace des courants du réseau.

Pour avoir un fonctionnement comme celui déterminé dans l'équation (IV.48), on doit avoir un facteur de puissance  $\cos\varphi$  unitaire et les pertes Joules dans le réseau seront négligées, donc on aura :

$$I_e = \frac{(U_{C1} + U_{C2})^2}{3.V_e.R_{ch}} \quad (III.48)$$

### III.13.2. Commandabilité du redresseur

Pour s'assurer de la commandabilité du redresseurs, on doit s'assurer d'abord que la valeur initiale  $U_e$  que prend chacune des deux tensions  $U_{C1}$ ,  $U_{C2}$ , doit être supérieure à la valeur maximale  $V_{max}$  de la tension du réseau. Cette condition doit être vérifiée à chaque instant. Ce type de condition est nécessaire également pour assurer un facteur de puissance unitaire.

### III.13.3. REGULATION DE LA TENSION DU BUS CONTINU

Jusqu'à présent nous avons supposé que la tension dans l'étape continue était constante, mais elle va réellement dépendre des puissances transférées dans les convertisseurs coté machine et celui du coté du réseau. En effet, tel qu'on le voit sur la Figure on peut exprimer le courant dans le condensateur  $C$  par :

$$\begin{cases} i_c = i_{mac} - i_{res} \\ i_c = i_{mac} - i_{res} \end{cases} \quad (III.49)$$

En multipliant par la tension du bus continu  $U_{DC}$  on trouve :

$$P_c = P_{mada} - P_r \quad (III.50)$$

Tel que :

$P_c = U_{dc}i_c$  : est la puissance emmagasinée dans le condensateur.

$P_{mada} = U_{dc}i_{ch}$  : est la puissance transité par le convertisseur coté rotor.

$P_r = U_{dc}i_{res}$  : est la puissance transité par le convertisseur coté réseau.

En négligeant les pertes dans le filtre R-L, la référence de la puissance qui doit être transité par le convertisseur sera donnée par :

$$\begin{aligned} P_r &= P_{mada} - P_c \\ &= (I_{ch} - I_c)U_{dc} \end{aligned} \quad (III.51)$$

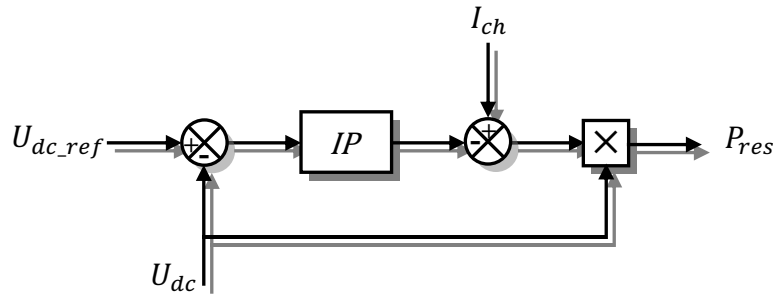


Figure III.17 Schéma bloqué de régulation du bus continu.

Ainsi, la régulation des transits de puissance permet d'imposer le courant capacitif du condensateur. Le réglage du bus continu est alors réalisé au moyen d'une boucle de régulation externe, permettant de maintenir une tension constante quelque soit le sens de transite de la puissance rotorique.

### III.13.4. CONTRÔLE DES COURANTS COTE RESEAU

Les puissances active et réactive transité au réseau à travers le filtre sont donnée par :

$$\begin{cases} P = V_{resd}I_d + V_{resq}I_q \\ Q = V_{resq}I_d + V_{resd}I_q \end{cases} \quad (III.52)$$

Par inversion de ces relations, il est alors possible d'imposer des références pour la puissance active  $P_{ref}$  et la puissance réactive  $Q_{ref}$  en imposant les courants de références suivants:

$$\begin{cases} I_{d_{ref}} = \frac{P_{ref} \cdot V_{resd} + Q_{ref} \cdot V_{resq}}{V_{resd}^2 + V_{resq}^2} \\ I_{q_{ref}} = \frac{P_{ref} \cdot V_{resq} - Q_{ref} \cdot V_{resd}}{V_{resd}^2 + V_{resq}^2} \end{cases} \quad (III.53)$$

La composante directe du courant est utilisée pour réguler la tension du bus continu et la composante en quadrature est utilisée pour réguler la puissance réactive transitée. Le système de commande doit permettre de maintenir constante la tension du bus continu, et d'obtenir des courants sinusoïdaux à la sortie du filtre d'amplitude et de fréquence identiques à celles du réseau.

Le convertisseur coté réseau sera alors commandé par deux grandeurs, la puissance active et la puissance réactive. La puissance réactive de référence sera maintenue nulle pour assurer un facteur de puissance unitaire, et la puissance active sera estimée à partir de la valeur référence de la tension du bus continu.

### III.14. CASCADE REDRESSEURS NPC À TROIS NIVEAUX-ONDULEURS NPC À TROIS NIVEAUX

#### III.14.1. Structure de la cascade

Dans cette partie de notre chapitre, on étudie l'association d'un redresseur triphasé à trois niveaux à l'onduleur triphasé à trois niveaux connecté au rotor. Ce changeur de fréquence indirect de la figure III.18. Permet à partir d'un réseau à fréquence et amplitude fixes d'avoir un système de tensions de sortie à fréquence et amplitude variables.

La structure générale de cette cascade est montrée dans la figure (III.18). L'onduleur est commandé par la stratégie triangulo-sinusoidale à deux porteuses en dent de scie. Le redresseur est commandé par la stratégie par hystérésis en courant.

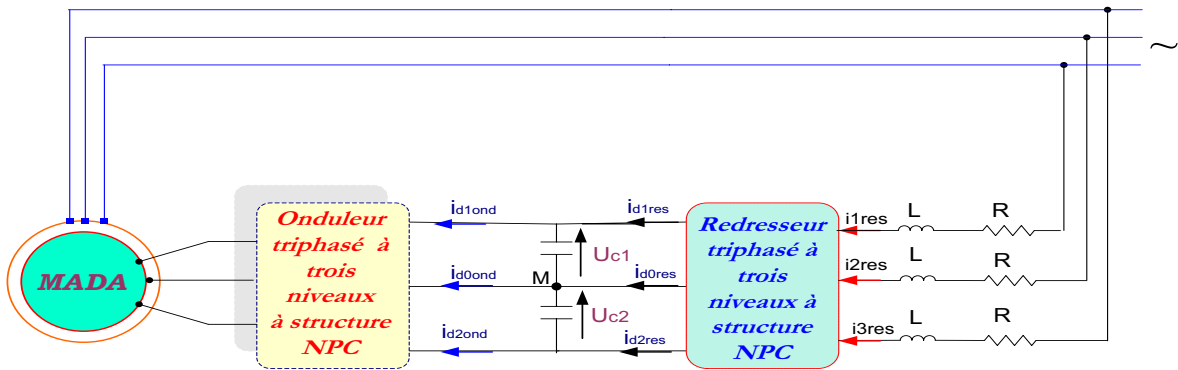


Figure III.18 Cascade d'un redresseur de courant triphasé à trois niveaux-un onduleurs de tension triphasés à trois niveaux alimente la MADA

#### III.14.2. Modélisation du bus continu de la cascade

L'évolution de la tension du bus continu est obtenue à partir de l'intégration du courant capacitif absorbé par le condensateur, nous pouvant écrire alors :

$$\begin{cases} C_1 \frac{dU_{C1}}{dt} = i_{d1red} - i_{d1ond} & R1 \\ C_2 \frac{dU_{C2}}{dt} = i_{d2red} - i_{d2ond} & R2 \end{cases} \quad (III.54)$$

La figure III.19 représente la structure générale du filtre intermédiaire de la cascade. Son modèle est défini par le système d'équations suivant :

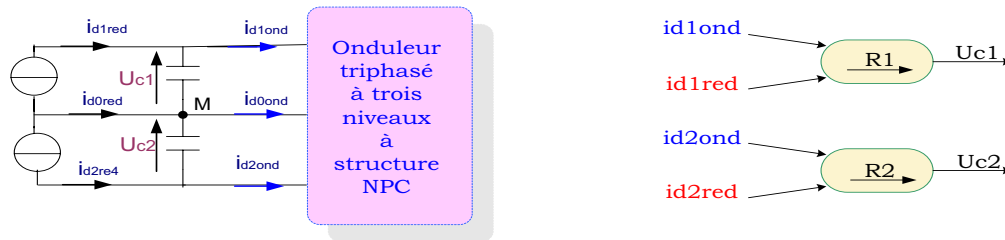


Figure III.19 Filtre intermédiaire de la cascade de redresseur - l' onduleur triphasé à trois niveaux et son graphe informationnel.

Le système qui est présenté par l'équation (III.54) peut être interprété par le graphe informationnel de la figure (III.19). Les relations R<sub>1</sub> et R<sub>2</sub> de ce graphe sont respectivement la première et la deuxième équation du système (III.54). La figure (III.19) nous montre deux blocs apparemment indépendants, qui peut être commandé par  $i_{d1red}$  et  $i_{d2red}$ . Cependant, on doit noter que les deux courants  $i_{d1red}$  et  $i_{d2red}$  sont contrôlés par le même courant du réseau.

### III.14.3. Résultats de simulation

Les figures (III.20-24) représentent les résultats de simulation du redresseur triphasé à trois niveaux commandé par la stratégie d'hystérésis en courant ( $\Delta i = 0.001$ ) lorsque il alimente une charge résistive.

Les tensions  $U_{C1}$  et  $U_{C2}$  sont très proches. Elles atteignent leur valeur qui assure l'équilibre des puissances en un temps très court. La différence de tension ( $U_{C1}-U_{C2}$ ) oscille autour des valeurs très petites par rapport à celle de  $U_{C1}$  et  $U_{C2}$ . Le courant  $i_{dred1}$  a une valeur moyenne négative. Le courant  $i_{red2}$  présente une allure opposée à celle de  $i_{dred1}$ . Ceci est nécessaire pour que le courant  $i_{dred0}$  ait une valeur moyenne nulle. Comme on peut le constater, le courant  $i_{d0red}$  a une valeur moyenne pratiquement nulle. Ceci présente la chose la plus désirée à cette alimentation pour assurer l'équilibre du pont capacitif. Le courant d'entrée d'une phase du réseau suit bien sa référence.

Ces simulations sont faites pour la valeur de capacité  $C=50mF$ .

Nous avons effectué une simulation où le facteur de puissance du réseau est unitaire ( $Q_r = 0$ ). On constate que le courant du réseau  $i_{res}$  suit bien sa référence, et il est en phase avec la tension  $V_{res}$ .

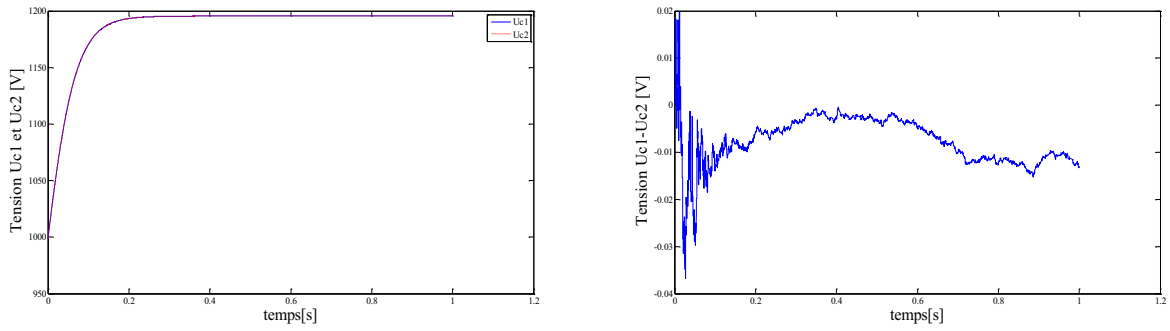


Figure III.20 – Tensions du redresseur triphasé à trois niveaux

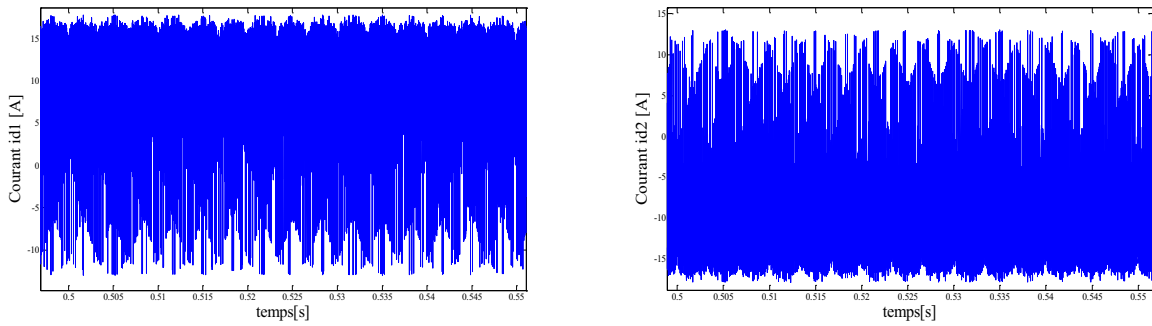


Figure III.21 – courant de sortie du redresseur triphasé à trois niveaux

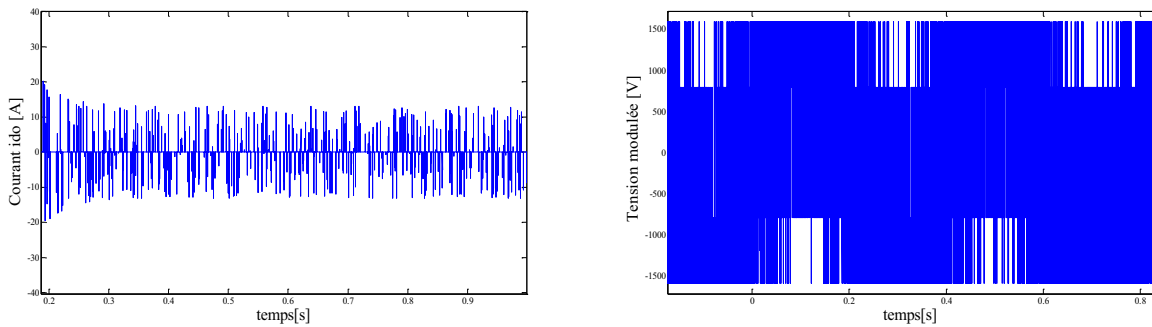


Figure III.22 – Courant et tension de sortie du redresseur triphasé à trois niveaux

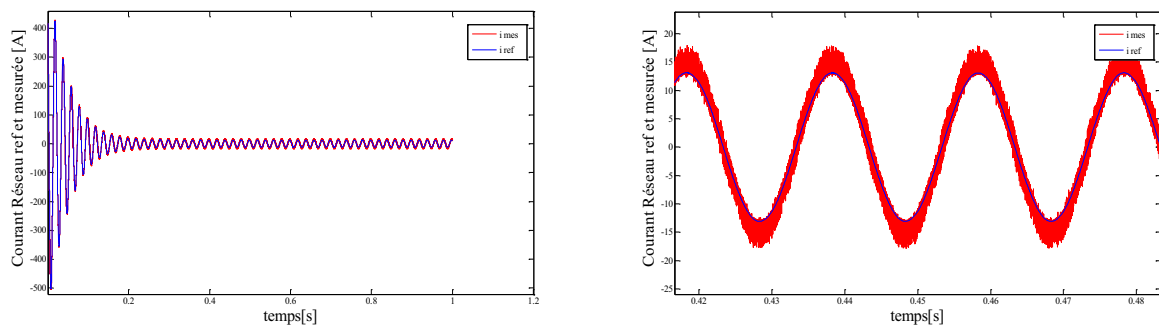


Figure III.23 – Courant réseau avec zoom

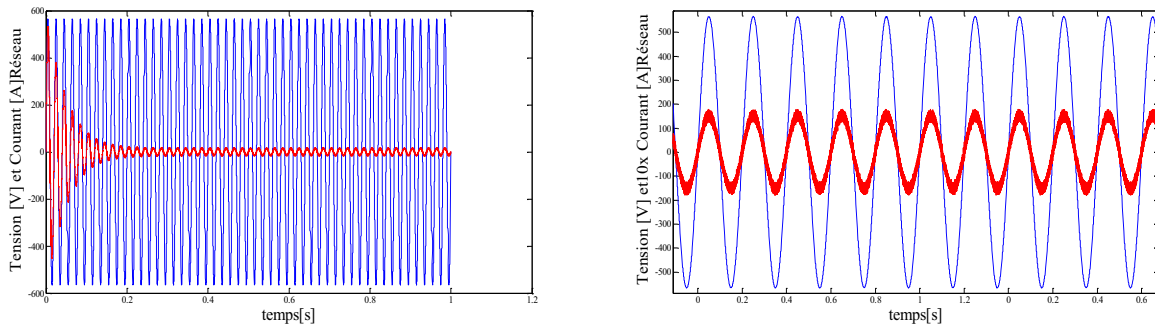


Figure III.24 – Courant et Tension réseau avec zoom

### III.15. CONCLUSION

Dans ce chapitre ont été étudiés les différents composants de la chaîne éolienne, on commence par la MADA et ensuite la cascade liant le réseau au rotor de la MADA. Il a été d'abord établi une étude sur l'onduleur alimentant le rotor. Celui-ci est à trois niveaux et commandé par une commande à modulation de largeur d'impulsion à deux porteuse. Cet onduleur est lui-même alimenté par un bus continu dont la valeur de la tension est maintenue constant grâce à un redresseur de tension. Ce dernier est commandé par une MLI à hystériser. Pour ne pas dégrader la qualité du réseau il faut y injecter un courant sinusoïdale en phase avec la tension. Ceci n'est possible qu'en imposant une référence adéquate à la commande à hystérésis. Cette référence doit prendre en compte le maintien de la tension du bus continu à la valeur voulue. Pour cela, une commande est alors réalisée au moyen d'une boucle de régulation utilisant un régulateur générant la référence du courant à injecter dans le condensateur et par la suite le courant à injecter dans le réseau.



# Chapitre 4

## Modélisation et commande de Système de stockage

Dans cette partie, nous allons développer les éléments complémentaires nécessaires à la modélisation de l'ensemble du générateur éolienne active.

Rappelons que notre étude se veut une étude du fonctionnement global d'un générateur éolien permettant de fournir au réseau une puissance constante tout en offrant des services systèmes, tel que la fourniture de puissance réactive, au gestionnaire du réseau afin de faciliter l'insertion des aérogénérateurs.

Dans un premier temps, nous allons présenter les différents types de stockage, l'unité de stockage inertiel fera l'objet d'une attention particulière et son dimensionnement sera détaillé. Nous poursuivrons par la présentation des stratégies de commande en puissance de l'ensemble permettant d'avoir le fonctionnement global du système.

## IV.1. INTRODUCTION

Lorsqu'on parle de «système inertiel de stockage d'énergie» (SISE) ou de «batterie électromécanique », on comprend un système comportant un volant d'inertie, un moteur-générateur électrique et un convertisseur électronique de puissance. Comme dans la majorité des systèmes de stockage d'énergie électrique, il y a une transformation réversible d'énergie. Lors du stockage, l'énergie électrique est convertie en énergie mécanique par l'intermédiaire du moteur électrique. L'énergie mécanique est stockée dans le volant d'inertie sous forme d'énergie cinétique d'une masse tournante. Lors de la décharge du SISE, l'énergie mécanique est reconvertie en énergie électrique par l'intermédiaire du générateur électrique. D'habitude, il y a une seule machine électrique qui peut fonctionner en moteur ou en générateur, en fonction du régime de fonctionnement du SISE. Le régime de fonctionnement est imposé par le convertisseur électronique de puissance, qui impose le sens de transfert de l'énergie à travers de la machine électrique.

Durant les dernières années, les SISEs ont été redécouverts par les industriels en raison de leurs avantages par rapport aux autres systèmes de stockage d'énergie [HEB02] et [LAW03]. Les SISEs concourent avec les SMESs dans les applications nécessitant quelques MW pendant 1 - 2 s, et avec les batteries dans les applications exigeant des temps de stockage supérieures à 15 s [EUR01].

Pour l'instant, les SISEs sont concernés par quatre applications spécifiques:

- les alimentations sans coupures (UPS : Uninterruptible Power Supply) pour protéger les consommateurs contre les chutes de tension accidentelles;
- Sources de tension embarquées sur les véhicules électriques ou sur les installations spatiales;
- Amélioration de la qualité de l'énergie électrique (le lissage de charge).
- l'aide à la production autonome d'énergie

Les SISEs peuvent être différenciés en fonction de la plage de vitesse et du matériau dont le volant d'inertie est fabriqué. Ainsi, il y a des SISEs à volants lents et des SISEs à volants rapides. Il n'y a pas encore une limite bien définie pour séparer les deux catégories de SISEs. D'après certains auteurs cette limite se trouve à 6000 T/min [RUD03], mais d'autres parlent de 10000 T/min [EUR01] ou même de 14000 T/min [LAW03]. Il existe des SISEs à volants métalliques et des SISEs à volants de matériaux composites. D'habitude, les volants lents sont métalliques et les volants rapides comportent des matériaux composites.

Les SISEs sont capables de fournir des puissances très élevées, limitées seulement par les puissances nominales des générateurs et des convertisseurs électroniques de puissance. Le temps de réponse est limité à quelques millisecondes et le nombre de cycles charge / décharge est conditionné seulement par l'efficacité du système de refroidissement des composants électriques et électroniques [EUR01].

Les frottements constituent la source principale des pertes dans les SISEs. C'est pourquoi les volants lents sont introduits dans des enceintes remplies d'hélium et les volants rapides sont situés dans des enceintes vidées afin de réduire les frottements. Cependant, les pertes d'autodécharge restent importantes, mais le rendement

## Chapitre 4

instantané est très élevé. La durée de vie dépend des paliers utilisés. Pour les volants lents, les roulements disponibles sur le marché ont des durées de vie allant au-delà de 10 ans et même plus. Les volants rapides nécessitent des paliers magnétiques, ce qui augmente le prix et la complexité des systèmes. C'est pourquoi les SISEs à volants rapides sont utilisés surtout dans les applications embarquées; ils offrent peu d'avantages dans les applications stationnaires [EUR01].

Actuellement, les SISEs représentent plus de 90% des ventes de nouvelles technologies de stockage et on envisage une croissance annuelle d'environ 8%. De telles prévisions sont dues aux perspectives de croissance du nombre des sources d'énergies renouvelables et le besoin d'UPS d'amélioration de la qualité de l'énergie électrique pour des différentes entreprises [RUD03].

Il y a deux modèle de SISE. Le premier modèle provient de Piller et concerne le système POWERBRIDGE, déjà consacré sur le marché des UPSs. Ce système est disponible sur une large gamme de puissances (de 150 kVA à 1,67 MVA) et comporte un volant en acier dont la vitesse maximale est de 3600 T/min. Le plus grand SISE de Piller peut fournir 1,67 MVA pour une durée de 12 s.

Le deuxième modèle provient de la NASA. Il a été conçu pour être utilisé sur la Station Spatiale Internationale. 48 unités de SISE ont été fabriqués pour remplacer les batteries électrochimiques de la station [HEB02]. Ce type de SISE comporte un volant composite dont la vitesse maximale est de 53000 T/min. Une seule unité peut fournir une puissance instantanée d'environ 4,1 kW. La NASA estime qu'une économie de plus de 200 millions \$ suite au remplacement des batteries électrochimiques par les SISEs est réalisable



### IV.2. MODELISATION

Le système de stockage inertielle d'énergie basé sur un volant d'inertie entraîné par une machine asynchrone sera décrit. L'énergie stockée sera contrôlée par un convertisseur de puissance qui nous permettra de réaliser un contrôle en couple de la machine asynchrone. La modélisation et la commande de ces différents organes seront présentées.

#### IV.2.1. Le volant d'inertie

Le fonctionnement des SISE est basé sur l'énergie cinétique,  $E_c$ , du volant d'inertie :

$$E_c = J \cdot \frac{\Omega_m^2}{2}, \quad (IV.1)$$

## Chapitre 4

Où  $J$  est le moment d'inertie du volant et  $\Omega_m$  sa vitesse de rotation.

Le moment d'inertie peut être calculé par :

$$J = k.M.R^2, \quad (IV.2)$$

Où  $M$  est la masse tournante,  $R$  est le rayon maximal du volant et  $k$  est un coefficient de forme qui prend les valeurs :

- $k = 1$ , pour un anneau mince ;
- $k = 0.5$ , pour un disque à épaisseur uniforme ;
- $k = 0.4$ , pour une bille ;
- $k = 2/3$ , pour une sphère.

La valeur de l'inertie du volant en fonction de la puissance à stocker et qui peut être restituée durant un temps voulu sera déterminée. La relation qui lie la puissance à l'énergie est la suivante :

$$P_v = \frac{dE_v}{dt} \quad (IV.3)$$

$P_v$  : Puissance maximale délivrable par le système de stockage (égale à la puissance nominale de la machine asynchrone) en [W] ;

$dE_v$  : Variation d'énergie stockée en [J];

$dt$  : Variation de temps pendant la charge ou la décharge pour la puissance maximale en [S].

Ensuite, la relation qui lie l'énergie, l'inertie et la vitesse angulaire est la suivante :

$$\frac{dE_v}{dt} = \frac{1}{2} \cdot J_v \cdot \frac{d\Omega_v^2}{dt} \quad (IV.4)$$

$\Omega_v$  : Vitesse angulaire du volant en [rad.s-1] ;

$J_v$  : Inertie du volant en [kg.m<sup>2</sup>].

En regroupant les deux équations on obtient la relation suivante :

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot J_v \cdot \frac{d\Omega_v^2}{dt} \quad (IV.5)$$

En passant aux faibles variations on a :

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot J_v \cdot \frac{\Delta\Omega_v^2}{\Delta t} \quad (IV.6)$$

$\Delta\Omega_v$  : petite variation de vitesse angulaire autour d'un point de fonctionnement ;

$\Delta t$  : petite variation de temps.

$$P_v \cdot \Delta t = \frac{1}{2} \cdot J_v \cdot \Delta\Omega_v^2 \quad (IV.7)$$

$$J_v = \frac{2 \cdot P_v \cdot \Delta t}{\Delta\Omega_v^2} \quad (IV.8)$$

$$J_v = \frac{2 \cdot P_v \cdot \Delta t}{(\Omega_{v_{max}}^2 - \Omega_{v_{min}}^2)} \quad (IV.9)$$

$\Omega_{v_{max}}$  : Vitesse angulaire maximale du volant (égale à la survitesse maximale de la machine asynchrone) ;

$\Omega_{v_{min}}$  : Vitesse angulaire minimale du volant (limite de la zone de fonctionnement désirée).

Ou encore :

$$J_v = \frac{1800 \cdot P_v \cdot \Delta t}{(N_{v_{max}}^2 - N_{v_{min}}^2) \pi^2} \quad (IV.10)$$

$N_{v_{max}}$  : Vitesse de rotation maximale du volant en [trs.min-1] ;

## Chapitre 4

$N_{v_{min}}$  : Vitesse de rotation minimale du volant en [trs.min-1].

### IV.2.2. La transmission mécanique

La transmission mécanique se résume à l'équation suivante :

$$J_v \frac{d\Omega_v}{dt} + f_v \Omega_v = T_{em} \quad (IV.11)$$

Avec :

$J_v$  : inertie du volant et de la machine asynchrone [kg.m<sup>2</sup>] ;

$f_v$  : coefficient de frottement visqueux [Nm / rad.s-1] ;

$\Omega_v$  : vitesse angulaire du volant d'inertie [rad.s-1] ;

$T_{em}$  : couple électromagnétique de la machine asynchrone [Nm].

Seul le couple de frottements dynamiques est pris en compte. Le couple de frottement sec est négligé.

Dans le cas des SISE, il n'y a pas de couple de charge pour la machine électrique.

### IV.2.3. La machine asynchrone

La machine asynchrone est choisie en fonction de ces avantages en terme de simplicité et de robustesse des parties tournantes.

#### IV.2.3.1. Zone de fonctionnement utile

La figure IV.1 représente le couple et la puissance d'une machine asynchrone en contrôle de couple en fonction de la vitesse. On remarque que :

– pour  $0 \leq \Omega_v \leq \Omega_{vN}$ , le couple peut être maximum donnant ainsi une puissance proportionnelle à la vitesse de rotation ( $P_v = k \cdot \Omega_v$ ).

– pour  $\Omega_v > \Omega_{vN}$ , la puissance est maximum et correspond à la puissance nominale de la machine, le couple électromagnétique est alors inversement proportionnel à la vitesse de rotation ( $T_v = k \cdot \Omega_v$ ).

Donc, si l'on souhaite disposer de la puissance nominale de la machine, il est indispensable de l'utiliser au delà de sa vitesse nominale. On suppose que l'on puisse monter jusqu'au double de la vitesse nominale, ce qui nous laisse considérer la vitesse nominale comme étant la limite basse du stockage inertiel et le double de celle-ci comme étant la limite haute. Le stockage inertiel avec machine asynchrone sera donc utilisé dans la plage de vitesse suivante :  $\Omega_{vN} \leq \Omega_v \leq 2\Omega_{vN}$  permettant ainsi un fonctionnement à puissance nominale constante si besoin.

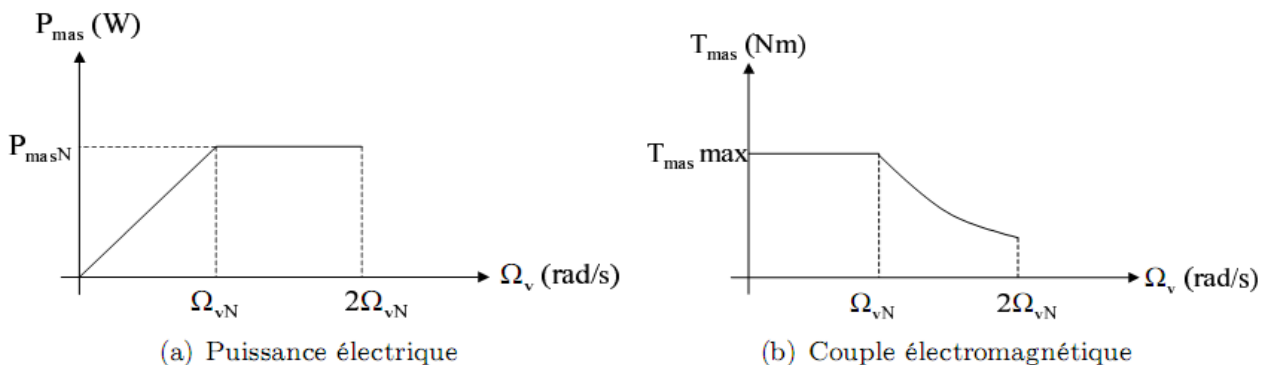


Figure IV.1 – Puissance et Couple du volant d'inertie

## Chapitre 4

On utilisera le modèle de la machine asynchrone (convention moteur) dans le repère de Park

### IV.2.3.2. Modélisation mathématique du MAS d'une structure SISE

En raison des difficultés engendrées par le couplage entre stator et rotor, le contrôle de la machine asynchrone impose un changement de référentiel, où interviennent deux angles :

- pour les grandeurs du stator un angle  $\theta_s$ , a priori arbitraire ;
- pour les grandeurs rotoriques, un angle  $\theta_s - p\theta_m$

Où  $p$  est le nombre de paires de pôles et  $\theta_m$  est la position mécanique du rotor

En posant

$$\omega_s = \frac{d}{dt} \theta_s \quad \text{si} \quad \omega_{sr} = \frac{d}{dt} \theta_s - p \frac{d}{dt} \theta_m,$$

On obtient les équations de la machine asynchrone dans le référentiel dq :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \varphi_{ds} = \omega_s \varphi_{qs} - R_s \cdot I_{ds} + U_{ds} \\ \frac{d}{dt} \varphi_{qs} = -\omega_s \varphi_{ds} - R_s \cdot I_{qs} + U_{qs} \\ \frac{d}{dt} \varphi_{dr} = (\omega_s - \omega) \varphi_{qr} - R_r \cdot I_{dr} \\ \frac{d}{dt} \varphi_{qr} = -(\omega_s - \omega) \varphi_{dr} - R_r \cdot I_{qr} \\ C_e = \frac{pM}{L_r} (\varphi_{dr} i_{qs} - \varphi_{qr} i_{ds}) \end{cases} \quad (IV.12)$$

A partir d'expressions précédente et les relations entre les courants et les flux, on déduit les expressions :

$$\begin{cases} \sigma L_s \frac{d}{dt} I_{ds} = -R_s \cdot I_{ds} + \omega_s \cdot \sigma L_s \cdot I_{qs} - \frac{M}{L_r} \frac{d}{dt} \varphi_{dr} + \omega_s \frac{M}{L_r} \varphi_{qr} + U_{ds} \\ \sigma L_s \frac{d}{dt} I_{qs} = -\omega_s \cdot \sigma L_s \cdot I_{ds} - R_s \cdot I_{qs} - \omega_s \frac{M}{L_r} \varphi_{dr} - \frac{M}{L_r} \frac{d}{dt} \varphi_{qr} + U_{qs} \\ \frac{d}{dt} \varphi_{dr} = -\frac{R_r}{L_r} \varphi_{dr} + (\omega_s - \omega) \varphi_{qr} + \frac{M \cdot R_r}{L_r} \cdot I_{ds} \\ \frac{d}{dt} \varphi_{qr} = -(\omega_s - \omega) \varphi_{dr} - \frac{R_r}{L_r} \varphi_{qr} + \frac{M \cdot R_r}{L_r} \cdot I_{qs} \\ C_e = \frac{pM}{L_r} (\varphi_{dr} i_{qs}) \end{cases} \quad (IV.13)$$

Où  $\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$ , est le coefficient de dispersion.

Les flux et les courants sont donnés par l'équation matricielle suivante :

$$\begin{aligned} \dot{X}_1 &= AX_1 + BU \\ X_1 &= (\varphi_{dr}, \varphi_{qr}, i_{ds}, i_{qs})^t \end{aligned}$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R_r}{L_r} & (\omega_p - p\Omega_v) & \frac{MR_r}{L_r} & 0 \\ -(\omega_p - p\Omega_v) & -\frac{R_r}{L_r} & 0 & \frac{MR_r}{L_r} \\ \frac{MR_r}{\sigma L_s L_r^2} & \frac{MP\Omega_v}{\sigma L_s L_r} & -\frac{R_{sr}}{\sigma L_s} & \omega_p \\ -\frac{MP\Omega_v}{\sigma L_s L_r} & \frac{MR_r}{\sigma L_s L_r^2} & -\omega_p & -\frac{R_{sr}}{\sigma L_s} \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ \frac{1}{\sigma L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} \end{bmatrix}; U = \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix} \quad (IV.14)$$

$\omega$  : pulsation du repère dq dans lequel est modélisé la machine asynchrone [rad.s-1] : référentiel lié au champ tournant :  $\omega_p = \omega$  (pulsation des tensions).

#### IV.2.3.3. Modélisation mathématique du convertisseur

Les convertisseurs d'aujourd'hui peuvent fonctionner à des fréquences de commutation de quelques kHz, beaucoup plus grandes que les fréquences des signaux de référence. On peut donc considérer que cette relation est vraie aussi pour un convertisseur réel . En appliquant la transformation directe de Park à la relation, on obtient :

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} = \frac{U}{2} \begin{bmatrix} v_{wd} \\ v_{wq} \end{bmatrix} \quad (IV.15)$$

Pour déterminer l'évolution de la tension U du bus continu, il est nécessaire de déterminer le courant circulant dans le condensateur du bus continu. Ce courant dépend des courants introduits dans le bus continu par chaque convertisseur. Ces courants peuvent être déterminés à partir du bilan de puissances aux deux extrémités du convertisseur. Pour le convertisseur, on peut écrire :

$$U \cdot i = v_{sd} \cdot i_{sd} + v_{sq} \cdot i_{sq} = \frac{U}{2} (v_{wd} \cdot i_{sd} + v_{wq} \cdot i_{sq}) \Rightarrow i = \frac{1}{2} (v_{wd} \cdot i_{sd} + v_{wq} \cdot i_{sq}). \quad (IV.16)$$

### IV.3. STRUCTURE ET PRINCIPE DE LA COMMANDE

Par inversion des équation de notre système de stockage inertiel , on obtient sa commande .

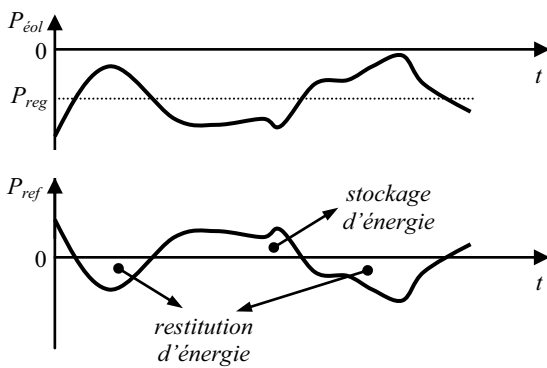
Pour une régulation en puissance du système de stockage inertiel composé de la machine asynchrone, on choisit une plage de variation de vitesse comprise entre la vitesse nominale et le double de celle-ci afin de disposer de la puissance nominale quelque soit la vitesse de rotation. Pour notre système de stockage, le fonctionnement à puissance constante se fait entre 1500 et 3000 trs.min-1 (machine à deux paires de pôles).

#### IV.4. CONTROLE ET SUPERVISION DU SISE

##### IV.4.1. Stratégie de contrôle du SISE

Comme on a déjà vu dans le deuxième chapitre, la puissance fournie par un générateur éolien est toujours variable, dû aux variations de la vitesse du vent. De l'autre côté, c'est le consommateur ou le réseau qui doit recevoir une puissance lissée. La figure montre le principe de contrôle d'un SISE associé à un générateur éolien. Ayant la puissance générée par le générateur éolien,  $P_{éol}$ , et connaissant la puissance qu'il faut délivrer au réseau ou sur les charges isolées,  $P_{reg}$ , une puissance de référence pour le SISE peut être déterminée comme suit :

$$P_{ref} = P_{reg} - P_{éol} \tag{IV.17}$$



Si la puissance de référence est positive, c'est qu'il y a un excédent d'énergie qui doit être stockée. Si la puissance de référence est négative, on a un déficit d'énergie qui doit être couvert par l'énergie stockée.

Le contrôle de la tension du bus continu peut être fait par deux voies :

- par le convertisseur coté réseau, mais à condition d'être connecté sur un réseau.
- par le convertisseur du SISE, ce qui est obligatoire lors de

l'alimentation des charges isolées.

Si on utilise la première méthode de régulation du bus continu, le contrôle du SISE est basé sur l'expression (IV.17). Au contraire, s'il faut utiliser la deuxième méthode de régulation, un terme nouveau doit être ajouté à l'expression (IV.17):  $P_{ref} = P_{reg} - P_{éol} - \Delta P$  (IV.18)

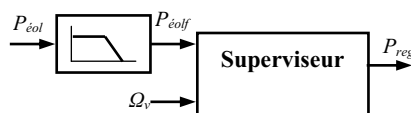
où  $\Delta P$  représente la puissance nécessaire pour réguler le bus continu.

##### IV.4.2. Supervision du SISE associé au générateur éolien

Les simulations présentées dans la section précédente ont eu pour but de valider les méthodes de Contrôle pour le SISE, mais les valeurs prises par la puissance de réglage sont des valeurs hypothétiques. En réalité, la puissance de réglage doit tenir compte de deux contraintes :

- La vitesse du volant d'inertie doit être toujours maintenue entre les limites de saturation. La limite inférieure est donnée par la vitesse de base de la machine électrique et la limite supérieure est donnée par la vitesse maximale du volant d'inertie.
- L'inertie du volant est limitée.

Cela veut dire que les possibilités de stockage sont limitées.





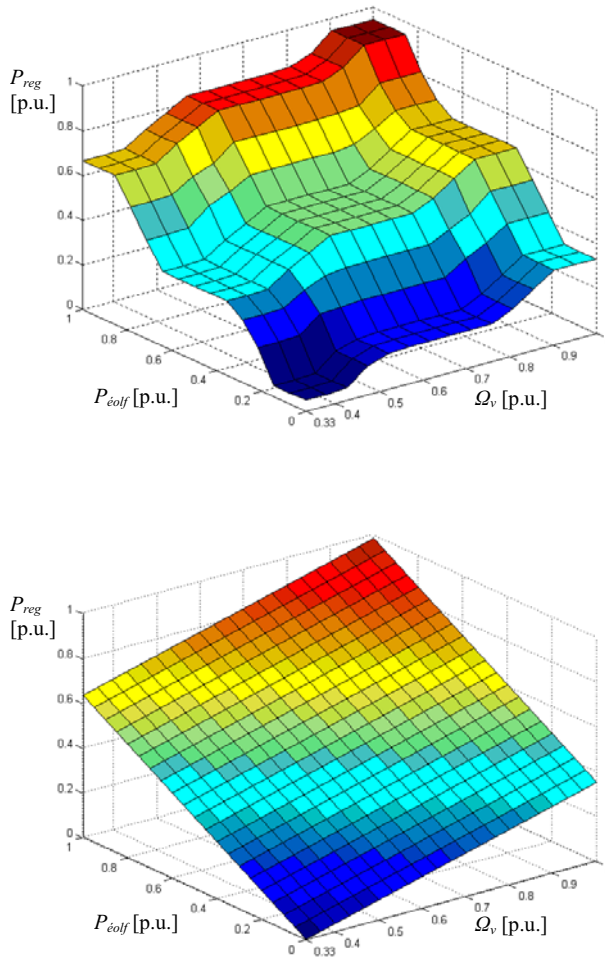


Figure IV.7 – Evolution de la puissance de réglage en fonction de la vitesse du volant et de la puissance générée

## IV.5. CONTROLE DU SISE ASSOCIE AU GENERATEUR EOLIEN

### IV.5.1. Contrôle en vitesse pour le SISE, et contrôle du bus continu par le convertisseur coté réseau

Cette méthode de contrôle a été la première étudiée lors du travail présenté dans cette mémoire. Il est bien connu que l'énergie est l'intégrale de la puissance en fonction de temps. Donc, en intégrant la puissance de référence déterminée par (6.1) on obtient une énergie. En faisant la somme de cette énergie avec l'énergie stockée dans le volant d'inertie, on obtient l'énergie de référence pour le SISE:

$$E_{c_{ref}} = E_c^{t_1} + \int_{t_1}^{t_2} P_{ref} \cdot dt = J \cdot \frac{\Omega_{ref}^2}{2} \quad , \quad (IV.20)$$

Remplaçant l'expression (IV.20) dans (IV.1), on obtient la vitesse de référence  $\Omega_{ref}$  pour le volant d'inertie et, implicitement, pour la machine électrique du SISE:

$$\Omega_{ref} = \sqrt{\frac{2 \cdot E_{c_{ref}}}{J}} \quad (IV.21)$$

Où  $E_c^{t_1}$  représente l'énergie initiale du volant d'inertie.

Un superviseur basé sur la logique floue est proposé [LEC02][LEC03]. La surface du superviseur est donnée dans la figure et son développement est décrit dans l'Annexe. Cependant, l'implantation du superviseur à logique floue nécessite une période d'échantillonnage très grande. Avec cette période d'échantillonnage il est impossible de réaliser un bon contrôle du SISE. Il a donc fallu trouver des méthodes de supervision plus simples.

La première méthode de simplification du superviseur concerne l'approximation de la surface de la figure par un plan incliné décrit par :  $P_{reg} = 0.63 \cdot P_{éolf} + 0.52 \cdot \Omega - 0.17$  [p.u.] (IV.19) Cette relation a été déterminée empiriquement afin de préserver les quatre coins de la surface initiale.

La vitesse de référence est limitée afin de maintenir la MAS dans la zone de fonctionnement à puissance constante et ne pas dépasser la vitesse maximale du volant d'inertie.

La figure montre le schéma de contrôle en vitesse pour le SISE avec MAS. On voit que le SISE n'intervient pas dans le réglage de la tension du bus continu.

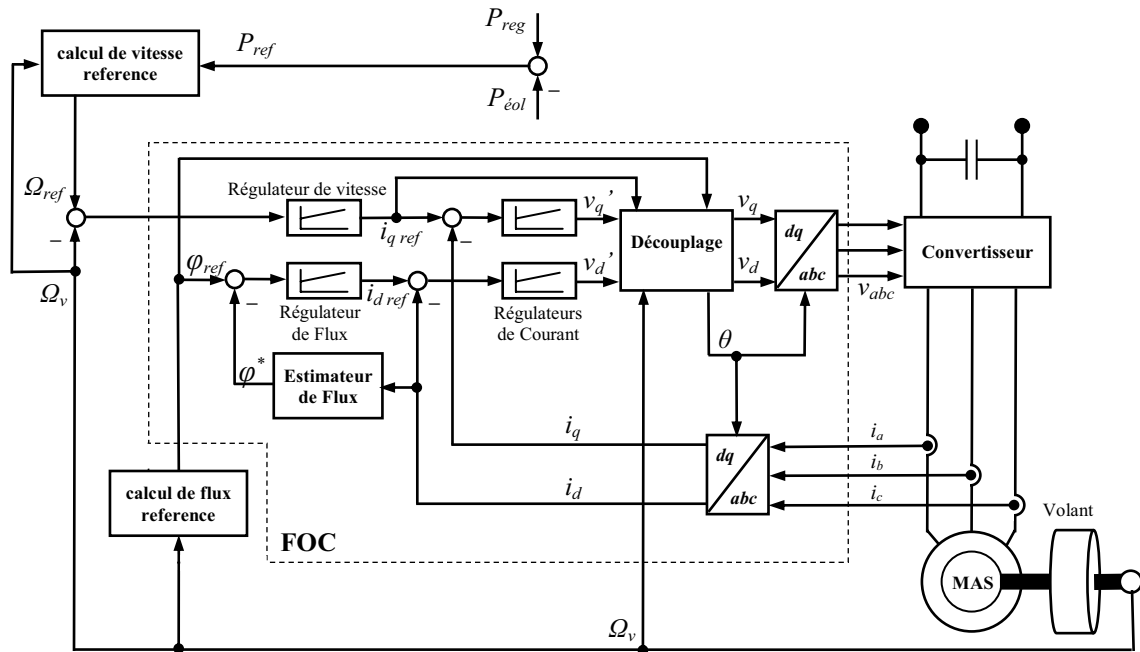


Figure IV.2 – Schéma de contrôle en vitesse pour le SISE

#### IV.5.2. Contrôle en vitesse pour le SISE, et contrôle du bus continu par le SISE

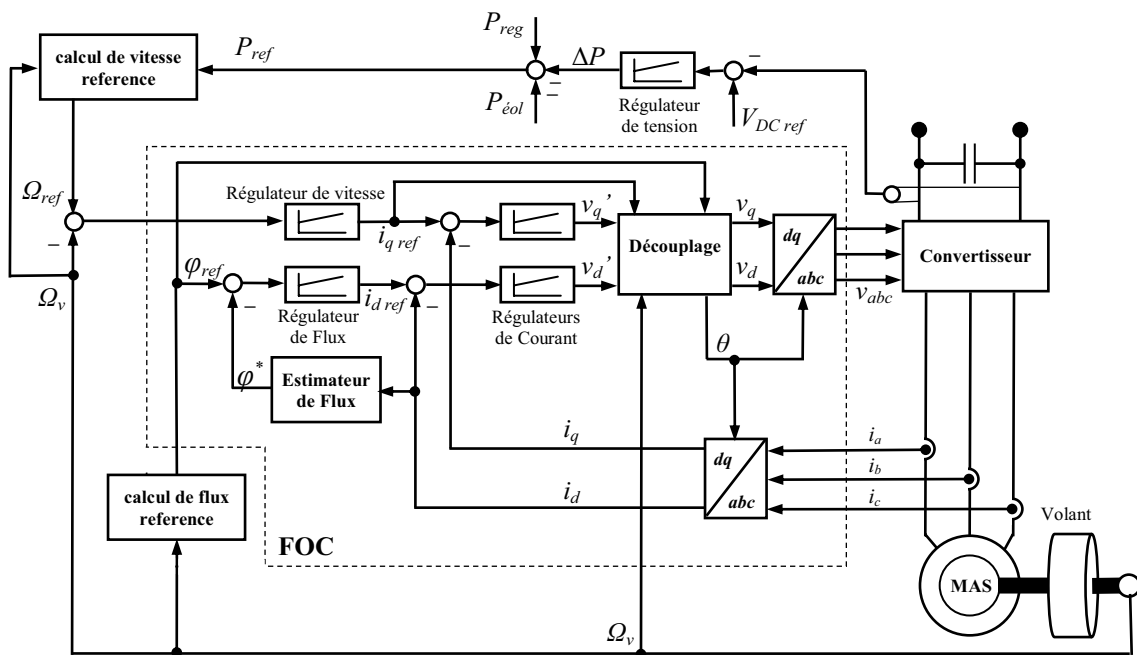


Figure IV.3 – Schéma de contrôle en vitesse pour le SISE et du bus continu

La figure montre le deuxième schéma de contrôle étudié. Dans ce cas, le contrôle du bus continu est assuré par le SISE.

**IV.5.3. Contrôle en couple pour le SISE**

A partir d'une puissance de référence,  $P_{vref}$ , on peut déduire le couple électromagnétique de référence de la machine,  $C_{emref}$ , entraînant le volant d'inertie par une mesure de la vitesse de rotation,  $\Omega_{vmes}$ .

$$C_{emref} = \frac{P_{vref}}{\Omega_{vmes}} \tag{IV.22}$$

Le couple électromagnétique de référence,  $C_{emref}$ , devra être limité au couple nominal pour la plage de vitesse comprise entre 0 et la vitesse nominale en évitant la discontinuité de l'équation précédente à l'arrêt du volant. Au delà de la vitesse nominale, la valeur du couple diminuera de manière à garder le produit  $C_{em} \cdot \Omega_v$  constant. La réduction du couple électromagnétique est effectuée par défluxage de la machine asynchrone au delà de la vitesse de synchronisme. Une commande vectorielle à flux rotorique orienté est utilisée pour la machine asynchrone : la position du référentiel (repère du champ tournant à la vitesse  $\omega_p = \omega$ ) est choisie afin d'annuler la composante du flux rotorique d'axe q. Le flux rotorique est alors entièrement représenté par la composante  $\varphi_{rd}$ . Ainsi, en posant  $\varphi_{rq} = 0$ , et donc  $\frac{d\varphi_{rq}}{dt} = 0$

Le couple électromagnétique s'écrit alors :

$$C_{em} = \frac{p.M}{L_r} \varphi_{rd} i_{sq} \tag{IV.23}$$

Le couple peut donc être contrôlé par le courant statorique d'axe q si la composante du flux rotorique d'axe d est maintenue constante.

Le référence courant devient 
$$i_{sqref} = \frac{C_{em} L_r}{p.M \varphi_r} \tag{IV.24}$$

Le flux rotorique de référence est calculé comme suite

$$\varphi_{rdref} = \frac{P L_r}{p.M i_{sq}} \frac{1}{\Omega_v} \tag{IV.25}$$

Le modèle de la machine asynchrone permet établir la commande de la machine asynchrone :

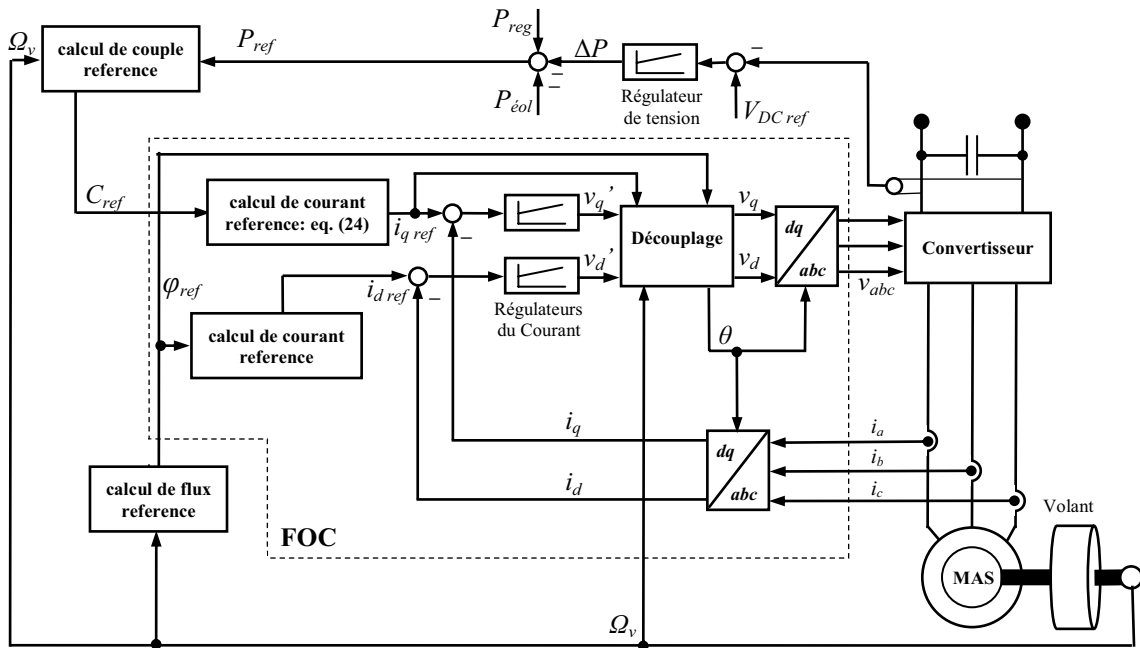


Figure IV.4 – Schéma de contrôle en couple pour le SISE

#### IV.5.4. Systèmes de stockage en parallèle

L'inertie calculée précédemment peut paraître grande donc non réalisable techniquement. On montre ici que l'on peut coupler en parallèle plusieurs systèmes de stockage du même type mais de puissance plus petite, ceci pour un même cahier des charges. Autrement dit, pour fournir 450 kW pendant une minute, il faudrait disposer d'un volant d'inertie de 729 kg.m<sup>2</sup>. La figure IV.5 montre son équivalence avec 3 systèmes de stockage de 150 kW chacun. L'inertie de chaque système se trouve alors trois fois plus petite que pour avec une machine de 450 kW. Aussi, pour des plus petites puissances, on pourrait utiliser des machines asynchrones à une seule paire de pôle qui permettrait de diviser l'inertie par quatre dans la mesure où les paliers sont techniquement réalisables.

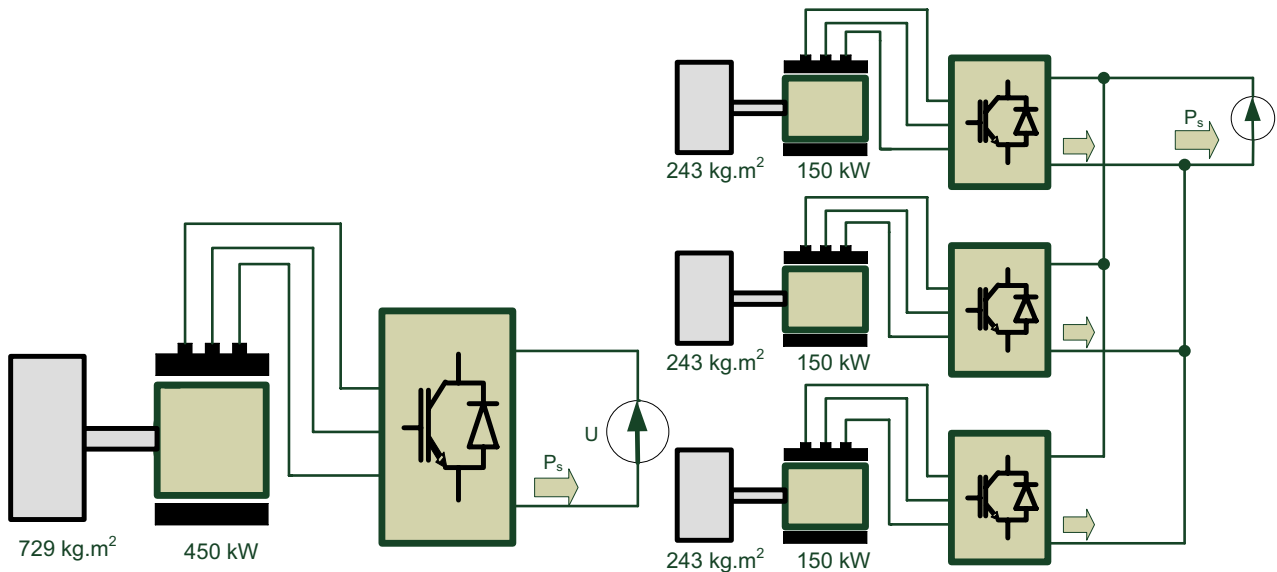


Figure IV.5 – Stockage en parallèle

#### IV.6. VIEILLISSEMENT, DUREE DE VIE

Le vieillissement est un point fort du stockage cinétique. Si les études sur la fatigue de la jante le confirment, on peut pratiquement cyclé à l'infini la roue. Le vieillissement sera donc indépendant du nombre de cycles et seule la durée de vie des éléments constituants conditionnera la durée de vie de l'ensemble.

#### IV.7. AVANTAGES / INCONVÉNIENTS

Examinons en conclusion les avantages et inconvénients du stockage cinétique

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grande puissance massique</li> <li>• Rendement énergétique élevé</li> <li>• Rendement de charge élevé</li> <li>• Durée de vie indépendante du nombre de cycles</li> <li>• Connaissance précise du niveau d'énergie stockée</li> <li>• Gestion de la charge simplifiée.</li> <li>• Moins de contraintes thermiques</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Faible durée de stockage</li> <li>• Décharge complète à éviter</li> <li>• Risque de rupture et d'éclatement</li> <li>• Pour le spatial difficulté de maîtriser le moment cinétique et les micro-vibrations</li> </ul>

Le stockage cinétique paraît séduisant pour des applications à fortes puissances spécifiques et aux nombres de cycles importants.

## IV.8. RESULTATS DE SIMULATION

### IV.8.1. COMMANDE EN COUPLE

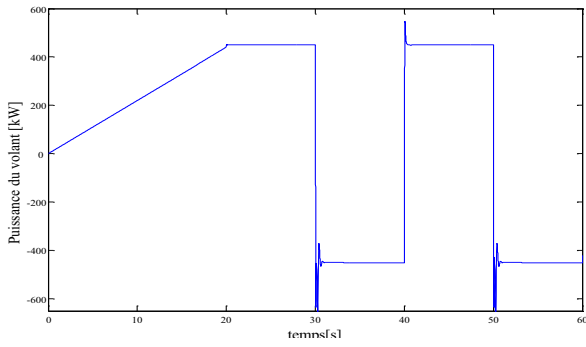


Figure IV.6 – Puissance du volant d'inertie

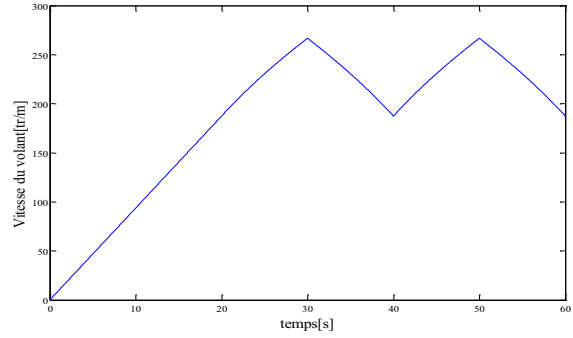


Figure IV.7 – Vitesse du volant d'inertie

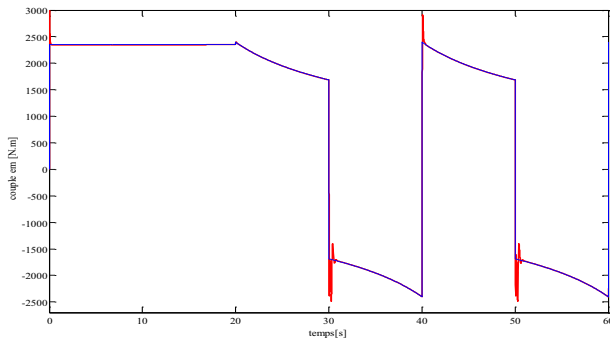


Figure IV.8 – Couple du volant d'inertie

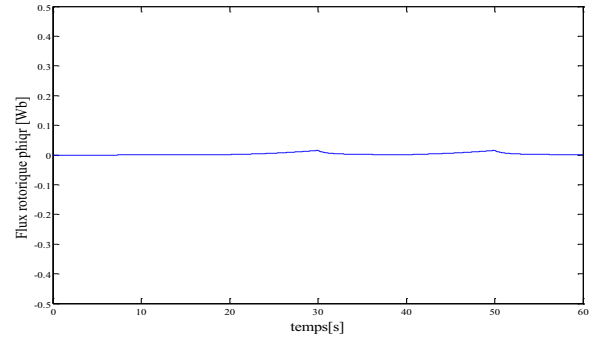
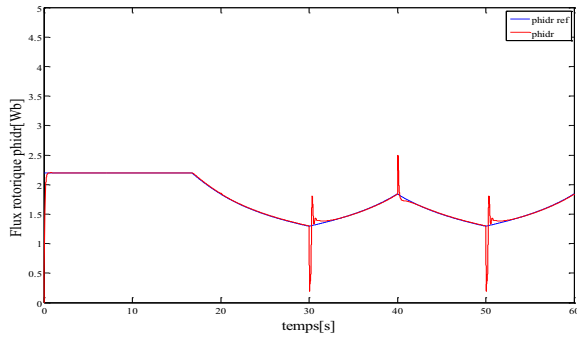


Figure IV.9 – Flux rotorique suivant l'axe d et q de la MAS

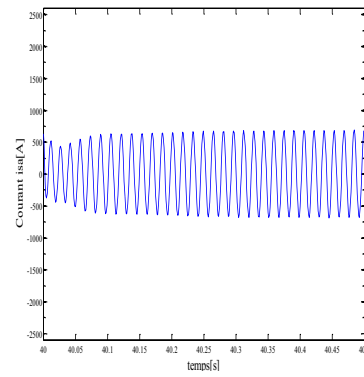
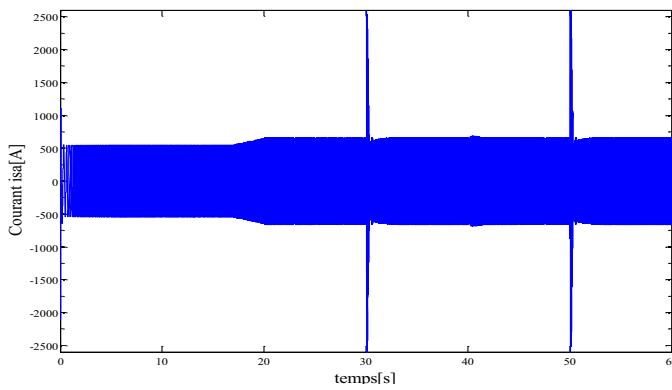


Figure IV.10 – Courant d'une phase statorique de la MAS avec zoom

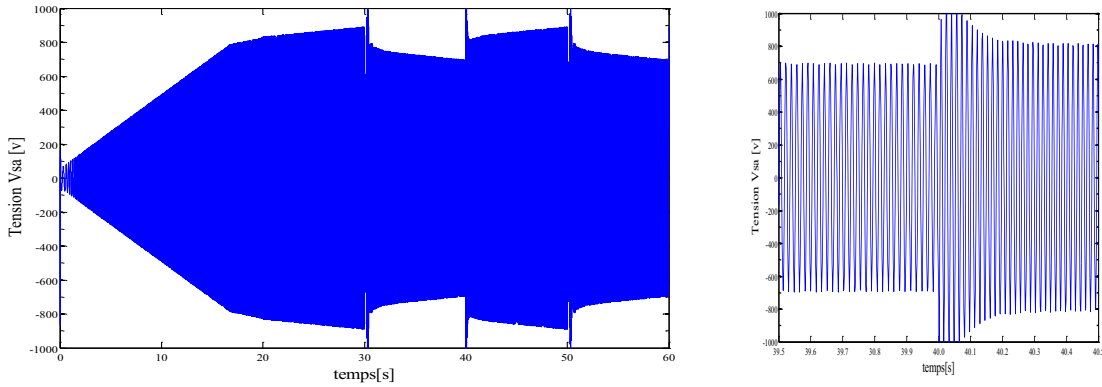


Figure IV.11 – Tension d'une phase statorique de la MAS avec zoom

La puissance de référence est inversée à chaque fois que la vitesse du volant atteint une limite haute ou basse (figure IV.8). On demande donc à la machine asynchrone de fournir ou de consommer sa puissance nominale qui est de 450 kW. Une puissance positive correspond à une puissance consommée par la machine et une puissance négative correspond à une puissance fournie par la machine.

Le flux rotorique quadratique est nulle tandis que le flux rotorique direct est défluxé

#### IV.8.2. COMMANDE EN VITESSE

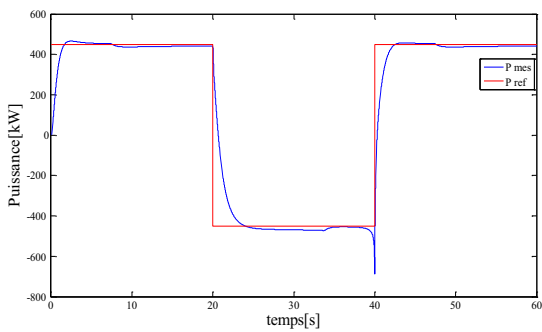


Figure IV.12 – Puissance du volant d'inertie

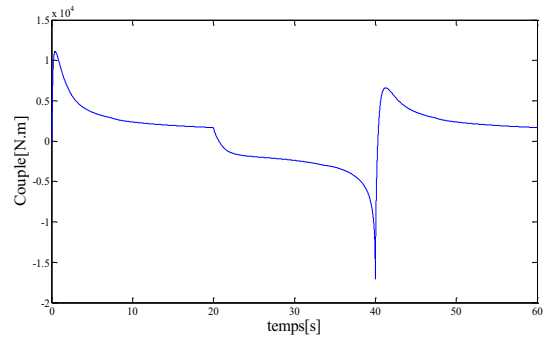


Figure IV.13 – Couple du volant d'inertie

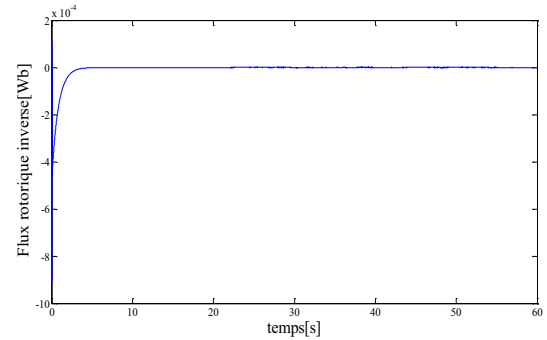
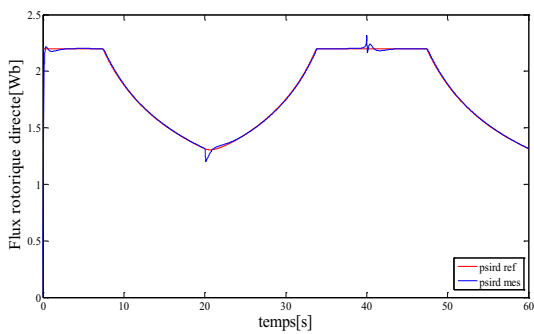


Figure IV.14 – Flux rotorique suivant l'axe d et q de la MAS

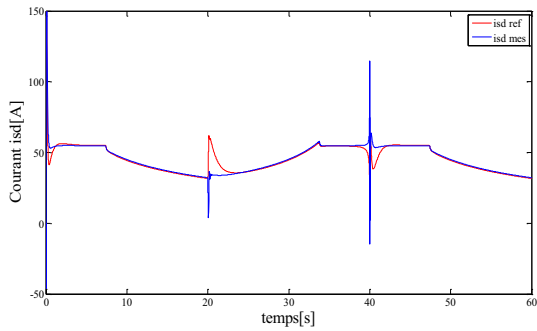


Figure IV.15 – Courant du volant d’inertie

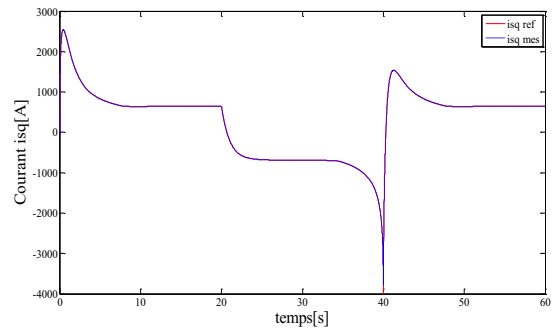


Figure. IV.16 – Courant du volant d’inertie

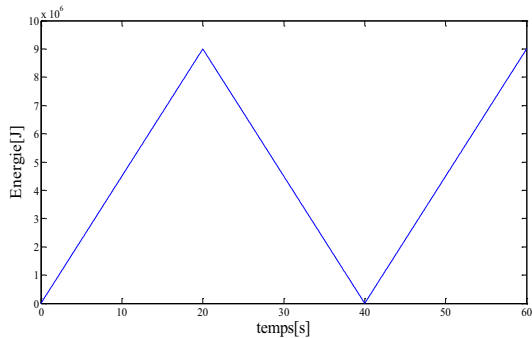


Figure IV.17 – Energie du volant d’inertie

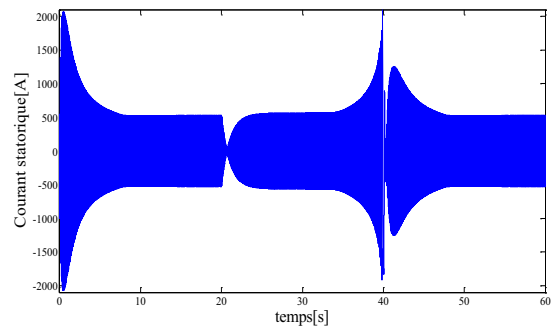


Figure IV.18 – Courant d’une phase statorique de la MAS

On tient pas compte des pertes

Dans cette simulation, la vitesse varie de 1500 à 3000 tr/min pendant une minute dont les paramètres sont cités. La vitesse de rotation du volant d’inertie est illustrée par la figure.

On applique deux échelons à la machine.

On constate un bon suivi pour la vitesse du volant, comme on peut remarquer la machine fonctionne à flux constant jusqu’à  $t=8$  .a ce moment ,l’algorithme de défluxage intervient car la machine est en survitesse.

Le comportement des régulateurs est satisfaisant en terme s de dynamique et de précision.

La figure IV.12 représente la puissance du système de stockage et Ainsi le couple électromagnétique est présenté à la figure IV.13.

La figure IV.18 montre le courant au stator de la MAS

On peut remarquer que lorsque la puissance de référence qu’on est demandé de stocker pendant 20 secondes, la vitesse de rotation du volant croit de 1500 à 3000 tr/min .la machine fonctionne en moteur et le système de stockage stocke de l’énergie.

Les 20 secondes restantes on est demandé de restituer cette puissance alors la vitesse décroît de 3000 à 1500 tr/min ce qui fait fonctionner la machine en génératrice.

Les figures montrent un bon suivi des consignes et une dynamique satisfaisante ce qui constitue l’un des avantages des SISE lors de les associer à des systèmes de production comme le cas des éolienne qu’on va voir par la suite du travail.

## *Chapitre 4*

Du fait que le courant  $i_{sd}$  est l'image du flux  $\phi_{hrd}$  on remarque que leurs formes sont semblables.

Lors du stockage la vitesse de volant croit alors que le couple tend à diminuer pour garder ce produit constant. En revanche, si la vitesse du volant décroît on peut remarquer l'augmentation du couple pour la même raison.

Pour justifier les deux modes de fonctionnement de la MAS on peut voir l'état du courant statorique de la machine par rapport à la tension ou il est en retard de phase pendant le stockage et la MAS fonctionne en moteur ; et dès que la restitution d'énergie commence, le courant est en avance de phase par rapport à la tension étant donné que la MAS fonctionne en mode générateur.



### IV.9. RESULTATS DE SIMULATION DU SYSTEME COMPLET

Le système de la figure a été implanté sous matlab ou on a simulé la connexion au réseau d'une éolienne de 1.5MW associée à une unité de stockage inertiel.

Afin de montrer le comportement du système globale considéré dans cette étude, on a choisit un profil de vent aléatoire.

Les simulations ont été faites pour le cas ou le gestionnaire de réseau demande une puissance constante de 0.86MW.

Le réglage du bus continu est assuré par le convertisseur coté réseau.

Le SISE considéré est initialement chargé et maintenu dans la zone de fonctionnement à puissance constante.

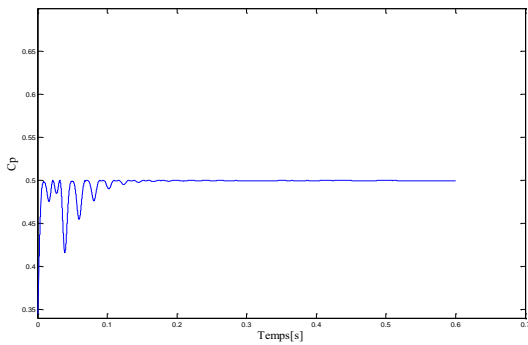


Figure IV.19 – Facteur de puissance

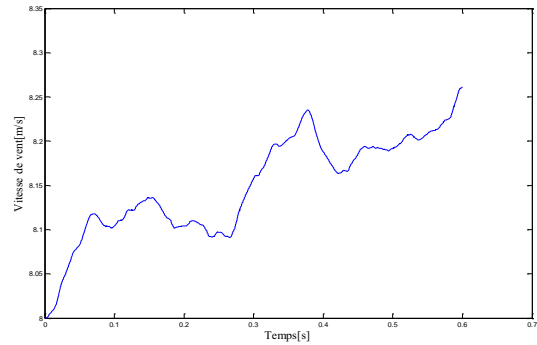


Figure IV.20 – Profil de vent

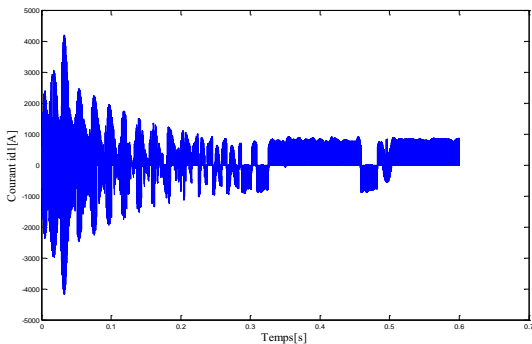


Figure IV.21 – Courant id1 de la MADA

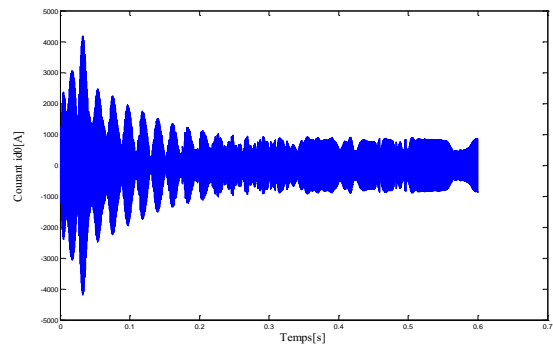


Figure IV.22 – Courant id0 de la MADA

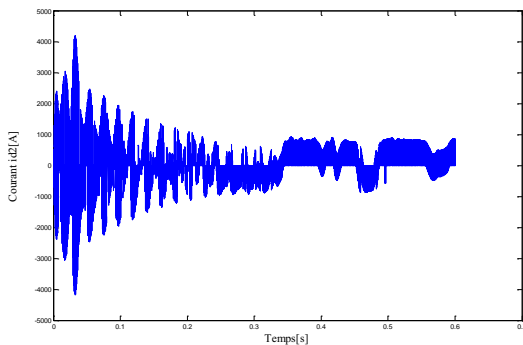


Figure IV.23 – Courant id2 de la MADA

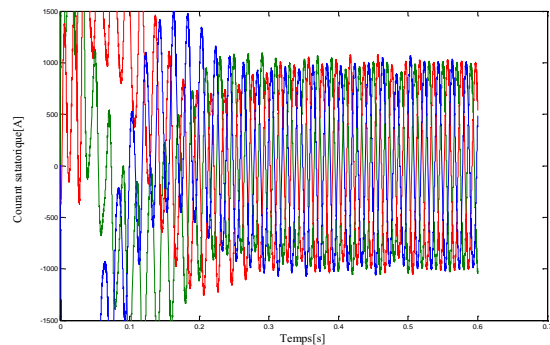


Figure IV.24 – Courant statorique de la MADA

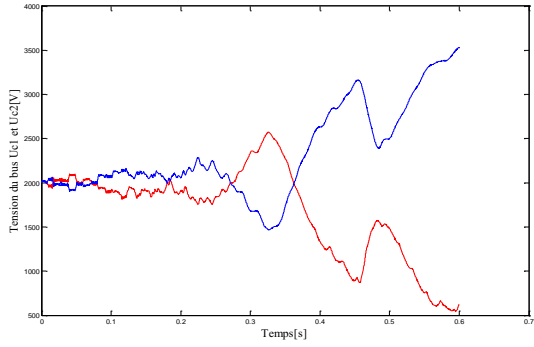


Figure IV.25 – Tension du bus continue  $U_{c1}$  et  $U_{c2}$

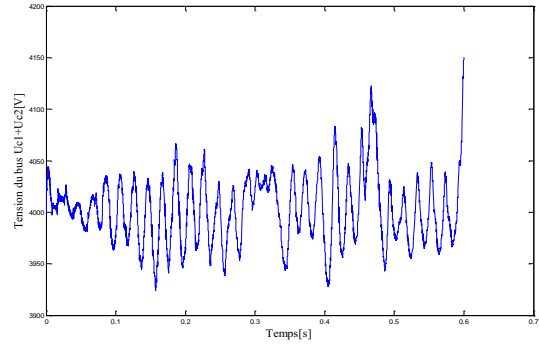


Figure IV.26 – Tension du bus continue  $U_c$

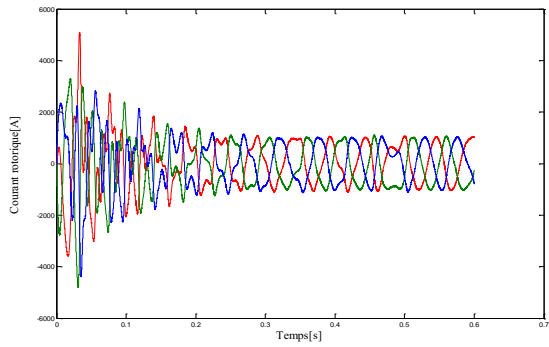


Figure IV.27 – Courant rotorique de la MADA

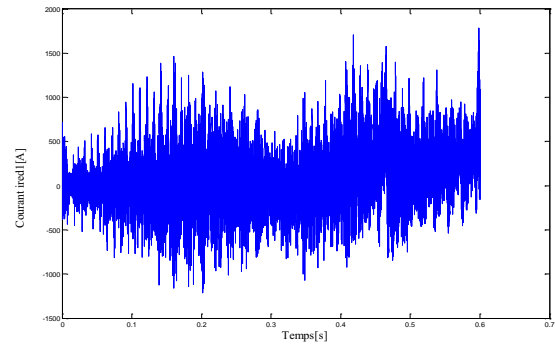


Figure IV.28 – Courant  $ired1$  de la MADA

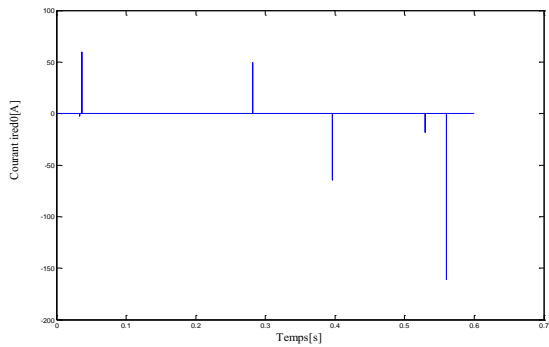


Figure IV.29 – Courant  $ired0$  de la MADA

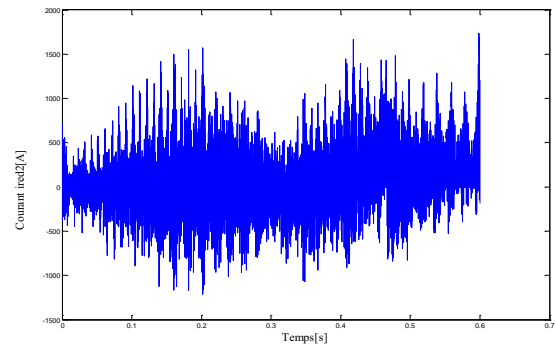


Figure IV.30 – Courant  $ired2$  de la MADA

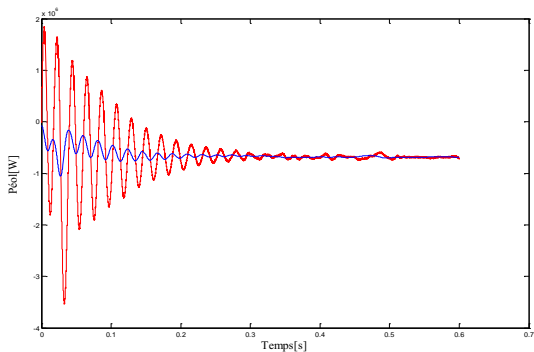


Figure IV.31 – Puissance active d'éolien

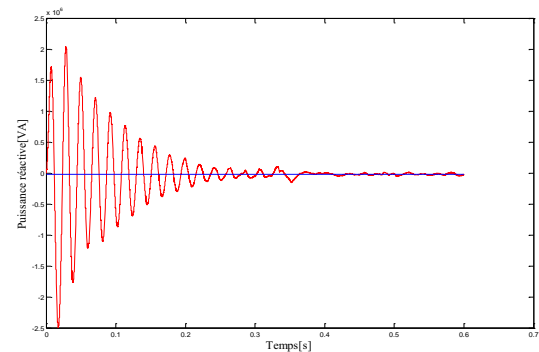


Figure IV.32 – Puissance réactive d'éolien

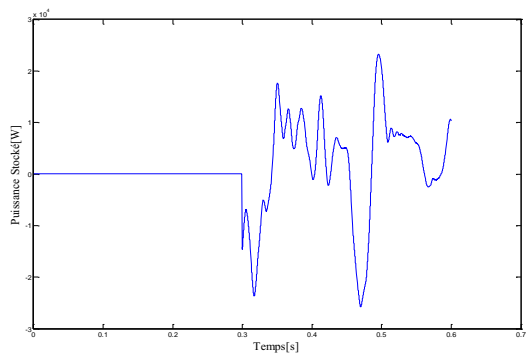


Figure IV.33 – Puissance active stocké au volant

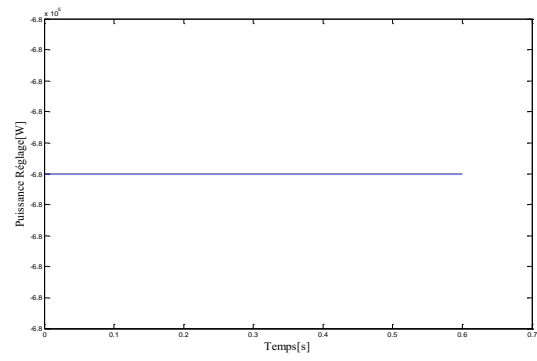


Figure IV.34 – Puissance active de réglage

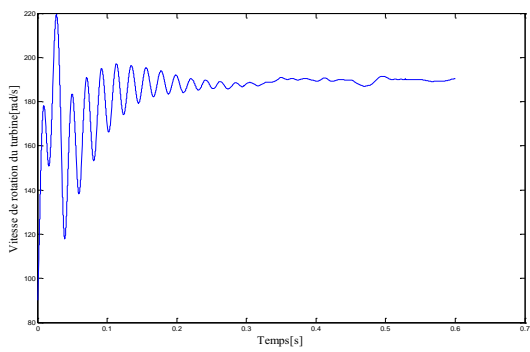


Figure IV.35 – Vitesse mécanique de la turbine éolienne

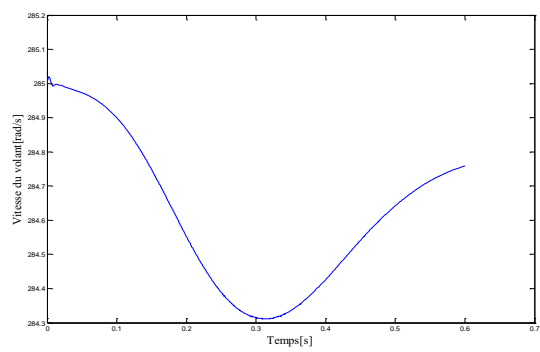


Figure IV.36 – Vitesse mécanique du volant d'inertie

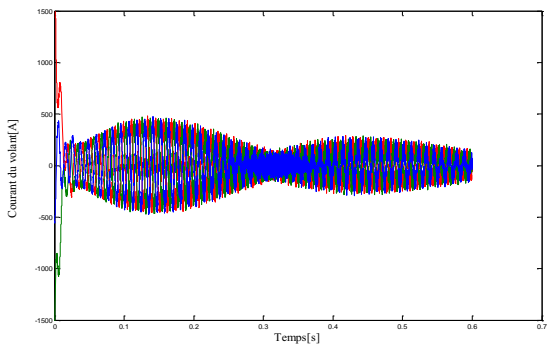


Figure IV.37 – Courant statorique du volant

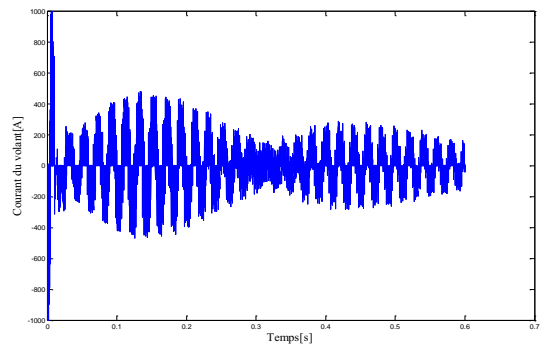


Figure IV.38 – Courant d'une phase statorique du volant

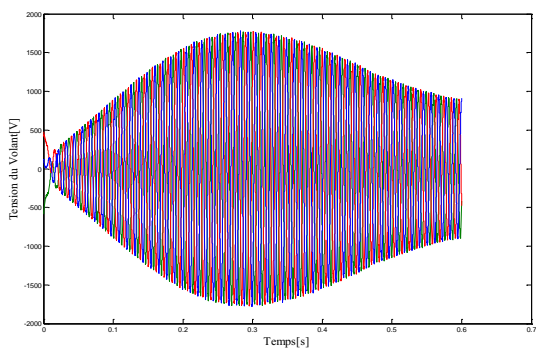


Figure IV.39 – Tension d'une phase statorique du volant

## Chapitre 4

Les figures IV.19 , IV.20 représentent respectivement le facteur de puissance et la vitesse de vent  
Les figures IV.21 IV.22 IV.23 IV.24 représentent les courants  $i_{d1}$   $i_{d0}$   $i_{d2}$  et le courant statorique.  
La Tension du bus continue sont représentée dans figure IV.25 –IV.26.  
Les figures IV.27 ,IV.28 , IV.29 et IV.30 représentent respectivement le Courant rotorique  $i_{red1}$   
 $i_{red0}$  et  $i_{red2}$  .

La puissance active extraite du vent par la technique MPPT est représentée à la figure IV.31.  
La puissance de l'éolienne varie entre des valeurs inférieures et supérieures à la puissance constante que le réseau doit recevoir sur les différentes phases de fonctionnement de la MADA.  
La puissance active peut transiter au réseau à facteur de puissance unitaire, du fait que le courant renvoyé au réseau et la tension de ce dernier sont en opposition de phase, l'écoulement de la puissance vers le réseau se fait à puissance réactive nulle.  
Le contrôle de la liaison au réseau est montré par la régulation de la tension continue et des courants de filtre.  
Les figures IV.35 et IV.36 montrent la vitesse mécanique du générateur éolien et la vitesse mécanique du volant sur les quelles on peut voir le fonctionnement de la MADA afin d'analyser le comportement du système global comprenant l'unité de stockage.

Afin de montrer le comportement du système de stockage, la tension et le courant de la SISE sont illustrés aux figures IV.37 –IV.39.

La puissance de référence négative appliquée au SISE ainsi la vitesse du volant qui tend à diminuer durant cette phase montrent qu'on est demandé de couvrir le déficit de puissance de l'éolienne, c'est le mode de fonctionnement de la MAS en générateur donc restitution d'énergie.  
S'il y a l'excédent de puissance la vitesse du volant tend à augmenter progressivement et sa puissance change de signe, la MAS fonctionne en moteur caractérisant la phase de stockage.

# Conclusion Générale

## Conclusion

Notre étude nous a permis de réaliser une modélisation complète et globale d'un système de génération d'électricité à partir de l'énergie éolienne. Cette modélisation se démarque principalement par l'approche différente qui a été faite de la partie mécanique qui fait appel aux calculs d'aérodynamique pour déterminer les relations liant la vitesse du vent, le couple et la vitesse de l'hélice, mais aussi de l'étude de l'ensemble avec l'association de l'unité de stockage permettant la fourniture d'une puissance constante au réseau.

Tout ceci a été conçu autour d'une MADA et un contrôle MPPT de l'éolienne permettant de maximiser la puissance produite à chaque instant. Le contrôle indépendant des puissances actives et réactives a été étudié et deux commandes, directe et indirecte, ont été exposées, la commande indirecte ayant été retenue pour son contrôle des courants rotoriques et sa bonne robustesse due aux deux boucles de régulation en courant et en puissance. L'objectif est de pouvoir faciliter l'insertion des éoliennes dans les réseaux électriques afin d'augmenter la part de la production d'énergie renouvelable dans le réseau électrique futur.

La mise en place de l'unité de stockage et sa simulation nous a montré qu'il était judicieux d'utiliser cette solution afin d'obtenir un système de production plus pratique pour le gestionnaire de réseau ; Il peut désormais compter sur une puissance constante comme l'a montré la simulation sur une longue durée. La MADA produit, grâce à la commande MPPT, le maximum de la puissance qui est disponible dans le vent et l'unité de stockage gère sa puissance et son énergie pour maintenir constante la puissance fournie au réseau en ce déchargeant et se rechargeant aux grés du vent.

En comparaison avec une éolienne sans stockage, notre système de conversion éolienne permet principalement d'obtenir une puissance constante fournie au réseau. C'est donc cet aspect qui est intéressant car pour une éolienne sans stockage, on ne peut pas compter sur une puissance tout au long de la période envisagée, et les fluctuations de la puissance fournie au réseau sont difficiles à gérer et entraînent des perturbations pour les utilisateurs. Par ailleurs, pour un cas réel, la période devra être plus large afin de tenir compte des aléas du vent sur toute l'année.

A l'égard du travail que nous venons de présenter, des perspectives pouvant être envisagées pour l'amélioration de la chaîne turbine-MADA-réseau. Parmi les quels on peut citer :

L'établissement d'un modèle de la MADA plus réaliste prenant en compte la saturation magnétique.

Un système hybride basée sur des sources d'énergie renouvelable et des systèmes de stockage d'énergie.

La proposition et la validation de nouvelles stratégies de gestion des puissances pour la régulation du bus continu et le contrôle des puissances transitées au réseau

L'intégration éventuelle d'un système de stockage mixte (court terme et long terme) d'énergie pour le réglage de la puissance fournie au réseau.

L'étude du comportement de l'éolienne face aux éventuels défauts sur le réseau électrique pour assurer la continuité du service.

## ANNEXE A

### *Gisement éolienne en Algérie*

En Algérie, le prix actuel du kW traditionnel reste inférieur à celui produit par les aérogénérateurs éoliens. Les récents développements de matériaux de fabrication ont fait que les inerties des systèmes ont baissé et les derniers aérogénérateurs produits démarrent à des vitesses plus faibles pour des puissances nominales de l'ordre de 5 MW.

Pour la recherche et le développement de l'énergie éolienne, l'évaluation des ressources disponibles, reste une étape incontournable. L'évaluation du gisement éolien est nécessaire avant toute implantation de système.

Toutefois, la détermination des caractéristiques éoliennes d'un site à la hauteur normalisée de 10 m du sol est insuffisante pour le dimensionnement d'un système éolien. Aussi, attendu que les données vents fournies par les services météorologiques sont généralement mesurées à la hauteur standard de 10 m du sol, les recherches se sont orientées vers l'extrapolation des paramètres à la hauteur de l'axe de l'éolienne.

Il ya plusieurs travaux portant sur l'estimation des potentiels éoliens et en particulier, les différents modèles d'interpolation horizontale et d'extrapolation verticale sous forme de relations empiriques.

La théorie de similitude, constitue la base de tous les travaux sur le profil du vent et l'extrapolation verticale de la vitesse.

Par ailleurs, des études sur des zones microclimatiques dites ventées ont été effectuées à l'aide de modèle permettant l'établissement de cartes plus détaillées des vitesses moyennes.

Les différents Atlas des évolutions des vitesses de vent et puissances énergétiques produits sont :

Carte des vents de l'Algérie à 10 et 25 m du sol ;

Carte saisonnière de la vitesse du vent , (Hivers, Printemps, Eté et Automne) ;

Carte de la puissance moyenne annuelle récupérable de l'Algérie à 10, 25 et 50 m.

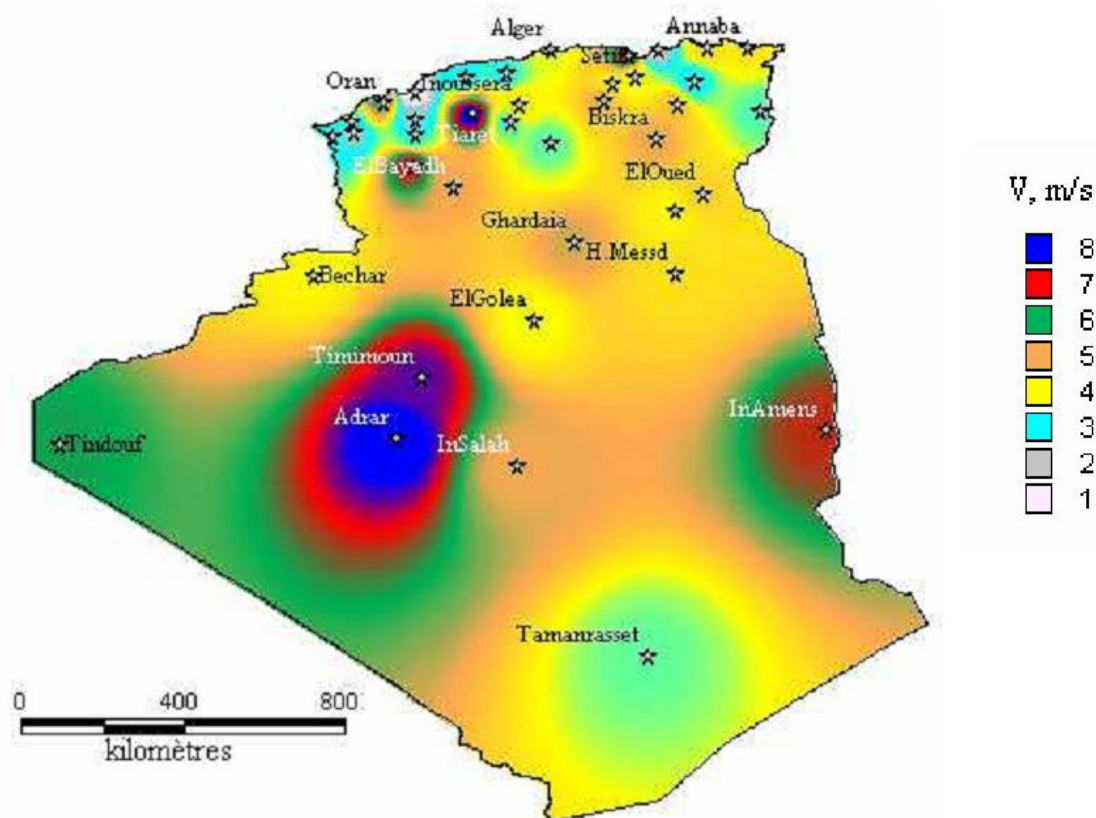


Figure A.1 Atlas de la vitesse du vent à 50 m d'altitude.

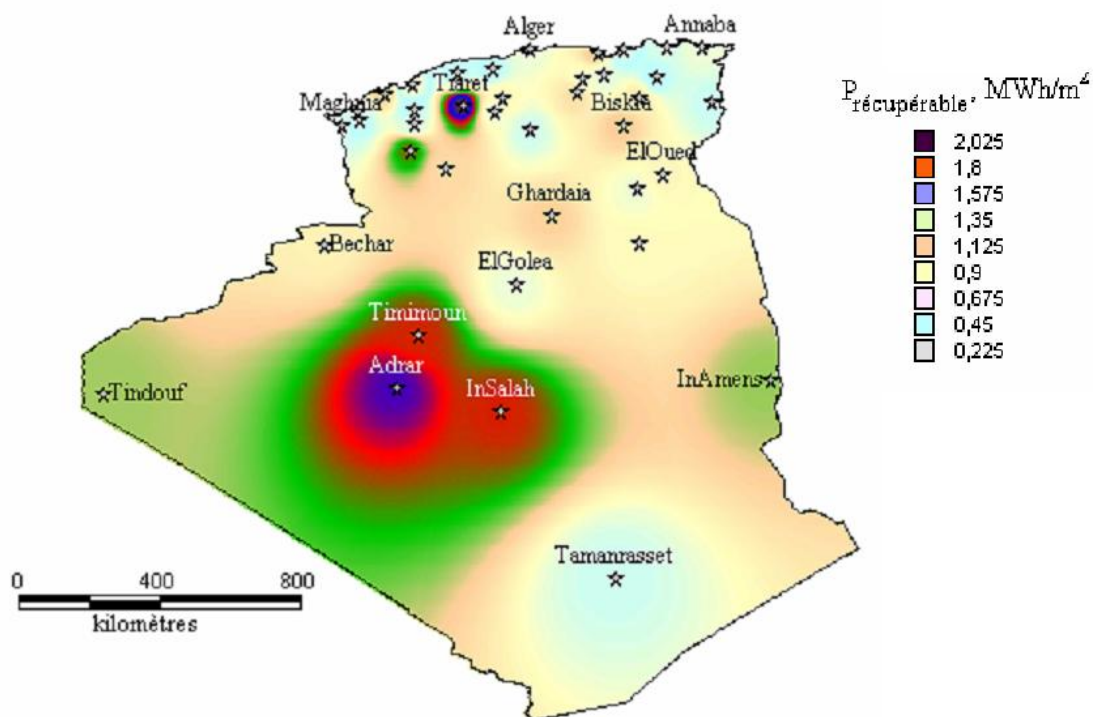


Figure A.2 Atlas de la densité de puissance énergétique à 50 m



## ANNEXE B

## Synthèse des régulateurs

## B.1 SYNTHÈSE DU RÉGULATEUR PROPORTIONNEL INTÉGRAL

La stratégie de commande de la MADA utilise un régulateur proportionnel intégral *PI*. C'est un régulateur simple et rapide à mettre en œuvre et donne un bon compromis complexité-performance. La Figure B.1 montre un système en boucle fermée corrigé par un régulateur *PI*.

Où :

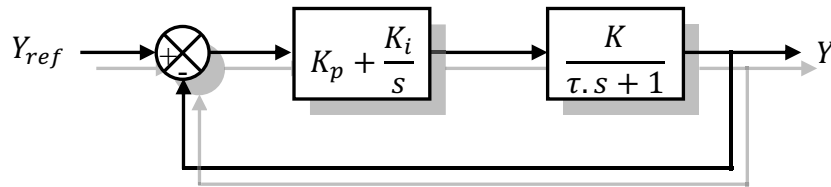


Figure B.1 Système régulé par un régulateur proportionnel intégral

$K_p + \frac{K_i}{s}$  est la fonction de transfert du régulateur proportionnel intégral.

$\frac{K}{\tau.s + 1}$  est la fonction de transfert du système à réguler.

$\tau$  est la constante de temps du système.

La fonction de transfert de l'ensemble système-régulateur s'écrit alors sous la forme suivante.

$$FTBO = \frac{K_p \cdot s + K_i}{s} \frac{K}{\tau \cdot s + 1} = \frac{\frac{K_p}{K_i} \cdot s + 1}{\frac{s}{K_i}} \frac{K}{\tau \cdot s + 1} = \frac{KK_i \left( \frac{K_p}{K_i} \cdot s + 1 \right)}{s(\tau \cdot s + 1)} \quad B.1$$

Nous choisissons la méthode de compensation des pôles pour la synthèse du régulateur afin de compenser le pôle de la fonction de transfert du système par un zéro de la fonction de transfert du régulateur. Ceci conduit à l'égalité suivante.

$$\frac{K_p}{K_i} = \tau$$

Si on considère que le pôle est parfaitement compensé, la fonction de transfert devient alors :

$$FTBO = \frac{K_i \cdot K}{s} \quad B.2$$

Ce qui donne en boucle fermée :

$$FTBF = \frac{1}{\tau_r \cdot s + 1} \quad \tau_r = \frac{1}{K_i \cdot K} \quad B.3$$

Avec  $\tau_r$  est le temps de repense du système corrigé qui doit être suffisamment rapide pour l'application envisagée de la MADA. Nous choisissons un temps de repense en boucle fermé égale à 10 ms, qui est une valeur suffisante pour l'application de la MADA en génératrice éolienne.

## B.2 SYNTHÈSE DU CORRECTEUR DE VITESSE

Le régulateur utilisé pour l'asservissement de la vitesse de la commande direct de vitesse est de type proportionnel intégral, le processus de régulation est présenté sur la figure ci-dessous.

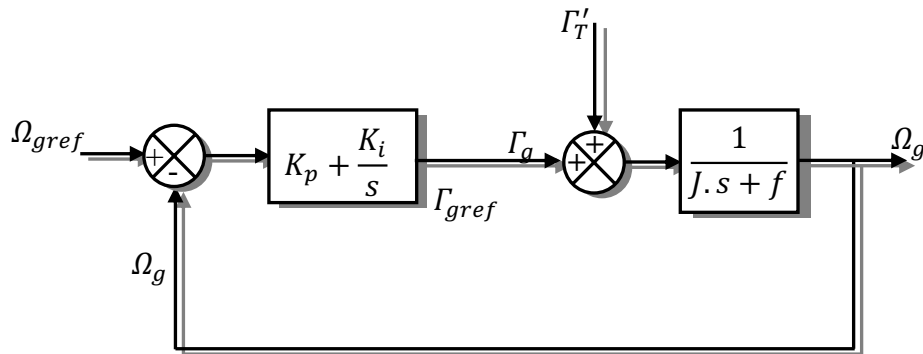


Figure B.2 Schéma bloc de la commande direct de vitesse

Le correcteur considéré a pour expression.

$$\Gamma_g = \left( K_p + \frac{K_i}{s} \right) \cdot (\Omega_{gref} - \Omega_g) \quad B.4$$

$K_p$  et  $K_i$  sont les paramètres du régulateur proportionnel intégral à déterminer.

La fonction de transfert en boucle fermée du processus s'écrit alors :

$$\begin{aligned} \Omega_g &= \left[ \left( K_p + \frac{K_i}{s} \right) (\Omega_{gref} - \Omega_g) + \Gamma_T' \right] \cdot \frac{1}{J \cdot s + f} \\ &= \frac{(J \cdot s + f) \cdot s}{J \cdot s^2 + (K_p + f) \cdot s + K_i} \left[ \frac{K_p \cdot s + K_i}{(J \cdot s + f) \cdot s} \cdot \Omega_{gref} + \frac{1}{J \cdot s + f} \cdot \Gamma_T' \right] \end{aligned} \quad B.5$$

Après simplification, la fonction de transfert prendra la forme :

$$\Omega_g = f(s) \cdot \Omega_{gref} + g(s) \cdot \Gamma_T' \quad B.6$$

Avec :

$$\begin{aligned} f(s) &= \frac{K_p \cdot s + K_i}{J \cdot s^2 + (K_p + f) \cdot s + K_i} \\ g(s) &= \frac{1}{J \cdot s^2 + (K_p + f) \cdot s + K_i} \end{aligned}$$

Dans l'objectif d'atténuer l'action de la perturbation provoquée par le couple éolien  $\Gamma_T'$ , il faut que le paramètre  $K_i$  soit élevé.

La pulsation naturelle et le coefficient d'amortissement sont déterminés par :

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_i}{J}} \quad \text{et} \quad \xi = \frac{f + J + K_p}{K_i} \cdot \frac{\omega_n}{2}$$

ANNEXE C

*Modélisation de la turbine éolienne*

Paramètres de la Machine Asynchrone à Double Alimentation utilisée

$P_N = 1,5 \text{ MW}$  ;

$p = 2$  ;

$f = 50 \text{ Hz}$  ;

Résistance statorique :  $R_s = 0,012 \ \Omega$  ;

Inductance statorique :  $L_s = 0,0137 \text{ H}$  ;

La Mutuelle :  $M = 0,0135 \text{ H}$  ;

Résistance rotorique:  $R_r = 0,021 \ \Omega$  ;

Inductance rotorique :  $L_r = 0,0137 \text{ H}$  ;

La tension du réseau utilisé :  $V = 690 \text{ V}$ .

Paramètres de la turbine éolienne utilisée :

Nombre de pale = 3 ;

Longueur d'une pale :  $R = 60 \text{ m}$  ;

Gain du multiplicateur :  $G = 90$  ;

Inertie  $J = 1000 \text{ Kg.m}^2$ ;

Coefficient de viscosité :  $f = 7.1e-3$  ;

Paramètres de la Machine Asynchrone utilisée pour SISE :

$P_N = 450 \text{ kW}$  ;

$p = 2$  ;

$f = 50 \text{ Hz}$  ;

Résistance statorique :  $R_s = 0,051 \ \Omega$  ;

Inductance statorique :  $L_s = 40,71 \text{ mH}$  ;

La Mutuelle :  $M = 40,1 \text{ mH}$  ;

Résistance rotorique:  $R_r = 0,051 \ \Omega$  ;

Inductance rotorique :  $L_r = 40,71 \text{ mH}$  ;

La tension du réseau utilisé :  $V = 690 \text{ V}$ .

Inertie  $J = 250 \text{ Kg.m}^2$ ;

Coefficient de viscosité :  $B = 0.008$  ;

## ANNEXE D

## Synthèse du Logique Floue

## D.1. DEVELOPPEMENT DU SUPERVISEUR A LOGIQUE FLOUE

La détermination de la puissance de réglage au moyen de la logique floue se réalise en trois étapes: fuzzification, inférence et défuzzification.

## La fuzzification

La fuzzification consiste à définir les fonctions d'appartenance pour les variables d'entrée. On réalise ainsi le passage des grandeurs physiques (grandeurs déterminées) en variables linguistiques (variables flous) qui peuvent être traitées par les inférences. Les variables linguistiques sont définie dans notre cas par:

$$\Omega_v[p.u.] = \frac{\Omega_v}{\Omega_{v_{max}}} \quad \text{et} \quad P_{éol}[p.u.] = \frac{P_{éol}}{P_{éol_{max}}} \quad D.1$$

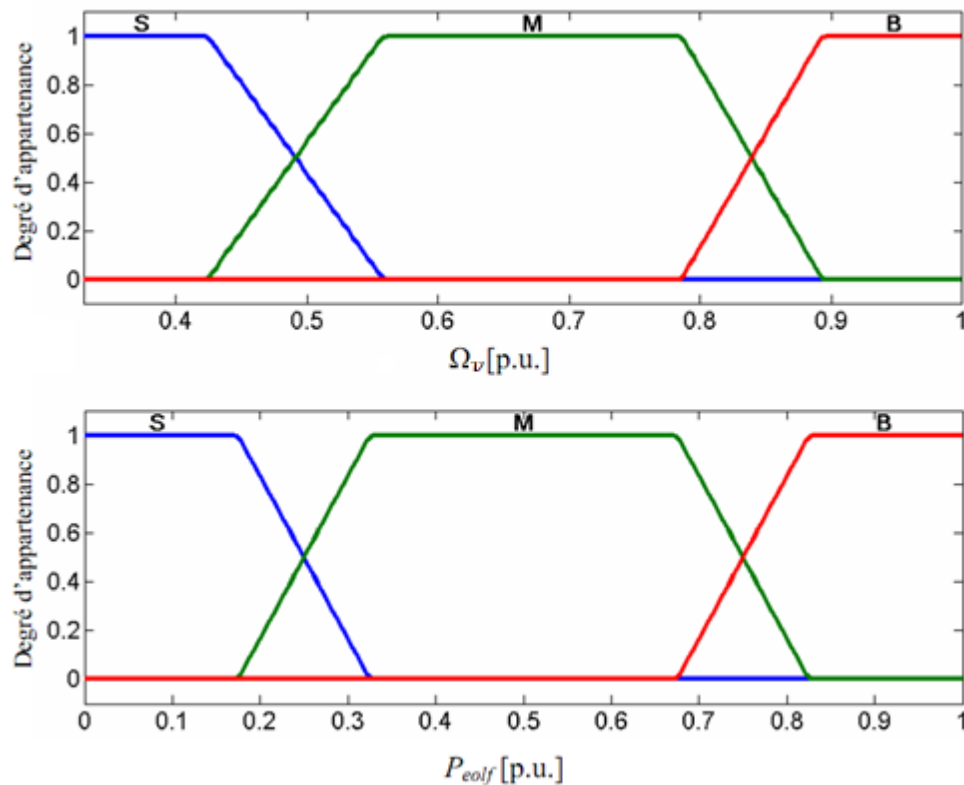


Figure. D.1. Fonctions d'appartenance des variables d'entrée

Les fonctions d'appartenance des variables flous sont représentées sur la figure D.1. On a choisi trois états: grand (B), moyen (M) et petit (S).

**L'inférence**

On détermine les lois d'inférence en partant des trois règles:

- Si la vitesse du volant est trop petite, alors on favorise le stockage. Une plus grande partie de la puissance générée est utilisée pour charger le volant.
- Si la vitesse du volant est trop grande, alors on favorise la génération. Une plus grande partie de la puissance générée est envoyée vers le réseau.
- Si la vitesse du volant est moyenne, alors le système fonctionne normalement. Le réseau reçoit la puissance filtrée,  $P_{éolf}$ .

Le Tableau D.1 synthétise les lois d'inférence.

	$\Omega_v$	Petit(S)	Moyen(M)	Grand(B)
$\Omega_v P_{éolf}$	$P_{rég}$			
Petit(S)		VS	SM	BM
Moyen(M)		S	M	B
Grand(B)		SM	BM	VB

Tableau D.1. Tableau d'inférence

**La défuzzification**

La fonction d'appartenance de la variable de sortie,  $P_{rég}$  [p.u.], est présentée dans la figure D.2. La méthode de défuzzification utilisée est celle de la détermination du centre de gravité de la fonction d'appartenance résultante.

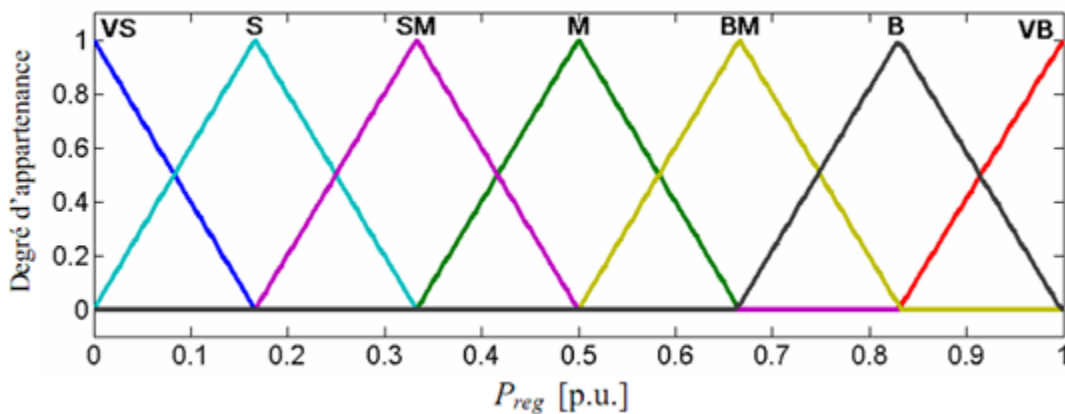


Figure D.2. Fonctions d'appartenance des variables de sortie

**D.2. MPPT PAR LOGIQUE FLOUE**

Suivant le même principe

$$\Omega[p.u.] = \frac{\Omega}{\Omega_{max}} \quad \text{et} \quad P_{\acute{e}ol}[p.u.] = \frac{P_{\acute{e}ol}}{P_{\acute{e}ol,max}} \quad D.2$$

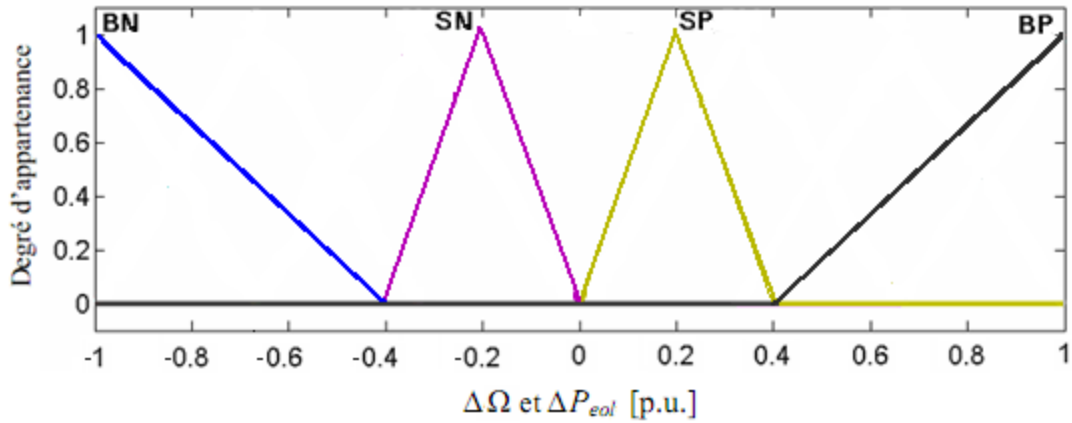


Figure. D.3. Fonctions d'appartenance des variables d'entrée

		$\Delta P_{\acute{e}ol}$	BN	SN	SP	BP
$\Delta\Omega$		$\Delta\Omega$				
	BN		BP	MP	MN	BN
	SN		MP	SP	SN	MN
	SP		MN	SN	SP	MP
	BP		BN	MN	MP	BP

Tableau D.2. Tableau d'inférence

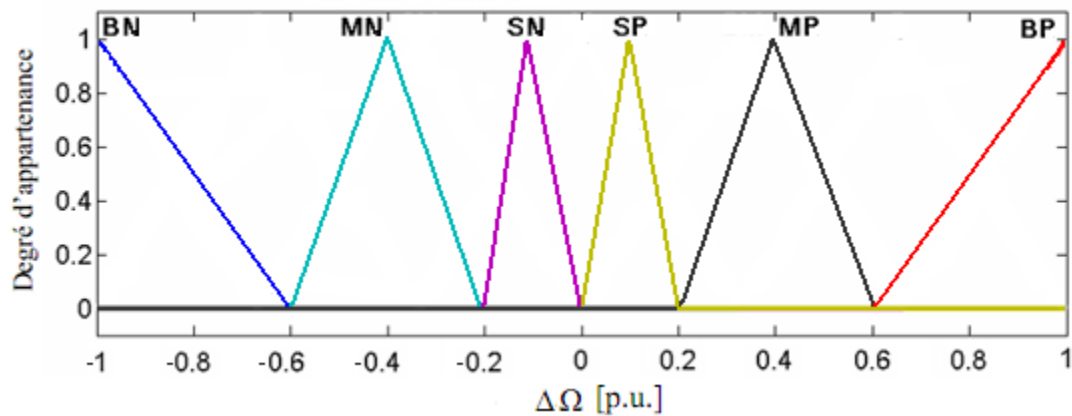
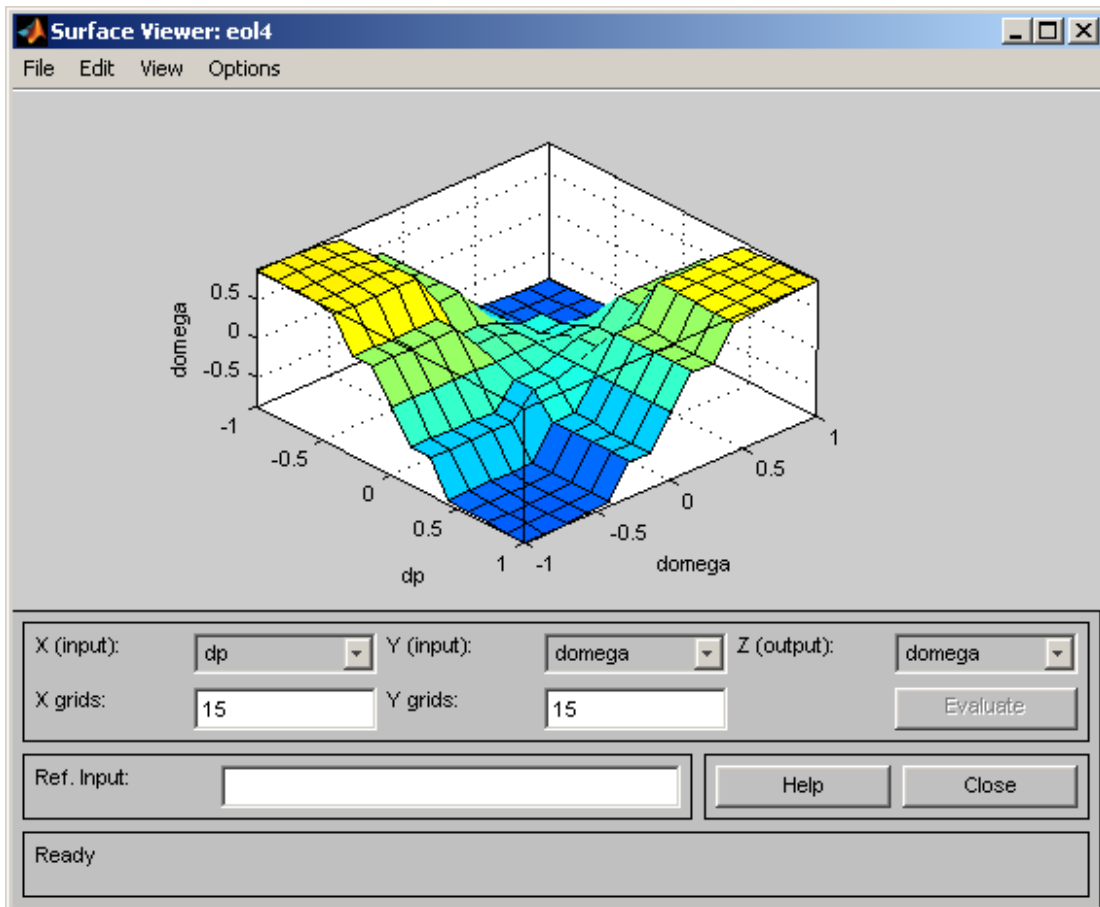


Figure. D.4. Fonctions d'appartenance des variables de sortie

Les lois de commande sont implémenté sur simulink



## ANNEXE E

### *Systèmes de stockages*

#### **E.1. GENERALITES**

##### **E.1.1. Stockage d'énergie**

La notion de stockage d'énergie est impérativement associée à la production d'électricité. Qu'il s'agisse d'une production autonome (site isolé, applications embarquées...) ou d'une production interconnectée au réseau de distribution, l'existence de dispositifs tampons entre production et consommation est indispensable.

L'électricité ne peut être stockée facilement et nécessite sa transformation sous une autre forme d'énergie. Le stockage de l'énergie électrique constitue une des composantes d'un futur développement durable .

Le stockage de l'électricité passe le plus souvent par une forme intermédiaire (gravitaire, de compression, chimique, cinétique, thermique, potentielle, mécanique...) [LEC04]. Parmi toutes ces formes, on distingue deux types de stockage d'énergie :

- le stockage de type capacitif (condensateur électrique, réservoir hydraulique ou pneumatique, ressort, accumulateur de chaleur...) où l'énergie stockée est de type potentielle,
- le stockage d'énergie de type inertiel (inductance électrique, fluide en mouvement, masse en rotation, masse en translation...) où l'énergie stockée est de type cinétique.

##### **E.1.2. Stockage d'énergie associés à une éolienne**

Nous allons nous intéresser ici aux modes de stockage qui peuvent être associés à une éolienne. Le but est double: stocker de l'énergie électrique dans les périodes de fort vent pour pouvoir la restituer dans les périodes de vent plus faible et lisser au maximum la puissance produite par l'ensemble éolienne plus stockage. Le stockage se fait le plus souvent sous une forme autre que l'énergie électrique et demande donc des conversions énergétiques. Le rendement global du stockage est donc très variable en fonction des procédés choisis.

Il existe différents modes de stockages dont les caractéristiques sont très différentes et complémentaires. Nous allons les présenter rapidement et rappeler leurs principales caractéristiques.

Il apparaît donc deux types de stockage, l'un à court terme et l'autre à long terme. Ils mettent en œuvre des méthodologies et des contrôles différents.

##### ***E.1.2.1. Stockage à court terme***

Les systèmes de stockage à court terme permettent de transférer rapidement des puissances élevées sur des durées pouvant aller de la seconde à la dizaine de minutes. On trouve principalement des systèmes à stockage inertiel mais le développement récent de nouveaux composants tels que les super-capacités permet d'envisager des solutions de stockages électrochimiques [ABB05].

##### **Stockage d'énergie magnétique dans des bobinages supraconducteurs (SMES)**

L'énergie peut être stockée sous forme d'énergie d'un champ magnétique créé par un courant circulant dans une bobine supraconductrice. Pour maintenir la bobine dans l'état supraconducteur, il faut l'introduire dans un cryostat



rempli d'hélium liquide. Ces systèmes ont l'avantage d'une dynamique et d'une cyclabilité très élevées. Cependant, les coûts de fabrication et de maintenance sont très élevés et il y en a très peu de SMESs (d'après l'abréviation en anglais) en fonction. Même si les recherches envisagent des SMESs de l'ordre de 10 - 100 MW, les systèmes disponibles actuellement sont compris entre 1 et 10 MW.

### **Stockage d'énergie électrique dans des super-condensateurs**

Les super capacités ont elles aussi un grand intérêt pour le lissage des fluctuations de puissance de par leur dynamique plus rapide que celle des batteries.

C'est la seule technologie où l'on peut parler vraiment du stockage d'électricité. Cependant, c'est une technique bien nouvelle qui se trouve encore en phase de recherche. En présent, on trouve fréquemment des super-condensateurs dans les produits électroménagers, mais leurs puissances ne dépassent pas les 7 - 10 W. Les recherches actuelles ont pour but l'obtention de super-condensateurs dont la puissance soit de l'ordre de dizaines ou même de centaines de KW, afin d'être utilisés dans des véhicules électriques.

Leurs capacité augmente et l'on trouve désormais des super capacités de 1800F, utilisées en association avec un convertisseur alternatif/continu permettant l'échange avec le réseau.

### **Stockage d'énergie cinétique dans une masse tournante appelée volant d'inertie**

Les systèmes inertiels de stockage d'énergie (SISE) ont été redécouverts depuis quelques années.

Un SISE comporte un volant d'inertie couplé à une machine électrique pouvant fonctionner dans deux régimes: moteur ou générateur. Les SISEs ont des constantes de temps de quelques minutes jusqu'à plusieurs heures, en fonction de leur conception.

Les SISEs ont trouvé une application spécifique dans le domaine d'amélioration de la qualité de l'énergie électrique, pour maintenir la fréquence et la tension du réseau dans les limites imposées par les règlements. En raison de leur dynamique élevée, de leur bon rendement et de leur longue période de vie, les SISEs sont bien adaptés pour stocker l'énergie pendant des périodes courtes, ce qui suffit pour améliorer la qualité de l'énergie [HEB02] et [LAW03]. Dans [BAR04], une analyse est faite sur la capacité du stockage à augmenter la pénétration des éoliennes dans le réseau. L'article montre que le plus rentable système de stockage est le SISE, si la période de stockage ne dépasse pas 10 min. De plus, il est montré que l'association d'un SISE de 300 kW à une éolienne de 1 MW peut augmenter le revenu.

Les systèmes inertiels sont eux aussi en grande évolution avec l'utilisation de machines rapides. Effectivement, le stockage qui s'effectuait classiquement dans de très lourds volants d'inertie tournant à 3000tr/min accouplés à des machines classiques, s'effectue désormais à très grande vitesse avec des machines complexes comportant plusieurs rotors concentriques à des vitesses différentes.

L'alimentation se fait par de l'électronique de puissance permettant d'obtenir de plus grandes puissances et de stocker encore plus d'énergie. Il est désormais possible de stocker et restituer une puissance de plusieurs dizaines de KW pendant plus de dix minutes. Ces systèmes permettent donc de lisser la puissance fluctuante du vent.

### ***E.2.2.2 Stockage à long terme***

Pour ce qui est des systèmes de stockage à long terme, on connaît bien les batteries et l'on voit se développer des systèmes complexes tels que les systèmes à air comprimé ou encore l'électrolyse associée à une pile à combustible.

#### **Stockage d'énergie sous forme d'énergie potentielle de l'eau**

Nommée aussi *stockage par pompage hydraulique*, est une méthode utilisée depuis 1929, étant la plus vieille technologie de stockage d'énergie dans les centrales. En effet, jusqu'à 1970, c'était la seule option disponible sur le marché pour stocker de grandes quantités d'énergie. Un tel système comporte deux grands réservoirs situés à des hauteurs différentes. L'eau est pompée du réservoir inférieur au réservoir supérieur, où elle est stockée. En fonction de la demande, l'eau peut revenir au réservoir inférieur, mais en traversant une ou plusieurs turbines hydrauliques transformant l'énergie potentielle de l'eau en énergie mécanique. Ensuite, des générateurs entraînés par les turbines transforment l'énergie mécanique en énergie électrique. De tels systèmes peuvent fournir jusqu'à 1000 MW, mais ils sont conditionnés par les contraintes géographiques, géologiques, environnementales et le coût assez élevé de leur construction.

#### **Stockage d'énergie sous forme d'énergie chimique**

Le stockage d'énergie sous forme chimique dans les batteries électrochimiques est de loin la technique la plus répandue pour le stockage de l'énergie électrique. En fonction du type de batterie, différentes réactions chimiques sont provoquées en utilisant l'énergie électrique et en la stockant sous forme d'énergie chimique. En fonction de la demande, des réactions chimiques inversées produisent de l'électricité. Le premier et le plus utilisé sur le marché a été l'accumulateur au plomb dont plusieurs améliorations le rendent encore compétitif sur le marché. Etant disponibles sur une plage de puissance très étendue (quelques watts jusqu'aux modules de quelques MW), les batteries électrochimiques peuvent être utilisées dans une large variété d'applications. En 1994, un système d'accumulateurs chimiques capable de fournir 20 MW sur 40 minutes a été installé à Puerto Rico pour améliorer le contrôle de la fréquence et de la tension du réseau électrique [BUT95]. Un autre exemple de grande taille, constitué d'un accumulateur électrochimique pouvant fournir 40 MW sur 7 minutes (ou 27 MW durant 15 minutes), a été installé en Alaska en 2003 afin de soutenir le réseau électrique [REE03].

Les batteries ont évolué durant cette dernière décennie et offrent désormais des capacités volumiques et massiques très importantes notamment avec les dernières générations du type lithium polymère. Elles permettent aussi des fonctionnements en cyclage sans grande contrainte avec des chargeurs optimisant leur durée de vie.

#### **Stockage d'énergie sous forme d'énergie potentielle de l'air comprimé**

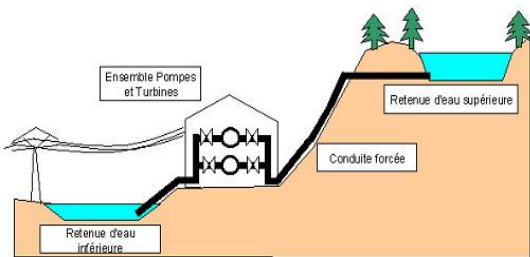
Le stockage d'énergie sous forme d'énergie potentielle de l'air comprimé (CAES, d'après le nom anglais: Compressed-Air Energy Storage) constitue une autre alternative, apparue un peu plus tard. Cette technologie de stockage comporte un grand réservoir souterrain, bien étanche, où l'on peut stocker de l'air comprimé. En fonction de la demande, l'air comprimé est délivré à une turbine à gaz entraînant un générateur électrique. Ainsi, l'énergie potentielle de l'air comprimé est transformée en énergie électrique. Le premier CAES commercial a été réalisé en Allemagne à Hundorf, en 1978, et peut fournir 290 MW. Comme pour le stockage hydraulique, la construction des CAES est conditionnée aux contraintes géographiques et géologiques. Toutefois, il y a déjà plusieurs CAES

ANNEXE

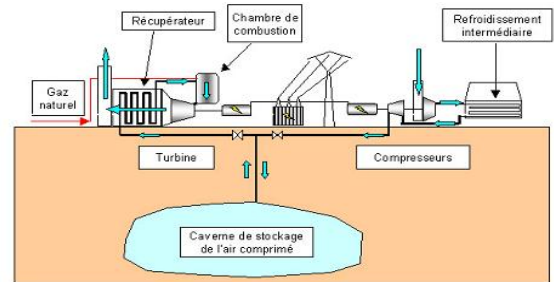
construits utilisant d'anciennes mines de charbon ou de sel, de vieux puits de pétrole et des cavernes souterraines étanches.

Les systèmes à air comprimé utilisent différents procédés afin de stocker et restituer l'énergie en utilisant ou non l'énergie d'échauffement que la compression procure. De plus, un compresseur est utilisé pour le stockage et une turbine associée à une génératrice pour le déstockage.

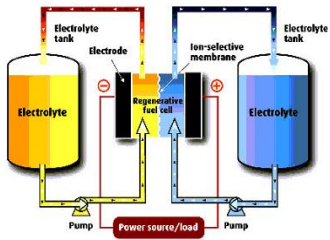
Pour ce qui est des systèmes à air comprimé ou électrolyse, ils sont encore en développement et le rendement global pour la restitution est relativement faible. Par contre, ils permettent d'obtenir des capacités importantes à moindre frais car le stockage se fait dans des réservoirs qui peuvent être dimensionnés en fonction de l'énergie que l'on veut stocker. [BOY06]



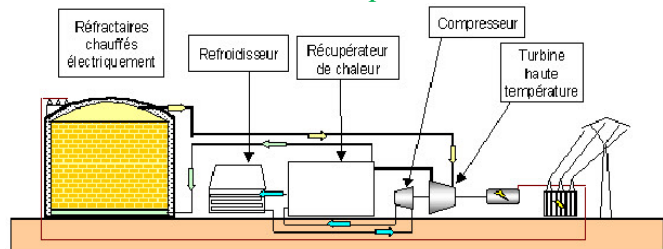
Hydraulique gravitaire



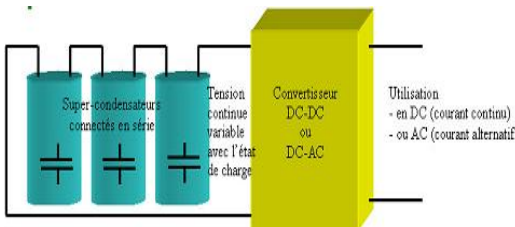
Electrochimique à circulation



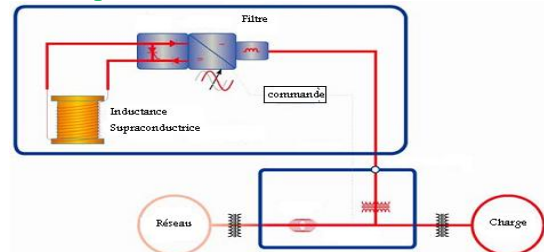
Air comprimé en caverne



Thermique à réfractaires et turbine



Supercondensateurs

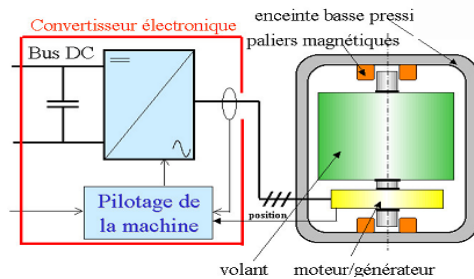


Inductances supraconductrices



- Pb-acide
- NiCd, NiMH
- Li
- Métal-air

Electrochimiques



Volants d'inertie

Figure E.1 – Type de stockage [BER03]

Les systèmes utilisant un électrolyseur pour le stockage d'énergie sous forme d'hydrogène et la restitution d'énergie à l'aide d'une pile à combustible sont aussi à l'étude.

Il existe donc plusieurs solutions pour le stockage. Elles peuvent être associées afin d'obtenir une unité permettant simultanément de lisser les fluctuations de puissance (court terme) et d'atténuer les effets des périodes de faible ou

forte production (long terme). En tous cas, il ne faut pas écarter un système de stockage associé à l'éolien à cause de son faible rendement global car les pertes dans les systèmes de conversion peuvent globalement ne pas être si pénalisantes si cela nous permet de maintenir constante la production en permanence.

Dans le cadre d'une production décentralisée à partir d'énergies renouvelables, on peut envisager un stockage pour assurer un secours ou pour une régulation locale des flux d'énergie. Ainsi, le volant d'inertie est particulièrement bien adapté pour la production par énergies renouvelables qui nécessite, dans le cas de l'éolien, une capacité de stockage de quelques minutes. Ceci permettrait, par exemple, de démarrer des groupes de production auxiliaires au cas d'absence de vent durant le temps de déchargement des systèmes de stockage constituant ainsi une "réserve tournante" pour des réseaux insulaire ou le taux de pénétration de l'éolien est important. Pour des capacités de stockage moindre, le volant d'inertie trouvera ainsi sa place lorsqu'il s'agira de lisser la puissance de charges fluctuantes

## E.2. Les modes de stockage de l'énergie - Éléments de comparaison

Tout système de stockage d'énergie est caractérisé principalement par les critères suivants :

- la puissance massique (en W/kg)
- l'énergie massique (en Wh/kg)
- le nombre de cycles de fonctionnement
- le coût (en euros/Wh)
- le rendement énergétique

Les accumulateurs électrochimiques se distinguent par une bonne énergie massique (voir tableau). Pour des utilisations dont la charge est très peu fluctuante, ils restent donc majoritaires sur le marché malgré un nombre de cycles limité (alimentations de secours, véhicules électriques...). En revanche, lorsque le mode de fonctionnement est de nature impulsionnelle avec des temps de charge et de décharge inférieurs à la minute, leur rendement devient très mauvais avec une forte réduction de la cyclabilité. D'autres moyens peuvent les remplacer avantageusement ou leur sont complémentaires, ce sont les capacités, les supercapacités, les inductances pour les temps de charge et de décharge très courts et les volants d'inertie susceptibles de combler le créneau laissé libre entre les batteries électrochimiques et les supercapacités.

performances	accumulateurs électrochimiques				inertiel	inductif	condensa- teurs	Super capacités
	Pb-acide	Ni-Cd	LiC	NaS				
W.h/kg	30	50	150	120	25	4	0,25	5.5
W/kg crête	80	200	200	150	2000	28 106	qq 104	500 à 21
densité	2.4	2	2.6	1.1	2	2.1	1.39	2
cyclabilité	500 à 80% de PdD	1500	1000	100	très élevé	très élevé	très élevé	élevé
maturité industrielle	oui	oui	oui: petits accu	débuts	non	oui : supra BT	oui	oui: Petit accu
temps minimal de décharge	15mn	15mn	45 mn	45 mn	1 mn	< 1 ms	«1 ms	10 s
durée de stockage	> 1 mois	1 mois	> 1 an	qq jours	qq mn	>1h	qq s	qq mn

## Bibliographie

- [1] [ENE]. (<http://www.energies-renouvelables.org>).
- [2] [IUL08] Iulian Munteanu , Antoneta Iuliana Bratcu ,Nicolaos-Antonio Cutululis Emil Ceangă « Optimal control of Wind Energy Systems» Springer, 2008.
- [3] [DAV07] Arnaud DAVIGNY « Participation aux services système de fermes d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie » Thèse de doctorat ,Ecole Centrale, Lille : 2007, 243 p.
- [4] [VEC05] Ionel VECHIU « Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome » HAVRE 2005, 214 p.
- [5] [GOU82] Désiré Le Gourières, « Energie Eolienne. Théorie, conception et calcul pratique des installations », deuxième édition, EYROLLES Paris 1982.
- [6] [SPE98] D. Spera, «Wind Turbine Technology – Fundamental Concepts of Wind Turbine Technology», ASME Press, New York, 1998.
- [7] [HEI00] S. Heier , «Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems», John Wiley & Sons LTD, 2000.
- [8] [VEC02] I. Vechiu, “L'optimisation de la récupération de l'énergie éolienne. Simulation en temps réel d'une turbine éolienne sous l'environnement Matlab», DEA d'Electronique, Université du Havre, 2002.
- [9] [ADB00] E. S. Adbin et W. Xu – « Control design and dynamic performance analysis of a wind turbine-induction generator unit », IEEE Transactions on Energy Conversion vol. 15(2000), no. 1.
- [10] [SLO03] J. Slootweg, S. de Haan, H. Polinder etW. Kling – «General model for representing variable speed wind turbines in power system dynamics simulations », IEEE Transactions on Power Systems vol. 18 (2003), no. 1.
- [11] [STR 95] G. Stravarakakis et G. Kariniotakis – « A general simulation algorithm for the accurate assesement of islated diesel - wind turbines systems interaction », IEEE Transactions on Energy Conversion vol. 10 (1995), no. 3.
- [12] [HAU06] E. HAU. « Wind turbines ». 2nd Ed Springer, 2006.
- [13] [PET01] T. Petru, «Modelling of Wind Turbines for Power System Studies»,Technical report Chalmers University of Technology, No. 391L, 2001.
- [14] [PAP01] S. A. Papathanassiou, N. G. Boulaxis, M. P. Papadopoulos, «A Simulation Code for Power Systems with High Wind Penetration», European Wind Energy Conference Proceedings, Copenhagen, 2001.
- [15] [CAM03] H. Camblong, «Minimisation de l'Impact des Perturbations d'Origine Eolienne dans la Génération d'Electricité par des Aérogénérateurs à Vitesse Variable», Thèse de doctorat, ENSAM Bordeaux, 2003,274 p.
- [16] [SON00] Y. D. Song, B. Dhinakaran, X. Y. Bao, «Variable Speed Control of Wind Turbine Using Nonlinear and Adaptative Algorithms», Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, pp. 293-308, 2000.
- [17] [ROG04] V. Rogez, «Modélisation Simplifiée de Sources de Production Décentralisée pour des Etudes de Dynamique des Réseaux. Application à l'Intégration d'une Production Eolienne dans un Réseau de Distribution Insulaire», Thèse de doctorat, Ecole Doctorale d'Arras, Lille, 2004,208 p.
- [18] [LEC01] P. Leconte, M. Rapin et E. SZECHENYI – « Eoliennes », Techniques de l'ingénieur, vol. BM 4640, 2001.
- [19] [MAR] J. Martin – « Energies éoliennes », Techniques de l'ingénieur, vol. B 8585.

- [20] [ELA04] El Aimani, Salma, « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension ». Thèse de doctorat, Ecole Centrale, Lille : 2004, 225 p.
- [21] [ELM06] Mostafa, El Mokadem, «Modélisation et simulation d'un système hybride pour un site isolé. Problématique liée aux fluctuations et variations d'énergie au point de couplage». Thèse de doctorat, Université du Havre : 2006, 131 p.
- [22] [ACK05] Thomas Ackermann « Wind Power in Power Systems», John Wiley & Sons, 2005.
- [23] [BOY06] A .BOYETTE, « Contrôle - commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne », Thèse de doctorat, Université Henri, Nancy 1, 2006, 136 p.
- [24] [ELA03] S. El Aimani, B. Francois, F. Minne, B. Robyns, «Modelling and Simulation of Doubly Fed Induction Generators For Variable Speed Wind Turbines integrated in a Distribution Network», EPE 2003 - Toulouse.
- [25] [EFT06] Eftichios Koutroulis and Kostas Kalaitzakis, «Design of a Maximum Power Tracking System for Wind-Energy-Conversion Applications», IEEE Transactions On Industrial Electronics, VOL. 53, NO. 2, April 2006.
- [26] [HOF01] Hofmann, W., Okafor, F., «Doubly-Fed Full-Controlled Induction Wind Generator for Optimal Power Utilisation», PEDS'01 Conference Proceedings.
- [27] [CHR02] Christian Bouly, David Defois, Jerome Faucillon, Frederic Billon, «Slow rotating small wind turbine for proximity applications criteria of design, expected performances, technology and applications», Maroc FIER2002.
- [28] [ARN ] S. Arnaltes, «Comparison of Variable Speed Wind Turbine Control Strategies», Department of Electrical Engineering Escuela Politécnica Superior, Universidad Carlos III de Madrid.
- [29] [MUK99] Mukund R.Patel, «Wind and Solar Power Systems», CRC Press, 1999.
- [30] [SAE01] J.R. Saenz, A. Tapia, G. Tapia, X. Ostolaza, I. Albizu, F. Pérez-Hidalgo, M. Irizar, «Reactive Power Regulation in Wind Farms: Control Strategies», EPE 2001 - Graz.
- [31] [MIT91] Mitsutochi Yamamoto, Osamu Motoyoshi «Active and reactive power control for doubly-fed wound rotor induction generator», IEEE transaction on power electronic vol 6 no 4 oct 1991.
- [32] [LIE06 ] Lie Xu and Phillip Cartwright, «Direct Active and Reactive Power Control of DFIG for Wind Energy Generation», IEEE Transactions On Energy Conversion, VOL.21, NO.3, 2006
- [33] [ZHA04] Zhang Xin-fang, LIU Yi-bing, «Predictive Functional Control Of a Doubly Fed Induction Generator for Variable Wind turbines», department of automation north china electrical power university, IEEE2004 China.
- [34] [BLA05] Black, M.; Silva, V.; Strbac, G., «The Role of Storage in Integrating Wind Energy», International Conference on Future Power Systems, Nov 2005, pp. 1 6.
- [35] [BAR04] Barton, J.P.; Infield, D.G., «Energy storage and its use with intermittent renewable energy», IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol 19, Issue 2, June 2004 Page(s):441 - 448.
- [36] [ZUN03] S. Zunft, R. Tmme, U. Hartwing, A. Ternedde, «thermal energy storage technologies for advanced adiabatic compressed air energy storages (AA-CAES) », STORE conference, aix en provence, octobre 2003.

- [37] [ALL03] T. Alleau, «Electrolysis, hydrogen storage and fuel cell as a complete storage system for res application», STORE conference, aix en provence, octobre 2003.
- [38] [ZHO09] Tao ZHOU « Commande et Supervision Energétique d'un Générateur Hybride Actif Eolien incluant du Stockage sous forme d'Hydrogène et des Super-Condensateurs pour l'Intégration dans le Système Electrique d'un Micro Réseau » 2009, 236p.
- [39] [SAG98] C. Saget, « La variation électronique de vitesse au service de la production d'énergie électrique par éolienne », REE, n°7, Juillet 1998, pp. 42-48.
- [40] [LUB03] Z. Lubosny, « Wind turbine operation in electric power systems », Ed Springer, 2003.
- [41] [WAN99] Q. Wang, L. Chang, « An independent maximum power extraction strategy for wind energy conversion systems», Proceedings of the 1999 IEEE Canadian conference on electrical and computer engineering, Edmonton, 1999.
- [42] [DAT03] R. Datta, VT. Ranganathan, « A Method of Tracking the Peak Power Points for a Variable Speed Wind Energy Conversion System», IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 18, no. 1, 2003.
- [43] [SIM97] MG. Simoes, BK. Bose, RJ. Spiegel, « Design and performance evaluation of a fuzzy logic based on variable speed wind generation system», IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 33, no. 4, 1997
- [44] [CHE00] Z. Chen, SA. Gomez, M.McCormick, « A fuzzy logic controlled power electronic system for variable speed wind energy conversion systems», Power Electronics and Variable Speed Drives, 2000
- [45] [LAV05] N. LAVERDURE, « Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires ». Thèse doctorat, Institut National Polytechnique De Grenoble, 2005, 225 p.
- [46] [ELA03] S. El Aimani, B. François, F. Minne, B. Robyns, « Comparison analysis of control structures for variable speed wind turbine », Proceedings of CESA 2003, Lille, France.
- [47] [MUL01] E. Muljadi, «Pitch-Controlled Variable-Speed Wind Turbine Generation», IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 37, No 1, Jan./Feb. 2001.
- [48] [MUL03] B. Multon, G. Robin, O. Gergaud, H. Ben Ahmed, « Le génie électrique dans le vent : état de l'art et recherche dans le domaine de la génération éolienne », Actes des journées de jeunes chercheurs en génie électrique, 5-6 juin 2003, Saint-Nazaire, pp. 287-297.
- [49] [POP04] L. Mihet-Popa, Frede Blaabjerg, I. Boldea, «Wind Turbine Generator Modeling and Simulation Where Rotational Speed is the Controlled Variable», IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 40, No. 1, January/ February 2004.
- [50] [KOD01] H. Kodama, T. Matsuzaka, S. Yamada , « Modeling and Analysis of the NEDO 500-kW Wind Generator », Electrical Engineering in Japan, 2001, Vol. 135(3), pp. 37-47.
- [51] [SLO03] J. G. Slootweg, S. W. De Haan, H. Polinder, W. L. Kling, « General model for representing variable speed wind turbines in power system dynamics simulations », IEEE Transactions on Power Systems, Vol.18, No. 1, February 2003.
- [52] [HAN99] M.M. Hand, « Variable Speed wind turbine controller systematic design methodology: A comparison of non-linear and linear model based designs », Master, University of Colorado 1999.
- [53] [CHA83] J. CHATELAIN, « Machines électriques tournantes ». Edition Dunod, tome1, 1983.

- [54] [MAH99] Mo. Mahmoudi, « Sur la commande de la MAS alimentée en tension. Etude de l'étage d'alimentation de la MAS ; Commande par mode de glissement avec orientation du champ », Thèse de Doctorat d'état en G-Electrique, ENP, 1999.
- [55] [MAR07] MERRAHI Farid, « Alimentation et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (Application à l'Energie Eolienne) » mémoire de magistère, ENP, 2007
- [56] [BER 95] E. M. Berkouk, «Contribution to the Drive of the Single Phase and Three-Phase Induction Machines Fed by Direct and Indirect Converters. Application to The AC Regulators and Multilevel Inverters»,PHD Thèse CNAM, France, 1995, pp.1-265.
- [57] [LEC04] L. Leclercq, « Apport de stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes », Thèse de doctorat de Lille, 2004, 171 p.
- [58] [ABB05] Abbey, C.; Joos, G., «Short-term energy storage for wind energy applications», Industry Applications Conference, 2005. Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005, Vol 3, 2-6 Oct. 2005, pp. 2035 - 2042.
- [59] [BUT95] P.C. Butler, « Battery Energy Storage for Utility Applications: Phase I – Opportunities Analysis », Report SAND95-2605, Sandia National Laboratories, novembre 1995.
- [60] [REE03] «Accumulateur : 40 MW pendant 7 minutes», Revue de l'Electricité et de l'Electronique – REE, n°10, novembre 2003, pp.8.
- [61] [BER03] Bernard MULTON, Gael ROBIN, Hamid BEN HAMED, Olivier GERGAUD, Nicolas BERNARD « Le stockage associe la production d'électricité en réseau» GdR ME2MS Production d'électricité décentralisée, 16-17 octobre 2003
- [62] [HEB02] R. Hebner, J. Beno, A. Walls, « Flywheel batteries come around again», IEEE Spectrum, April 2002, pp. 46 – 51.
- [63] [LAW03] R. G. Lawrence, K. L. Craven, G. D. Nichols, « Flywheel UPS », IEEE Industry Application Magazine, May – June 2003, pp. 44 – 50.
- [64] [EUR01] EUR 19978 Brochure: « Energy Storage - A Key Technology for Decentralized Power, Power Quality and Clean Transport», Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 2001,
- [65] [RUD03] A. Ruddell, « Investigation on Storage Technologies for Intermittent Renewable Energies: Evaluation and recommended R&D strategy», INVESTIRE-NETWORK, Storage Technology Report: WP-ST6 Flywheel, 2003.
- [66] [LEC02] L. Leclercq, B. Robyns, J.M. Grave, « Fuzzy logic based supervisor of a flywheel energy storage system associated with wind and diesel generators », OPTIM 2002, Brasov, Romania, May 2002, vol. II, pp. 441-446.
- [67] [LEC03] L. Leclercq, B. Robyns, J.-M. Grave, « Control based on fuzzy logic of a flywheel energy storage system associated with wind and diesel generators », Mathematics and Computers in Simulation, vol.63, issue 3-5, 2003, pp. 271-280.



**ملخص:** لقد قمنا بدراسة نموذج و محاكات نظام تحويل طاقة الرياح التي تسمح بضمنان ثبات الطاقة بالإستعانة بمحرك لا تزامني ثنائي التغذية و وحدة تخزين الطاقة. هذا المولد الهوائي يمول الشبكة الكهربائية بقدرة فعالة ثابتة مهما كانت حالة الرياح. الجزء الميكانيكي شرح بعناية، العنفة متغيرة الزاوية مستعملة لكي نحصل على القدرة المستخرجة القصوى. ثم التحكم المباشر و الغير مباشر للمحرك. تجميع البطاريات أو أنواع أخرى من نظم التخزين على وصلة التيار المستمر يسمح بالتخزين المؤقت للطاقة. شرح التحكم بالمجموعة مع البحث عن نقطة العمل ذات القدرة القصوى. نتائج المحاكات سمحت بتأكيد الدراسة هذا النظام يسهل إندماج المولد الهوائي في الشبكة الكهربائية لأن مسير الشبكة يستطيع الحصول على قدرة ثابتة.

**كلمات مفتاحية:** نموذج ، محرك لا تزامني ثنائي التغذية، نظام التخزين، عنفة الرياح ،قدرة ثابتة.

**Résumé :** cette mémoire traite de l'étude, la modélisation et la simulation d'un système de conversion d'énergie éolienne, permettant de fournir au réseau une puissance constante, basé sur une machine asynchrone à double alimentation (MADA) et une unité de stockage d'énergie. cette éolienne à axe horizontal fournie au réseau une puissance active constante quelles que soient les conditions de vent. Une hélice à angle de calage variable est utilisée pour maximiser la puissance extraite.

Ensuite, la modélisation, le contrôle direct et le contrôle indirect de la MADA sont présentés. Un contrôle indépendant des puissances active et réactive est utilisé. L'association de batterie ou autre système de stockage sur le bus continu permet de stocker temporairement de l'énergie. La commande de l'ensemble avec la recherche du point de fonctionnement à puissance maximale (MPPT) est expliquée. Des résultats de simulations permettent de valider l'étude. Ce système facilite l'intégration des éoliennes dans le réseau de distribution car le gestionnaire du réseau peut avoir une puissance constante.

**Mots-clés :** modélisation, machine asynchrone à double alimentation, stockage, éolienne, puissance constante ,services systèmes.

**Abstract :** This thesis deals with design, analysis and simulation of a constant grid power wind energy conversion system based on electrical energy storage and indirectly controlled doubly fed induction generator (DFIG). This horizontal axis wind turbine system generates a constant active power through the grid under all wind conditions. The modelling of the mechanical part of the turbine is particularly detailed, a variable blade pitch wind turbine is used for maximal power extraction. Then, modelling, direct control and indirect control of the DFIG are presented. Independent control of active and reactive powers are achieved. The incorporation of a battery or other energy storage device in DC link enables temporary electrical energy storage. The Maximum Power Point Tracking (MPPT) control of this unit is also discussed. Simulation results validate the study. This system facilitates the integration of the wind turbine in the distribution network because the manager of the grid can have a constant active power.

**Key-Words :** modelling, doubly fed induction machine, storage, wind turbine.