

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR ANNABA-UNIVERSITY  
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA



جامعة باجي مختار عنابة

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIORAT  
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

## MEMOIRE

PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER

### INTITULE

**MODELISATION ET COMMANDE DE LA  
GENERATRICE ASYNCHRONE A DOUBLE  
ALIMENTATION (Application à l'énergie éolienne)**

**DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE**

**FILIERE : GENIE MECANIQUE**

**SPECIALITE : MECATRONIQUE**

**PRESENTE PAR : HAMDI ILYES**

**DIRECTEUR DU MEMOIRE : TADJINE KAMEL Dr**

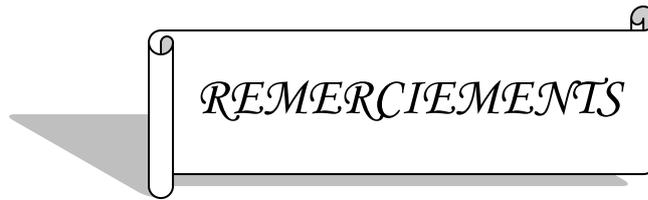
### DEVANT LE JURY

**PRESIDENT : A. BOUCHELAGHEM**      Grade :      Pr      UNIVERSITE ANNABA

**EXAMINATEURS :**

- L. LAOUAR      Grade :      Pr      UNIVERSITE ANNABA  
- A. ABDERRAHMANE      Grade :      MC-A      UNIVERSITE ANNABA  
- R. BOURENANE      Grade :      MC-A      UNIVERSITE ANNABA  
- B. BOUZITOUNA      Grade :      MA-A      UNIVERSITE ANNABA

**Année : 2012/2013**



## REMERCIEMENTS

*Nous tenons à remercier tout premièrement Dieu le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a donné durant toutes ces longues années.*

*Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur Mr. TADJINE pour avoir d'abord proposée ce thème, pour suivi continuel tout le long de la réalisation de ce mémoire et qui n'a pas cessée de nous donner ses conseils.*

*Nous tenons à remercier vivement toutes personnes qui nous ont aidé à élaborer et réaliser ce mémoire, ainsi à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin à accomplir ce travail.*

*Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants et le chef de département MECANIQUE qui a contribué à notre formation par ailleurs, Nos remerciements à tous les membres du jury qui ont accepté de juger notre travail.*

*En fin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos amis et collègues pour le soutien moral et matériel*

## *DEDICACE*

*Je dédie ce modeste travail:*

*A ceux qui sont les plus chers du monde, Mes parents*

*Ames chères frères et sœurs*

*A toute la famille HAMDI*

*A tous mes amis sans exception*

---

---

# **SOMMAIRE**

<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>1</b>
------------------------------------	----------

## **CHAPITRE I**

### **ETAT DE L'ART DE L'ENERGIE EOLIENNE**

1. Introduction .....	3
2. Ressources primaires de la production d'électricité au niveau mondial .....	3
3. Données générales .....	4
3.1. La production d'énergie électrique à partir des éoliennes .....	4
3.2. Croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne .....	5
3.3. Avantages et désavantages de l'énergie éolienne .....	7
3.3.1. Les avantages .....	7
3.3.2. Les désavantages .....	8
4. Spécificités liées à la technologie des aérogénérateurs .....	8
4.1. Constitution d'un aérogénérateur .....	8
4.2. Types des machines électriques .....	10
5. Autres caractéristiques .....	15
5.1. Système isolé ou connecté .....	15
5.2. Nombre des pales .....	15
5.3. Axe horizontal ou vertical .....	16
6. Système de génération étudié dans ce mémoire .....	17
7. Machine asynchrone à double alimentation .....	17
7. Bilan énergétique .....	18
8. Conclusion .....	20

---

---

## CHAPITRE II

### MODELISATION DE LA TURBINE

1. Introduction .....	21
2. Description de l'éolienne .....	21
2.1. Les éoliennes a vitesse fixe .....	23
2.2. Les éoliennes à vitesse variable .....	23
a – Principe .....	23
b - Intérêt de la vitesse variable .....	25
3. Modélisation des éoliennes .....	25
3.1. Modèle du multiplicateur .....	27
3.2. Equation dynamique de l'arbre .....	27
3.3. Schéma bloc du modèle de la turbine .....	28
4. Stratégies de commande de la turbine éolienne .....	29
5. Techniques d'extraction du maximum de la puissance .....	29
5.1. Bilan des puissances .....	29
5.2 Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse .....	30
6. Système d'orientation des pales .....	33
7. Conclusion .....	34

## CHAPITRE III

### MODELISATION ET COMMANDE DE LA GENERATRICE

#### ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION

1. Introduction .....	35
2. Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation .....	36
2.1. Représentation de la MADA dans le système triphasé .....	36
2.2. Les équations électriques .....	37
2.3. Les équations magnétiques sous forme matricielle .....	37
2.4. L'équation mécanique .....	38
2.5. Choix de référentiel .....	38
2.6. La transformation de PARK .....	39
2.7. Application de la transformation de PARK .....	39

3. Représentation du modèle de la machine sous forme d'état .....	41
4. L'expression du couple .....	43
5. L'expression du Puissance Active et réactive .....	44
6. Dispositif de commande d'une éolienne a base de MADA a vitesse variable ...	44
6.1. Commande vectorielle de la machine asynchrone a double alimentation ...	44
6.2. Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique .....	45
7. Conclusion .....	48

## **CHAPITRE IV**

### **RESULTATS DE SIMULATION**

1. Introduction .....	49
2. Paramètre de la machine et schéma bloc de simulation .....	49
3. Résultat de simulation.....	50
4. Résultats de simulation pour les trois zones de fonctionnement .....	52
5. Conclusion .....	54
 CONCLUSION GENERALE .....	 55

---

---

# Résumé

Dans le domaine de production de l'énergie électrique à vitesse variable ou constante, il existe une nouvelle solution originale utilisant une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA).

Les travaux présentés dans ce mémoire sont consacrés à l'étude de modélisation et commande de la GADA.

Après une présentation de l'état de l'art de l'énergie éolienne nous avons développée un modèle simplifié de la turbine ainsi on a illustré un système de contrôle de la puissance aérodynamique et de limitation cette puissance lorsque le vent devient trop élevé.

En suite en fait la modélisation de la machine en vue de sa commande à flux orientation.

La dernière partie de ce mémoire a pour objectif de la simulation à fin de tester la robustesse de la commande utilisée au niveau du système complet de génération.

**Mots Clés:** aérogénérateur, commande vectorielle, génératrice asynchrone à double alimentation, turbine.

# *Introduction générale*

Très tôt, dans l'histoire des techniques, le vent a été exploité afin d'en extraire de l'énergie mécanique : pour les moulins, le pompage ou, au Moyen Age, pour l'industrie. [1]

Mais nous jours, on la transforme en énergie électrique par l'emploi d'aérogénérateur. Le nouvelle intérêt porté à l'énergie éolienne de puis la moitié des années 70 résulte de deux préoccupation: d'une part, la protection de l'environnement et l'économie des combustibles fossile qui en résulte. D'autre part, l'évolution de technologies rend la conversion de cette énergie de plus en plus rentable et donc sont utilisation devient économiquement compétitive par rapport aux sources traditionnelle de la puissance.

Pour exploiter l'énergie éolienne on se sert de la machine asynchrone à double alimentation (MADA).

La machine à double alimentation en anglo-saxon "doubly-fed induction machine " c'est une machine asynchrone triphasée avec un rotor bobiné qui peut être alimenté par des tensions externes. Le schéma de raccordement le plus typique pour cette machine consiste à connecter le stator directement au réseau, alors que le rotor est alimenté à travers un convertisseur de puissance contrôlé. Cette solution est plus attractive pour toutes les applications où les variations de vitesse sont limitées autour de celle de synchronisme. L'avantage principal de cette machine, est que le convertisseur de puissance doit traiter seulement (selon le glissement) une fraction de 20-30 % de toute la puissance de système, ceci signifie que les pertes dans le convertisseur de puissance peuvent être réduites par rapport au traitement de toute la puissance par celui-ci; et par conséquent le coût de production. En plus la MADA en mode génératrice permet de produire de l'énergie électrique à fréquence constante avec une vitesse mécanique variable. De même qu'elle offre une large gamme opérationnelle par rapport à la machine asynchrone à cage d'écureuil, [2].

Dans notre étude on a utilisée le (MADA) comme fonction on génératrice avec le stator liée au réseau directement par contre le rotor est alimenté par un système de commande sans utilisation de cycloconvertisseur et nous nous intéressés particulièrement à la modélisation et la commande du système génération éolien à la base de génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) connecté au réseau.

## **Organisation de mémoire**

La structure de notre mémoire est composée de quatre chapitres représentés comme suit :

Le premier chapitre on présente le développement de l'énergie éolienne et leur influence dans les différents types des machine électrique, ainsi les aérogénérateur.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation et au contrôle de la turbine éolienne.

Dans le troisième chapitre, on présentera la modèle de la machine asynchrone à double alimentation la commande vectorielle de la MADA basée sur la méthode directe par orientation du flux statorique.

Le dernier chapitre on présente les résultats de simulation de système complète.

## 1. Introduction

L'intérêt pour l'utilisation des énergies renouvelables augmente, car les populations sont de plus en plus concernées par les problèmes environnementaux. Parmi les énergies renouvelables, l'énergie éolienne est maintenant largement utilisée. [3]

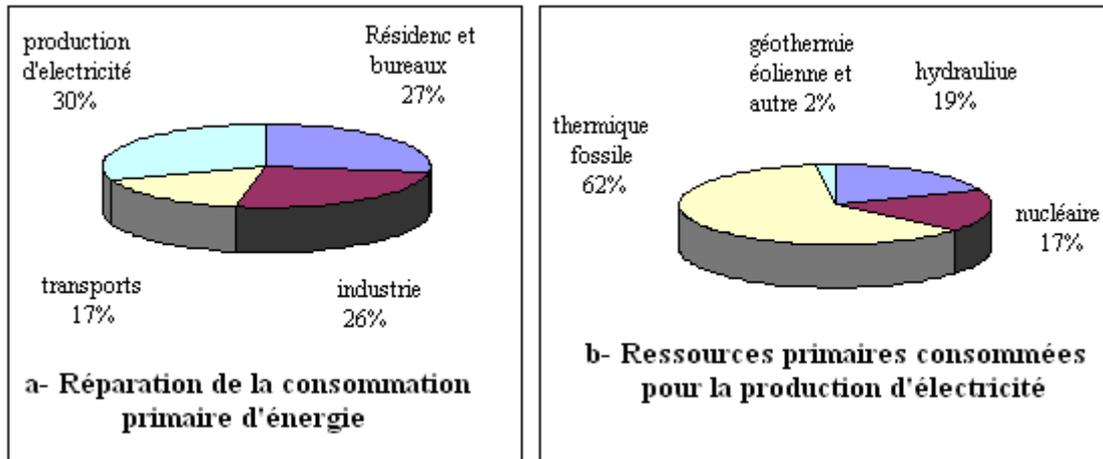
L'énergie éolienne est une source d'énergie utilisée de puis des siècles. En plus de son exploitation en mer pour faire avancer les bateaux, ce type d'énergie a été exploité sur terre durant au moins les 3000 dernières années; en effet, des moulins à vent avec axe vertical étaient déjà utilisés dans les hautes terres Afghanes en 7 siècles. Pour moulin de grains. Ainsi dans un premier temps, l'énergie cinétique du vent était uniquement transformée en énergie mécanique. C'est en 1981 que le Danois Poul La Cour construisit pour la première fois une turbine à vent générant de l'électricité.

Depuis, la technologie des aérogénérateurs a évidemment évolué ceci a permis, à l'énergie éolienne, de devenir ces dernières années une alternative aux sources d'énergie traditionnelles. Bien que les aérogénérateurs aient atteint une certaine maturité technique, il leur reste encore une grande marge de progrès technologique. Dans les années 70, ces technologies ont pourtant progressé. De même, il n'y a pas de doute que les aérogénérateurs évolueront encore, et la recherche à un rôle important à jouer dans ce sens. On peut, notamment y introduire plus «d'intelligence».

Les éoliennes de la dernière génération fonctionnent à vitesse variable. Ce type de fonctionnement permet d'augmenter le rendement énergétique, de baisser les charges mécaniques et d'améliorer la qualité de l'énergie électrique produite, par rapport aux éoliennes à vitesse fixe, et ceci grâce aux algorithmes de commande qui permettant de contrôler la vitesse de rotation des éoliennes à chaque instant. [4]

## 2. Ressources primaires de la production d'électricité au niveau mondial

La production d'électricité consomme actuellement environ le tiers de l'énergie primaire mondiale (Fig.1a) et la part des énergies renouvelables n'est que de 20% environ. Il apparaît donc de façon flagrante que l'électricité, bien qu'énergie finale propre par excellence, contribue très largement à la dégradation de l'environnement ainsi qu'à l'épuisement de ressources non renouvelables (combustibles fossiles et uranium). C'est pourquoi, l'une des mesures pour préparer un développement réellement durable consiste à accroître la part des ressources renouvelables pour la production d'électricité.



**Fig.1.1.** Part au niveau mondial.

### 3. Données générales

#### 3.1. La production d'énergie électrique à partir des éoliennes

Bien que connue et exploitée depuis longtemps, l'énergie éolienne fut complètement négligée pendant l'ère industrielle, au profit quasi exclusif, si l'on excepte l'hydroélectricité, des énergies fossiles.

L'énergie cinétique du vent peut être convertie directement en énergie mécanique et être utilisable par exemple dans les anciens moulins à vent ou pour actionner des pompes. Mais, de nos jours, on la transforme en énergie électrique par l'emploi d'aérogénérateurs. Le nouvel intérêt porté à l'énergie éolienne depuis la moitié des années 70 résulte de deux préoccupations : d'une part, la protection de l'environnement et l'économie des combustibles fossiles qui en résulte. D'autre part, l'évolution des technologies rend la conversion de cette énergie de plus en plus rentable et donc son utilisation devient économiquement compétitive par rapport aux sources traditionnelles de même puissance.

Bien que les aérogénérateurs aient atteint une certaine maturité technique, la technologie des aérogénérateurs évolue. Les éoliennes de dernière génération fonctionnent à vitesse variable. Ce type de fonctionnement permet d'augmenter le rendement énergétique, de diminuer les efforts mécaniques et d'améliorer la qualité de l'énergie électrique produite, par rapport aux éoliennes à vitesse fixe. C'est le développement des variateurs électroniques qui permet de contrôler la vitesse de rotation des éoliennes à chaque instant. Le vent est une grandeur stochastique, de nature très fluctuante. Ce sont les variations de la puissance résultante des fluctuations du vent, qui constituent la perturbation principale de la chaîne de conversion

éolienne.

De ce fait, les éoliennes sont considérées comme des génératrices de puissance variable. Connectées sur un réseau électrique, les générateurs éoliens n'imposent pas l'amplitude de la tension et ne règlent pas le rapport puissance -fréquence, autrement dit, elles ne participent pas aux services systèmes, et donc perturbent d'autant plus la stabilité des réseaux que leur taux de pénétration est important. Avec l'utilisation de l'électronique de puissance, de nouvelles technologies sont apparues pour optimiser cette génération d'énergie.

Les éoliennes actuellement installées peuvent être classées selon deux catégories : les éoliennes à vitesse fixe et à vitesse variable. La technologie inhérente à la première catégorie d'éolienne est bien maîtrisée. En effet, c'est une technologie qui a fait preuve d'une simplicité d'implantation, une fiabilité, et un faible coût, ce qui permet une installation rapide de centaines de kW de génération éolienne. Cependant, avec la mise en place très progressive de projets d'éoliennes dont la puissance est supérieure au MW, ce sont les éoliennes à vitesse variable qui se développeront à l'avenir. [4]

### **3.2. Croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne**

L'exploitation de l'énergie éolienne pour produire de l'électricité a eu des hauts et des bas. Les causes de ces fluctuations sont diverses : guerres, crises d'autres types d'énergie, volonté de préserver l'environnement, évolution de la technologie, changement de politique énergétique. etc...

A la suite de la fabrication du premier aérogénérateur, les ingénieurs Danois améliorèrent cette technologie durant la 1 et 2 guerre mondiale pour faire face à la pénurie d'énergie électrique. Malgré certains succès technologiques obtenus à cette époque, l'intérêt pour l'exploitation de l'énergie éolienne à grande échelle déclina à la fin de la 2 guerre mondiale.

C'est avec la crise pétrolière des années 70 que cet intérêt ressurgit. Ainsi plusieurs pays commencèrent à investir de l'argent pour notamment améliorer la technologie des aérogénérateurs, ce qui donna naissance aux aérogénérateurs modernes. Le premier marché véritablement significatif fut celui de la Californie, entre 1980 et 1986, où l'industrie de l'énergie éolienne put se développer. Ensuite les aides financières diminuèrent aux EU mais augmentèrent en Europe, ce qui permit un développement important de cette industrie dans des pays tels que

L'Allemagne et le Danemark. Le marché mondial passa de 200 MW/an en 1990 à 5500 MW/an

en 2001.

L'éolien a eu une croissance moyenne annuelle de 40% ces 5 dernières années. Ce développement s'est surtout exprimé en Europe, comme on peut le constater sur la Figure (1,2).

L'énergie éolienne est la source d'énergie qui croît le plus vite dans le monde.

Cette progression est énorme par rapport à d'autres types d'énergies plus traditionnelles, telle que l'énergie nucléaire avec une croissance de 1% ou le charbon qui n'a pas du tout augmenté dans les années 90.

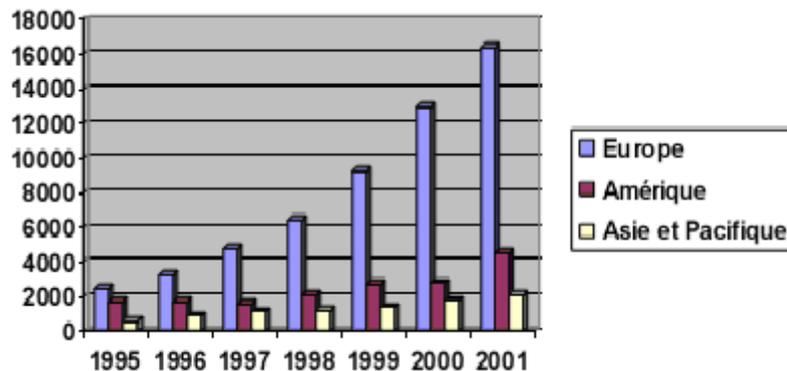


Fig.1.3. Evolution de la puissance installé (Mw) dans les continents les plus représentatifs.

Le coût de l'énergie éolienne est en baisse constante depuis plusieurs années. Ce prix dépend de nombreux facteurs et par conséquent différent d'un pays à l'autre, et même d'un site à l'autre puisque la vitesse du vent est un des facteurs de plus d'importance (la puissance produite par une éolienne est proportionnelle au cube de la vitesse du vent). Malgré tout, on peut dire que le coût de cette énergie a été divisé par deux ces 10 dernières années. Parmi les facteurs ayant provoqué cette baisse, on peut citer la baisse des prix des aérogénérateurs, l'augmentation de la rentabilité et de la disponibilité et la baisse des coûts de maintenance. Avec la tendance vers des turbines toujours plus grandes, la baisse des coûts d'infrastructure que cela entraîne les réductions du coût des matériaux, le prix de l'énergie éolienne continue à diminuer régulièrement. Il faut de plus noter qu'en prenant en compte le coût correspondant à la pollution produite par les différentes sources d'énergie, le coût de l'énergie éolienne est encore plus compétitif. [5]

### 3.3. Avantages et désavantages de l'énergie éolienne

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie.

Cette source d'énergie a également des désavantages qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement.

#### 3.3.1. Les avantages

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

- ✚ L'exploitation d'énergie éolienne **ne produit pas directement de CO<sub>2</sub>**.
- ✚ L'énergie éolienne est une **énergie renouvelable**, c'est à dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier.
- ✚ Chaque unité d'électricité produite par un aérogénérateur supplante une unité d'électricité qui aurait été produite par une centrale consommant des combustibles fossiles. Ainsi, l'exploitation de **l'énergie éolienne évite déjà aujourd'hui l'émission de 6,3 millions de tonnes de CO<sub>2</sub>, 21 milles tonnes de SO<sub>2</sub> et 17,5 mille tonnes de NO<sub>x</sub>**. Ces émissions sont les principaux responsables des pluies acides.
- ✚ L'énergie éolienne **n'est pas non plus une énergie à risque** comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs dont on connaît la durée de vie.
- ✚ L'exploitation de l'énergie éolienne **n'est pas un procédé continu** puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires.
- ✚ Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace.
- ✚ C'est une **source d'énergie locale** qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales.
- ✚ C'est **l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables**.
- ✚ L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple et Le **coût d'investissement nécessaire est faible** par rapport à des énergies plus traditionnelles.
- ✚ **L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite** que n'importe quelle source d'énergie traditionnelle.

### 3.3.2. Les inconvénients

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

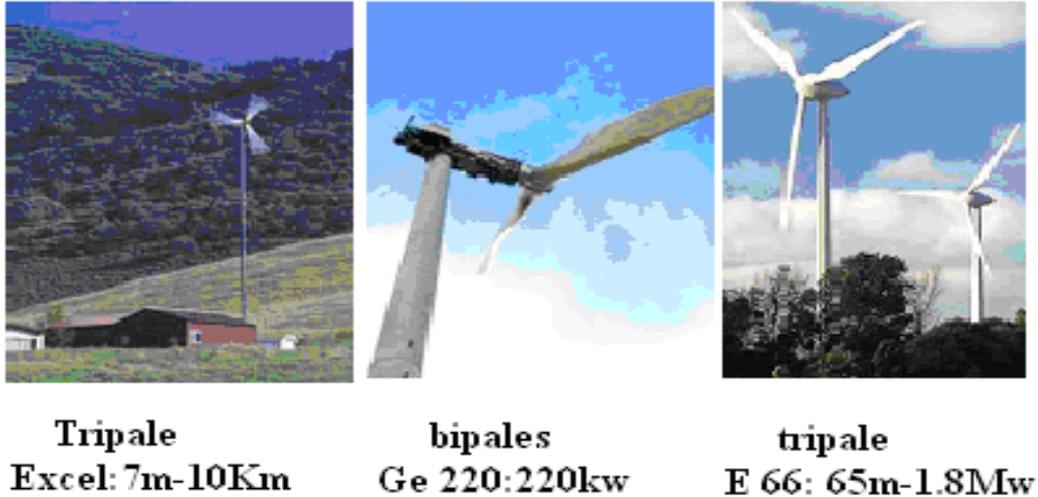
- ✚ **L'impact visuel.** Ca reste néanmoins un thème subjectif.
- ✚ **Le bruit :** il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci doit donc être limitée.
- ✚ **L'impact sur les oiseaux :** certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs. D'autres études disent que les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux, afin que ceux-ci ne se fassent pas attraper par les aéro turbines.
- ✚ **La qualité de la puissance électrique:** la source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne. Jusqu'à présent, le pourcentage de ce type d'énergie dans le réseau était faible, mais avec le développement de l'éolien, notamment dans les régions à fort potentiel de vent, ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs augmente et par suite, les contraintes des gérants du réseau électrique sont de plus en plus strictes.
- ✚ **Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classiques :** bien qu'en terme de coût, l'éolien puisse sur les meilleurs sites, c'est à dire la où il y a le plus de vent, concurrencer la plupart des sources d'énergie classique, son coût reste encore plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés. [5].

## 4. Spécificités liées à la technologie des aérogénérateurs

Un aérogénérateur (couramment appelé « éolienne ») est une machine qui utilise l'énergie éolienne pour produire de l'énergie électrique. La technologie des aérogénérateurs a énormément évolué ces 20 dernières années entraînant une spécialisation des différents types d'éolienne. Certains concepts de base permettent de classer les diverses sortes d'aérogénérateurs. [5].

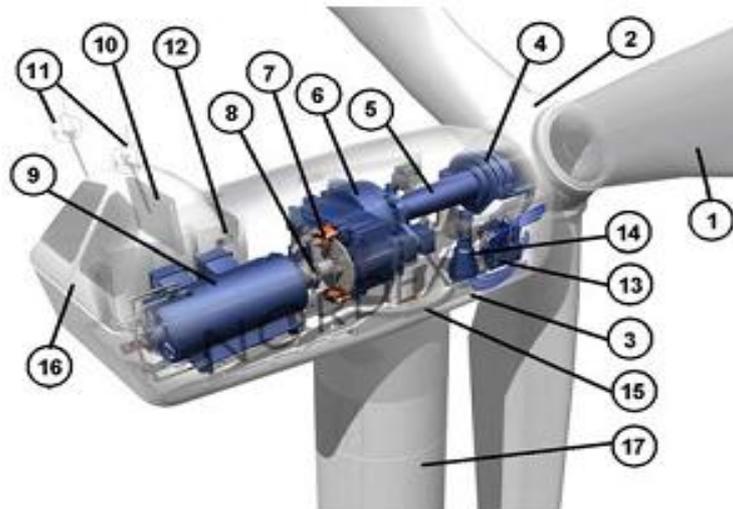
### 4.1. Constitution d'un aérogénérateur

Bien qu'il existe des turbines à axe vertical (Darrieux, Savonius...), les machines à axes horizontal dominant très largement le marché des petites puissances (quelques 10 W jusqu'aux plus élevées, de quelques MW) et ce sont elles que nous considérerons dans cet mémoire. Les turbines sont bipales ou le plus souvent tripales. [6]



**Fig.1.3.** Quelques exemples des aérogénérateur à axe horizontal

Dans les chaînes de conversion électromécanique conventionnelle, on intercale entre la turbine et la génératrice un multiplicateur mécanique à engrenages, la génératrice est alors très souvent une machine asynchrone à cage voire à rotor bobiné et à double alimentation pour un fonctionnement à vitesse variable économique. La figure (1.4) montre un exemple typique de chaîne de conversion à multiplicateur.

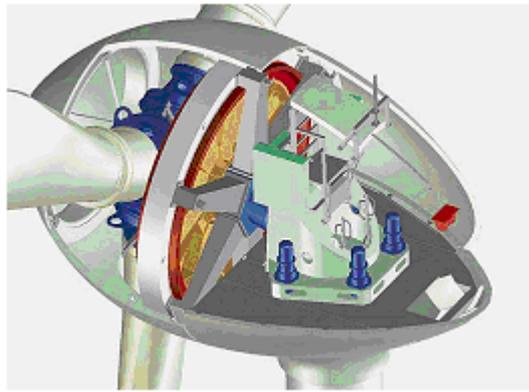


**Fig. 1.4.** Schéma d'une éolienne N 60(1300Kw)

1- pales. 2-moyen rotor. 3- nacelle. 4- cadran. 5-transmission. 6- multiplicateur de vitesse. 7- frein. 8-accouplement. 9-génératrice. 10-radiateur. 11- centrale de mesures du vent. 12- contrôle. 13- centrale hydraulique. 14- mécanisme d'orientation face au vent. 15- palies du système d'orientation équipés d'un frein à disque. 16-capot. 17-Mât.

Mais les multiplicateurs mécaniques ont leurs inconvénients, ils nécessitent une maintenance accrue et nuisent à la fiabilité surtout dans les grandes puissances. C'est la raison pour laquelle la tendance est à l'entraînement direct. La génératrice est alors une machine synchrone (rotor bobiné ou aimants) à très grand nombre de pôles et donc à fort couple massique. [7].

La figure (1.3) montre le schéma de la nacelle d'une telle machine. Le diamètre de la nacelle est plus élevé mais sa longueur est plus courte. Ces génératrices, dont la vitesse de rotation et le nombre de pôles rendent impossible une connexion directe au 50Hz, sont nécessairement alimentées par un convertisseur statique qui offre la possibilité d'un fonctionnement à vitesse variable.



**Fig. 1.3.** Schéma d'une éolienne à entraînement directe

Depuis les années 80, les puissances moyennes unitaires des aérogénérateurs sont passées de 50 kW, à 200 kW (1990), 500 kW (1998) à plus de 1 MW en 2002 (1,4 MW en Allemagne). L'accroissement des puissances permet des réductions de coût au kW. Les aérogénérateurs les plus puissants en 2003 frôlent les 5 MW avec des diamètres de turbines proches de 120 m.

## 4.2. Types de machine électrique

La configuration électrique d'un aérogénérateur a une grande influence sur son fonctionnement. Le fait qu'une éolienne fonctionne à vitesse fixe ou à vitesse variable dépend par exemple de cette configuration. Les avantages principaux des deux types de fonctionnement sont les suivants:

- ❖ Fonctionnement à vitesse fixe :
  - ✚ Système électrique plus simple.
  - ✚ Plus grande fiabilité.

- ✚ Peu de probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments de l'éolienne.
- ✚ Pas besoin d'un système électronique de commande.
- ✚ Moins cher.
- ❖ Fonctionnement à vitesse variable :
  - ✚ Augmentation du rendement énergétique.
  - ✚ Réduction des oscillations du couple dans le train de puissance.
  - ✚ Réduction des efforts subis par le train de puissance.
  - ✚ Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité.

Les deux types de machine électrique les plus utilisés dans l'industrie éolienne sont les machines synchrones et les machines asynchrones sous leurs diverses variantes. On donne par la suite les principales caractéristiques de chacun de ces types de machine [5].

### **Générateur synchrone**

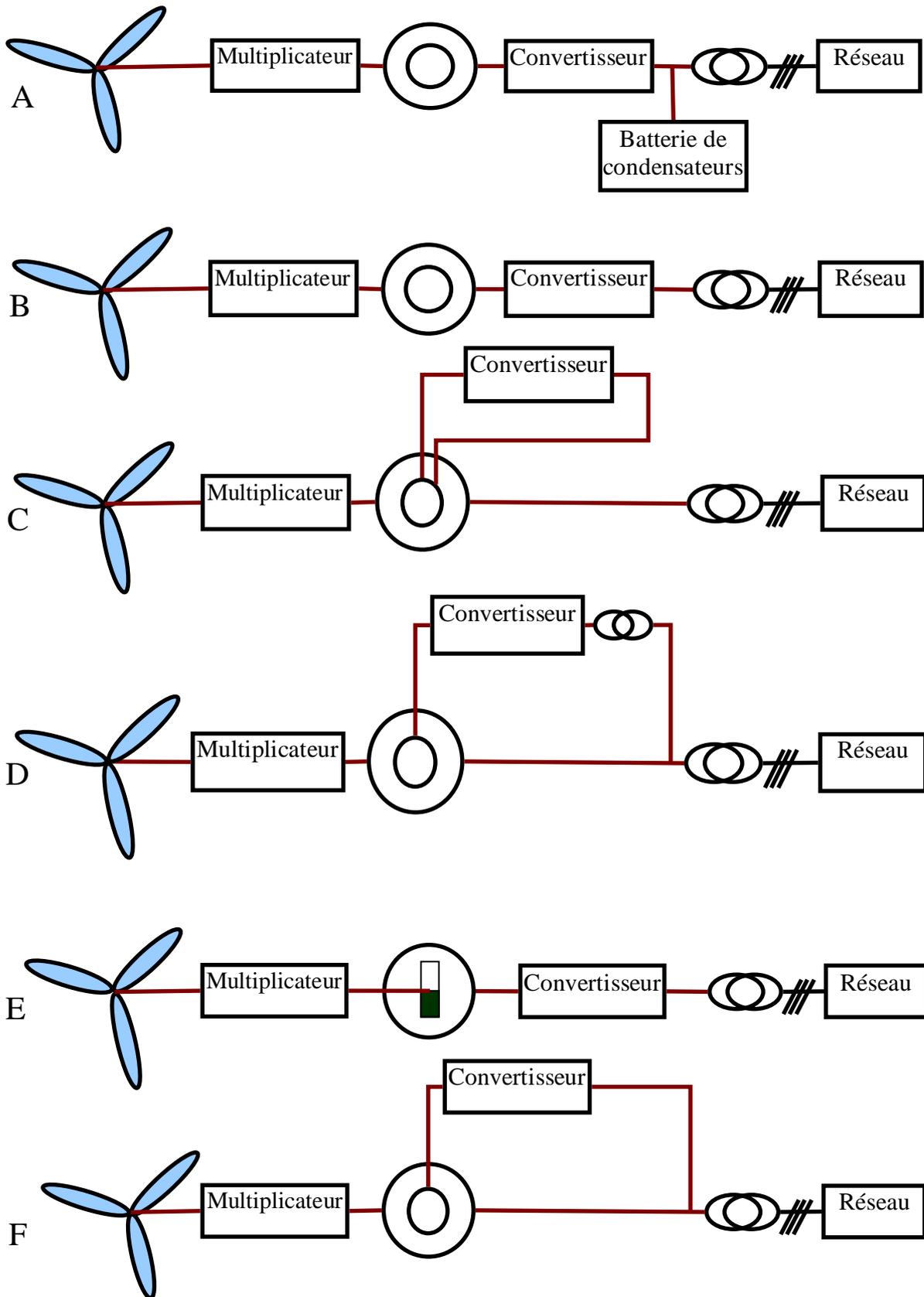
C'est ce type de machine qui est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité, notamment dans ceux de très grande puissance (centrales thermiques, hydrauliques ou nucléaires). Les générateurs synchrones utilisés dans le domaine éolien, ceux de 500 kW à 2 MW sont bien plus chers que les générateurs à induction de la même taille. De plus, lorsque ce type de machine est directement connecté au réseau, sa vitesse de rotation est fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion génératrice - réseau, les fluctuations du couple capté par l'aéroturbine se propagent sur tout le train de puissance, jusqu'à la puissance électrique produite. C'est pourquoi les machines synchrones ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs directement connectés au réseau. Elles sont par contre utilisées lorsqu'elles sont connectées au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance. Dans cette configuration, la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine sont découplés. Cette vitesse peut par conséquent varier de sorte à optimiser le rendement aérodynamique de l'éolienne et amortir les fluctuations du couple dans le train de puissance. Certaines variantes des machines synchrones peuvent fonctionner à de faibles vitesses de rotation et donc être directement couplées à l'aéroturbine. Elles permettent ainsi de se passer du multiplicateur, élément présent sur la plupart des aérogénérateurs et demandant un important travail de maintenance.

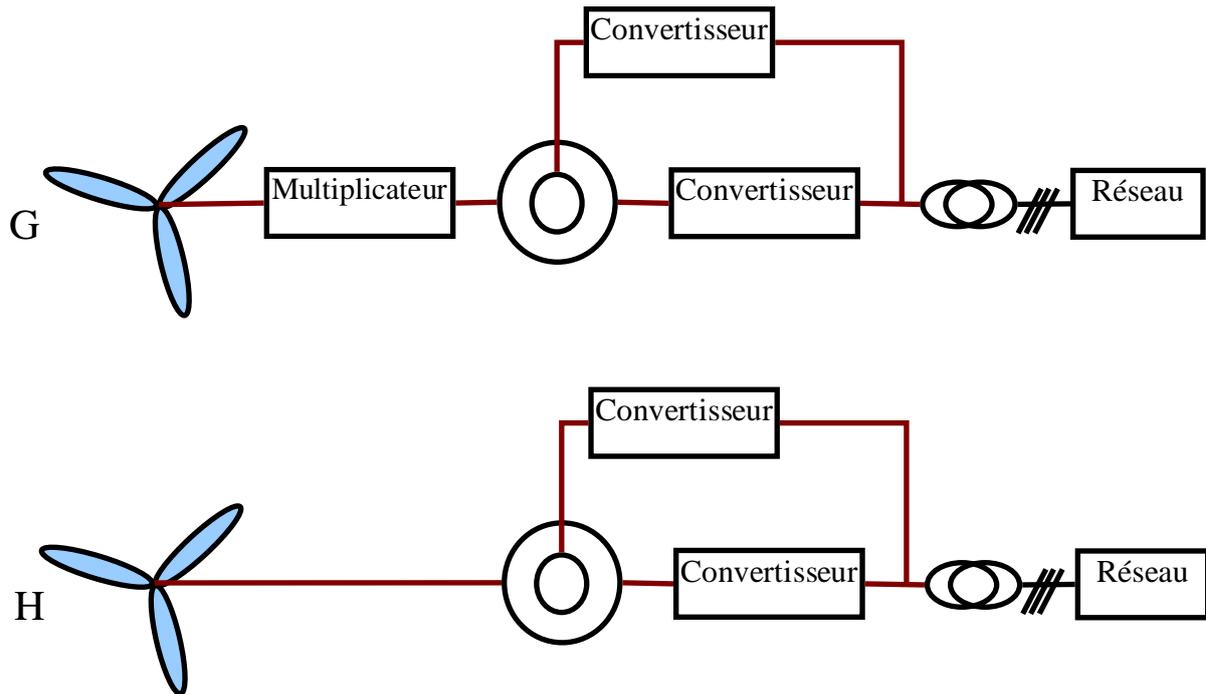
## Générateurs asynchrones

La connexion directe au réseau de ce type de machine est bien plus douce grâce à la variation du glissement se produisant entre le flux du stator et la vitesse de rotation du rotor. Ceci explique pourquoi pratiquement toutes les éoliennes à vitesse fixe utilisent des machines à induction. Dans les années 90, les Danois ont rajouté une deuxième machine électrique pour pouvoir faire fonctionner l'éolienne à deux vitesses et ainsi augmenter le rendement énergétique de leurs aérogénérateurs. L'introduction de convertisseurs de puissance entre la machine et le réseau permet comme pour la machine synchrone de découpler la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine, et ainsi de faire fonctionner l'aérogénérateur à vitesse variable avec tous les avantages cités auparavant. Comme pour les machines synchrones, il existe différents types de machine asynchrones, qui associées à divers convertisseurs de puissance, fonctionnent avec des domaines de variation de vitesse de rotation plus ou moins grands. Deux des désavantages principaux des machines à induction sont la consommation de puissance réactive et le courant élevé au démarrage, mais ces problèmes peuvent être résolus par l'utilisation d'éléments d'électronique de puissance.

Deux variantes de ces machines synchrones et asynchrones pourraient se développer dans les prochaines années : des générateur synchrone à aimant permanent directement couplés à la turbine ou des générateur asynchrone doublement alimenté au stator. Ces derniers n'ont pas encore complètement au point mais auraient un avantage sur les générateurs asynchrones doublement alimentés à rotor bobiné (GADA), puisqu'ils n'ont pas de bagues, élément des machines asynchrones à rotor bobiné qui demande une certaine maintenance.

Même si elles ne sont pas utilisées dans l'industrie éolienne, d'autres types de machines auraient techniquement la possibilité d'être utilisées notamment les aérogénérateurs à vitesse variable. Les machines à courant continu présentent une excellente marge de variation de la vitesse de rotation, une bonne réponse et dynamique et une excellente capacité de surcharge, mais elles sont chères et ont un grand poids. Les générateurs à réluctances variables sont des machines mécaniquement robustes, ils ont de plus bon rendement à toutes les vitesses et un large marge de variation de la vitesse de rotation et leur commande est simple. Ce type de machine pourrait être un candidat pour de futures éoliennes.





**Fig.1.6.** Configuration électrique utilisant des différents types de machines électriques

Les configurations illustrées sur les figures (1.6) représentent les topologies les plus courantes rencontrées dans les aérogénérateurs et faisant intervenir les deux types de machines dont on a décrit les caractéristiques principales. Le terme {convertisseur} apparaissant dans ces figures se réfère à différents types de composants d'électronique de puissance.

Les différentes configurations sont décrites par la suite:

A- Sous cette forme, l'éolienne fonctionne à vitesse fixe, avec un générateur asynchrone à cage d'écureuil. Les bancs de condensateurs sont utilisés pour la compensation de la puissance réactive et les convertisseurs pour un démarrage plus doux.

B- Les bancs de condensateur et le {démarrage doux} sont remplacés par des convertisseurs de fréquence soit de grande échelle. Soit utilisés seulement pour compenser la puissance réactive à des vitesses de vents élevés. La première configuration a l'avantage de pouvoir faire varier la vitesse de rotation de l'éolienne pour toutes les vitesses du vent.

C- Ici, le générateur est asynchrone à rotor bobiné. L'idée de base est de contrôler la résistance du rotor par l'intermédiaire d'un convertisseur d'électronique de puissance et de commander le glissement de la machine sur un domaine de variation de 10%.

D- Cette configuration contient un générateur asynchrone doublement alimenté. Un convertisseur de fréquence commande directement les courants dans les enroulements du rotor. Ceci permet de contrôler la puissance de sortie du générateur en utilisant des convertisseurs dimensionnés de 20 à 30% de la puissance nominale du générateur. La puissance traversant les convertisseurs dans le cas D étant moindre que celle du cas B, Les harmoniques sont nettement plus faibles.

E- Dans cette configuration on commande la totalité de la puissance (application: bateaux à voiles, recharge de batteries de stockage, systèmes hybrides ou d'autres applications Exploitants des éoliennes de moins de 20 KW).

F- Une machine synchrone est ici existée par l'intermédiaire d'un redresseur. Inconvénients : besoin d'un circuit d'excitation et de bagues et stratégie de commande plus complexe.

G- Par rapport à la configuration précédent, celle-ci permet un fonctionnement à vitesse variable si le convertisseur lié au réseau est un convertisseur de fréquence à quatre quadrants.

H- Cette configuration contient un générateur synchrone multipolaire, évitant ainsi l'utilisation d'un multiplicateur.

## **Autres caractéristiques**

### **Système isolé ou connecté**

Les aérogénérateurs sont soit connectés au réseau, soit isolés. Ces derniers servent surtout à alimenter des zones d'habitation ou des systèmes de télécommunication isolés. Ces aérogénérateurs sont plus petites et ne représentent que 0,8% de la puissance électrique générée à partir du vent dans le monde. Ainsi la plus grande partie des aérogénérateurs sont connectés à des réseaux électriques, et c'est surtout la technologie de ces machines qui a progressé ces dernières années.

### **Nombre de pales**

Les aérogénérateurs ont plus ou moins de pales, plus le nombre de pales est grand plus le couple au démarrage sera grand et plus la vitesse de rotation sera petite. Les aérogénérateurs modernes ont 1,2 ou 3 pales. Les machines unies et bipales ont l'avantage de peser moins, mais elles produisent plus de fluctuations mécaniques, elles ont un rendement énergétique moindre, elles font plus de bruit dans la mesure ou elles vont plus vite et elles provoquent un impact visuel plus important. Ceci explique pourquoi 80% des fabricants réalisent des aérogénérateurs tri-pales.

## Axe horizontal ou vertical

Les aérogénérateurs sont axe horizontal ou vertical. Aujourd'hui, pratiquement les seules éoliennes commerciales sont à axe horizontal. Les éoliennes à axe vertical ont été prometteuses dans les années 80 et au années 90, mais leur plus faible rendement aérodynamique ainsi que les fluctuations élevées de la puissance électrique générée les ont écartées du marché.[4]



**Fig.1.7.** les aérogénérateurs à axe vertical.

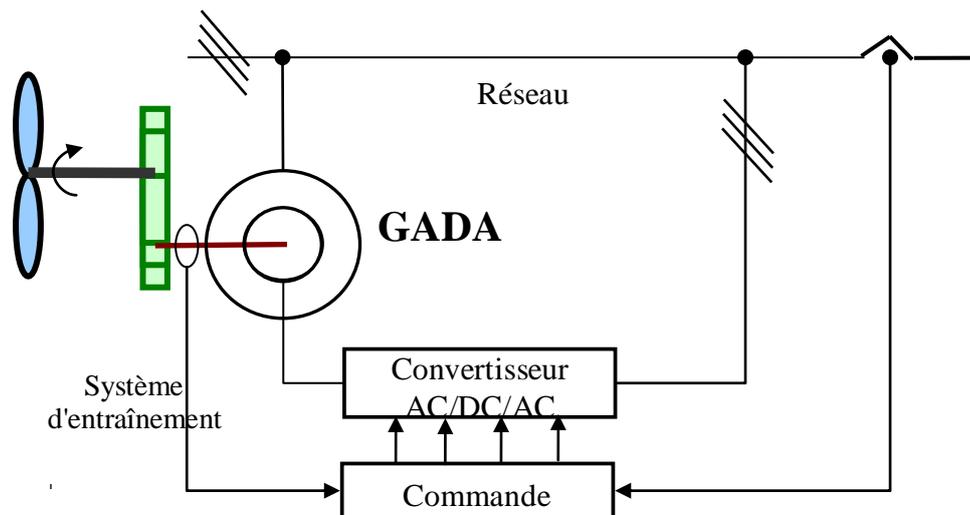


**Fig.1.8.** Les aérogénérateurs à axe horizontal.

## 6. Système de génération étudié dans ce mémoire

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) présente des avantages distincts dans le domaine de générateur éolien à vitesse variable par rapport à la machine asynchrone à cage d'écurueil conventionnelle. La MADA peut être alimentée et contrôlée par l'un ou les deux cotes statorique. Le schéma type de connexion de la MADA dans le système éolien à vitesse variable donné par la figure (1.9) est le plus utilisé dans la littérature, vue que le convertisseur de puissance associe au circuit rotorique traite seulement de 20-30% de toute la puissance du système.

Il existe deux type de convertisseurs de puissance contrôlés pour l'alimentation du rotor tel que le convertisseur matriciel DC/AC qui représente des difficultés pour le système de contrôle et qui nécessite un système de protection compliqué, l'autre type consiste à utiliser un redresseur et un onduleur contrôlé. Ce dernier type offre une robustesse au réglage des puissances actives et réactives transmises au rotor. [3]



**Fig.1.9.** schéma de conversion typique de la GADA.

## 7. Machine asynchrone à double alimentation

La double alimentation, concerne les machine a courant alternatif ayant des enroulement statorique et rotorique biphasés ou triphasés. On utilise généralement le moteur asynchrone à rotor bobiné. Lorsqu'on alimente le stator et le rotor d'un moteur asynchrone à partir d'un même réseau, simultanément, le courant statorique  $i_s$  va créer un champ magnétique tournant à la vitesse  $n_1 = f_s / p$ . et le courant rotorique  $i_r$  va créer aussi un champ magnétique tournant à la

$n1$ . Le signe  $\pm$  indique que le sens de rotation du champ magnétique rotorique par rapport au champ statorique. Dans ce cas le moteur à double alimentation tourne à la vitesse  $n = n1 \pm n2$ ,

C'est-à-dire qu'on a deux cas ( $n=0$  et  $n=2 n1$ ) donc la machine peut fonctionner à une vitesse double du synchronisme à vide.

Une technologie qui permet de faire varier la vitesse d'une machine asynchrone, ici alimentée au stator par un réseau fixe à 50 Hz et au rotor par des sources de tension, consiste à utiliser le système de Scherbius dans lequel un cycloconvertisseur commande l'écoulement d'énergie dans le circuit rotorique.

La machine à double alimentation s'apparente fortement la machine asynchrone à rotor bobiné classique, du point de vue technologique il ne s'agit pas d'une nouvelle structure, car cette dernière est toujours, d'actualité, son utilisation est préférée pour ses propriétés de réglage de sa vitesse par action sur des résistances placées dans le circuit rotorique, ou encore pour sa possibilité de démarrer sans demander un courant élevé.

Dans ce travail nous nous intéressons à la configuration qui consiste de relier le stator est directement au réseau de fréquence et de tension constantes, d'autre côté le rotor est alimenté par un convertisseur AC/AC qui peut être un cycloconvertisseur ou convertisseur indirecte Redresseur-onduleur

La machine à double alimentation offre des nombreux avantages par rapport à la machine asynchrone et synchrone surtout en ce qui concerne la gamme de la vitesse opérationnelle et de la grande puissance générée. Ce qui permet à cette dernière de trouver un domaine d'application très vaste et surtout dans l'entraînement à vitesse variable, et dans le système de génération éolienne à vitesse variable.

## 8 Bilan énergétique

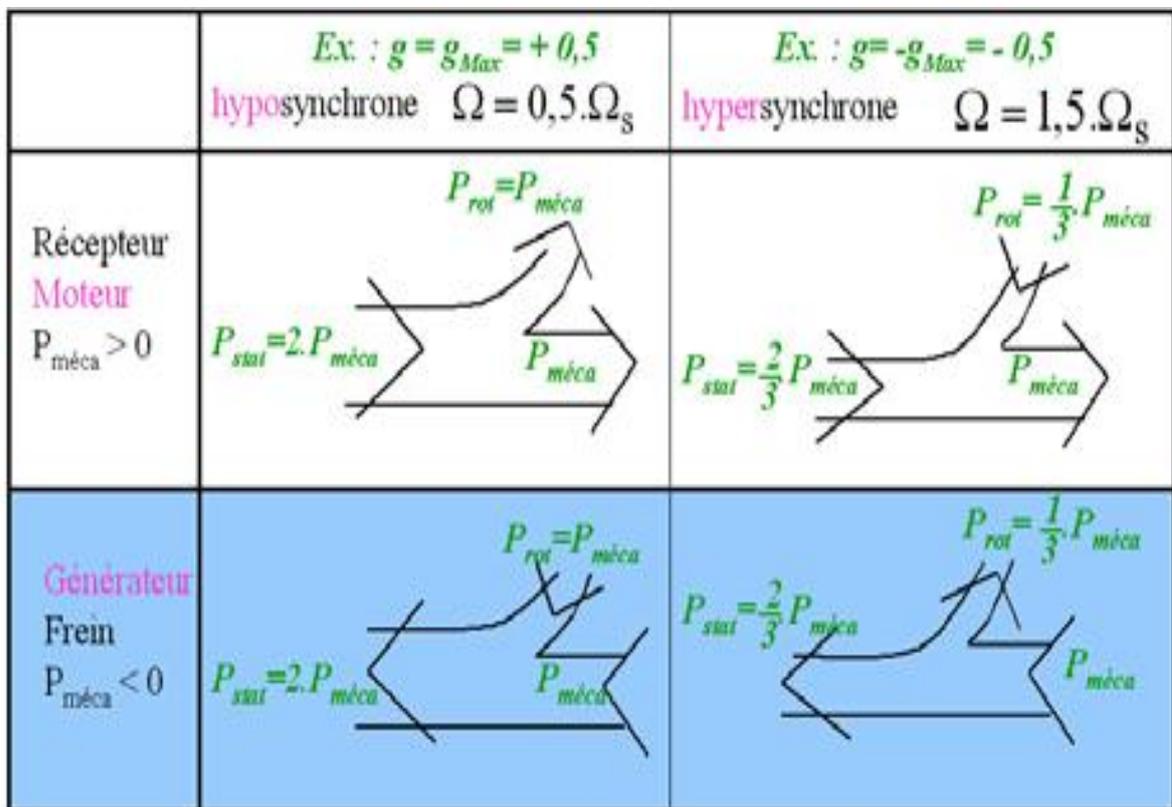
Le bilan énergétique simplifié (pas de pertes dans la transmission de la puissance statorique vers le rotor) d'une machine asynchrone à rotor bobiné aide considérablement à la compréhension.

Les relations algébriques (en convention motrice, récepteur électrique au stator et générateur au rotor) entre les puissances statorique, rotorique et mécanique sont rappelées ci-dessous :

$$P_{em} = P_{stat} = \frac{P_{méca}}{1-g} \text{ et } P_{rot} = \frac{g}{1-g} P_{méca} \quad (1.1)$$

$$\text{Où } g \text{ est le glissement} \quad g = 1 - \frac{\Omega}{\Omega_s} \quad (1.2)$$

$\Omega$  et  $\Omega_s$  sont les vitesses de rotation respectivement du rotor et du champ tournant (imposée par l'alimentation du stator à fréquence et tension fixe). Considérons le cas où la vitesse de rotation  $\Omega$  varie dans une plage déterminée par  $g_{\max}$  symétrique autour de  $\Omega_s$ . Pour illustrer les expressions (1.1), la figure (1.10) donne les transferts d'énergie et leurs proportions dans les quatre situations extrêmes (hypo et hyper synchrone), en moteur et en générateur.



**Fig.1.10.** Transferts d'énergie dans une machine à double alimentation lorsque la Vitesse varie de la moitié ou double de  $\Omega_s$

## **9. Conclusion.**

Dans ce contexte, nous avons vu quelques notions principales au sujet de la technologie éolienne ont été données comme les méthodes de description du gisement éolien, des exemples d'architectures, les génératrices utilisées, etc.

Le domaine des énergies renouvelables, notamment l'éolien, représente une nouvelle opportunité pour les recherches en Génie Electrique. Ces recherches seront d'autant plus fructueuses qu'elles seront suffisamment pluridisciplinaires ainsi que l'exigent ces systèmes complexes.

Dans le second chapitre nous nous intéressons à la modélisation de la turbine. Ainsi que la stratégies de commande de celle-ci.

## 1. Introduction

Une éolienne a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique, d'une manière générale, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est indispensable. Pour parvenir à cet objectif, idéalement, une éolienne doit comporter:

- un système qui permet de la contrôler mécaniquement (orientation des pales de l'éolienne, orientation de la nacelle).
- un système qui permet de la contrôler électriquement (Machine électrique associée à l'électronique de commande).

Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement à la modélisation et au contrôle de la turbine éolienne.

Dans un premier temps, les différentes parties constituant une éolienne sont décrites d'une façon générale. L'éolienne à vitesse variable est une technologie qui se développe de plus en plus, pour être intégrée dans les réseaux de moyenne tension. Différentes stratégies de commande seront décrites. Ces dernières sont différentes selon le point de fonctionnement fixé par la caractéristique puissance/vitesse. Ensuite, différentes techniques permettant de maximiser l'extraction de la puissance éolienne sont présentées.

La dernière partie de ce chapitre illustre les principales méthodes permettant de contrôler la puissance aérodynamique recueillie par la turbine. Le but étant de limiter cette puissance lors que la vitesse du vent de vient trop élevé.

## 2. Description de l'éolienne

La turbine éolienne est munie de pales fixes ou orientables et tourne à une vitesse nominale de 25 à 40 tr/min. Plus le nombre de pales est grand plus le couple au démarrage sera grand et plus la vitesse de rotation sera petite. Les turbines uni et bipales ont l'avantage de peser moins, mais elles produisent plus de fluctuations mécaniques. Elles ont un rendement énergétique moindre, et sont plus bruyantes puisqu'elles tournent plus vite. Elles provoquent une perturbation visuelle plus importante de l'avis des paysagistes. De plus, un nombre pair de pales doit être évité pour des raisons de stabilité. En effet, lorsque la pale supérieure atteint le point le plus extrême, elle capte la puissance maximale du vent. A ce moment, la pale inférieure traverse la zone abritée du vent par la tour. Cette disposition tend à faire fléchir l'ensemble de la

turbine vers l'arrière. Ceci explique pourquoi 80% des fabricants fabriquent des aérogénérateurs tripales. [4]

Lorsque des pales fixes sont utilisées, un dispositif de freinage aérodynamique est utilisé permettant de dégrader le rendement de la turbine au delà d'une certaine vitesse (décrochage aérodynamique ou Stall control). Sinon, un mécanisme d'orientation des pâles permet la régulation de la puissance et un freinage (réglage aérodynamique).

Un arbre dit "lent" relie le moyeu au multiplicateur et contient un système hydraulique permettant le freinage aérodynamique en cas de besoin.

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

Le système de refroidissement comprend généralement un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice et un refroidisseur à huile pour le multiplicateur. Il existe certaines éoliennes comportant un refroidissement à l'eau.

La génératrice (ou l'alternateur) est généralement asynchrone, et sa puissance électrique peut varier entre 600kW et 2,5MW.

Les signaux électroniques émis par l'anémomètre sont utilisés par le système de contrôle-commande de l'éolienne pour démarrer l'éolienne lorsque la vitesse du vent atteint approximativement 5 m/s. De même, le système de commande électronique arrête automatiquement l'éolienne lorsque la vitesse du vent est supérieure à 25m/s a fin d'assurer la protection de l'éolienne.

Le système de contrôle-commande comporte un ordinateur qui surveillent en permanence l'état de l'éolienne tout en contrôlant le dispositif d'orientation. En cas de défaillance (par exemple une surchauffe du multiplicateur ou de la génératrice), le système arrête automatiquement l'éolienne et le signale à l'ordinateur de l'opérateur via un modem téléphonique.

Il existe essentiellement deux technologies d'éoliennes, celles dont la vitesse est constante et celles dont la vitesse sont variables. La partie suivante décrit d'une manière assez générale le fonctionnement de ces deux procédés. [6]

## 2.1. Les éoliennes à vitesse fixe

Les éoliennes à vitesse fixe sont les premières à avoir été développées. Dans cette technologie, la génératrice asynchrone est directement couplée au réseau. Sa vitesse  $\Omega_{mec}$  est alors imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paires de pôles de la génératrice (figure 2.1).

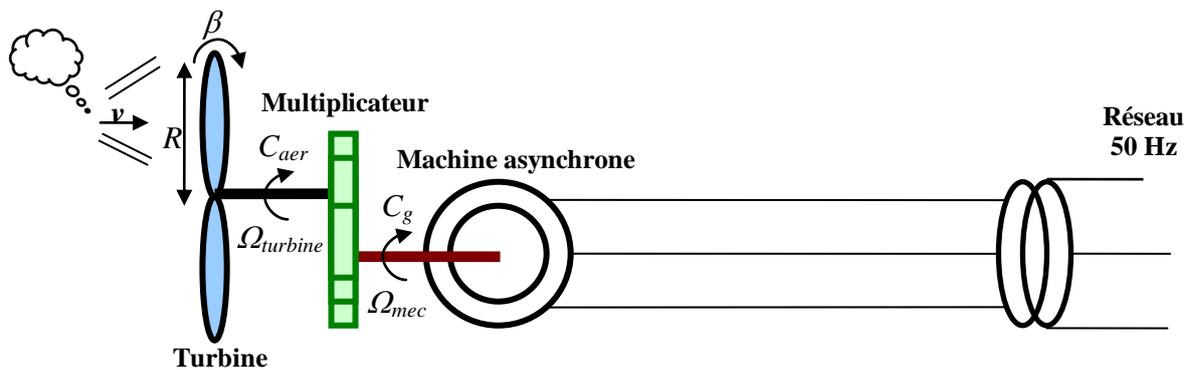


Fig. 2.1 – Eolienne à vitesse fixe directement connectée au réseau

## 2.2. Les éoliennes à vitesse variable

### a. Principe

Les deux structures existantes des éoliennes à vitesse variable sont présentées sur la figure (2.2) La configuration de la figure (2.2.a), est basée sur une machine asynchrone à cage, pilotée au stator de manière à fonctionner à vitesse variable, par des convertisseurs statiques.

La configuration de la figure 2.2-b, est basée sur une machine asynchrone à double alimentation et à rotor bobiné (MADA). La vitesse variable est réalisée par l'intermédiaire des convertisseurs de puissance, situés au circuit rotorique.

Nous présentons sur la figure (2.3) la caractéristique de la puissance mesurée en fonction de la vitesse du vent d'une éolienne réelle de Schelle de 1.5MW basée sur une machine asynchrone à double alimentation à rotor bobinée. On constate à partir de cette figure que la puissance est limitée à sa valeur nominale pour une vitesse du vent de 12.5 m/s. L'orientation des pales est parfaitement réalisée dans ce cas.

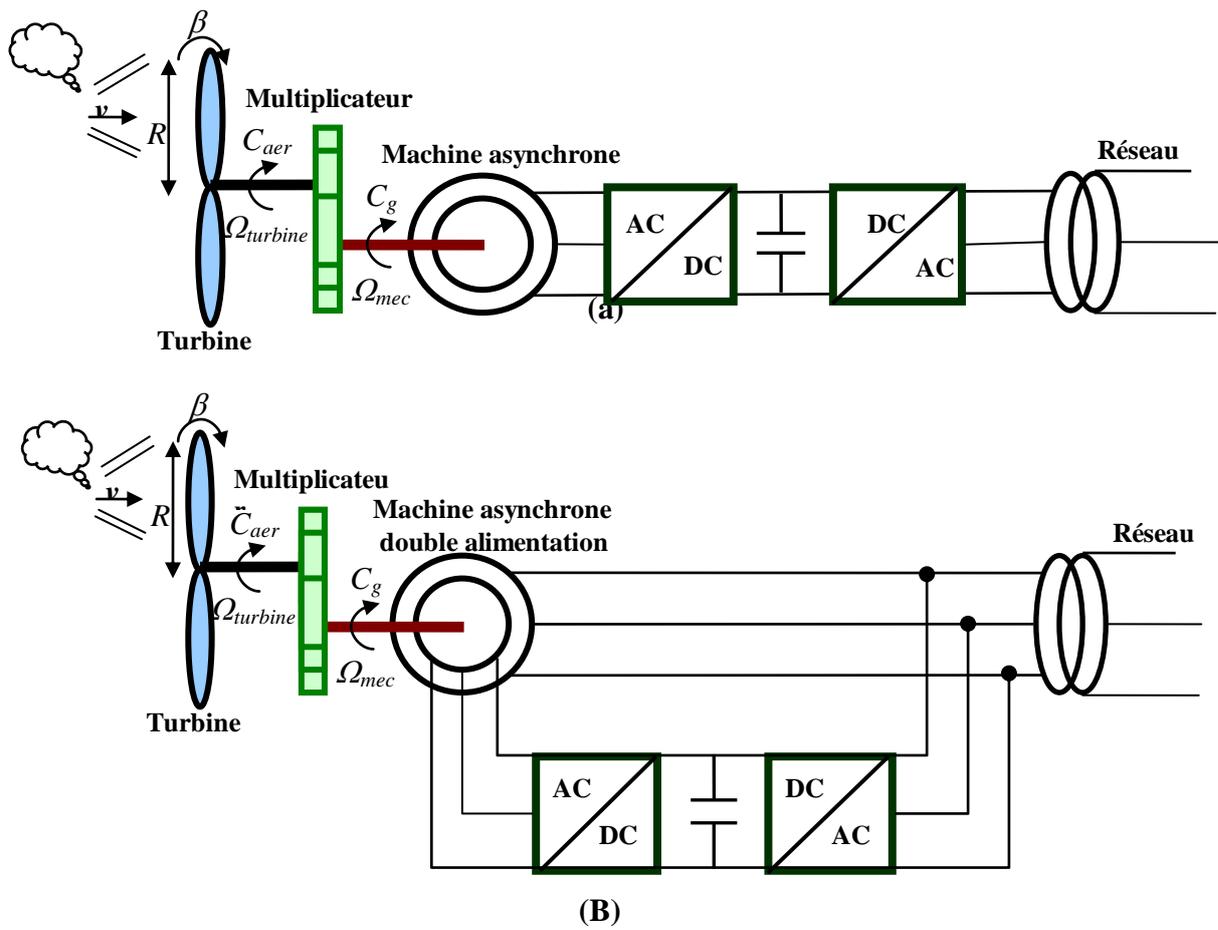


Fig. 2.2. Eoliennes à vitesse variable

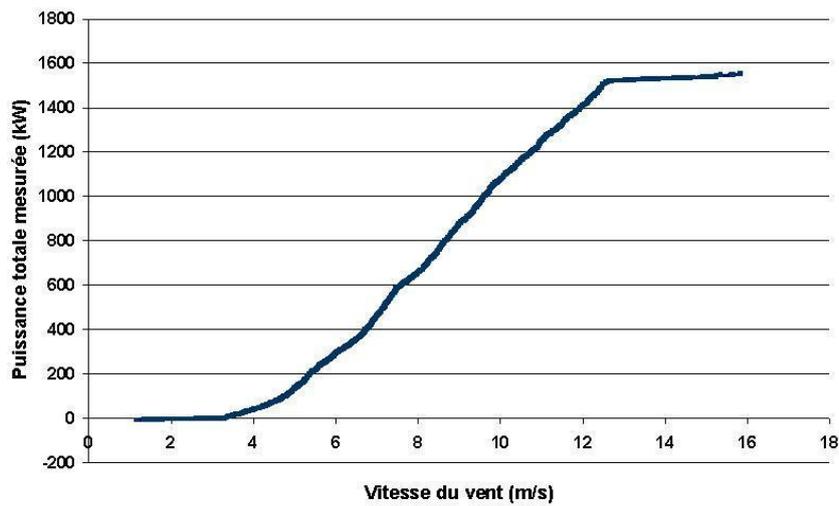
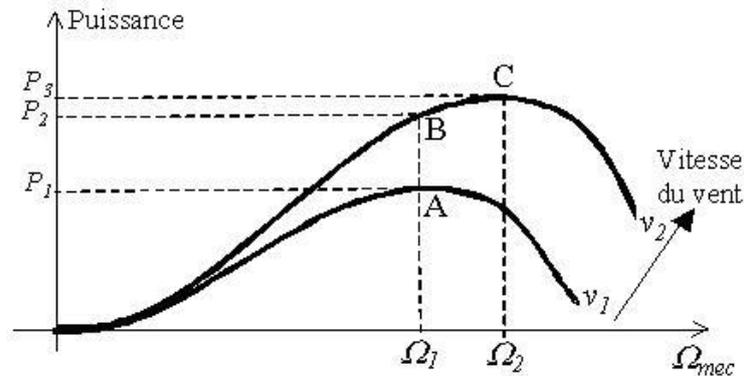


Fig. 2.3. Puissance totale générée en fonction de la vitesse du vent

## b. Intérêt de la vitesse variable

La caractéristique générale de la puissance convertie par une turbine éolienne en fonction de sa vitesse est représentée sur la figure (2.4).



**Fig. 2.4.** Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique et la vitesse du vent

Pour une vitesse de vent  $v_1$  et une vitesse mécanique de la génératrice  $\Omega_1$ ; on obtient une puissance nominale  $P_1$  (point A). Si la vitesse du vent passe de  $v_1$  à  $v_2$ , et que la vitesse de la génératrice reste inchangée (cas d'une éolienne à vitesse fixe), la puissance  $P_2$  se trouve sur la 2<sup>ème</sup> caractéristique (Point B). La puissance maximale se trouve ailleurs sur cette caractéristique (point C). Si on désire extraire la puissance maximale, il est nécessaire de fixer la vitesse de la génératrice à une vitesse supérieure  $\Omega_2$ . Il faut donc rendre la vitesse mécanique variable en fonction de la vitesse du vent pour extraire le maximum de la puissance générée.

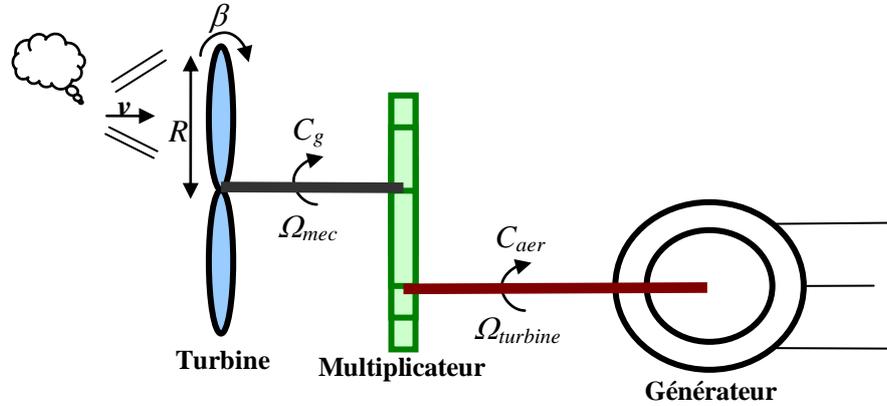
Les techniques d'extraction maximale de puissance consistent à ajuster le couple électromagnétique de la génératrice pour fixer la vitesse à une valeur de référence ( $\Omega_{ref}$ ) calculée pour maximiser la puissance extraite. [4]

Dans la partie suivante, nous expliquons la modélisation détaillée d'une turbine éolienne.

## 3. Modélisation des éoliennes

Dans cette partie, nous nous intéressons uniquement à la modélisation d'éoliennes à axe horizontales tri-pales. Aujourd'hui, pratiquement toutes les éoliennes sont à axe horizontal car, même si les éoliennes à axe vertical ont été prometteuses dans les années 80 et au début des années 90, leur faible rendement aérodynamique ainsi que les fluctuations élevées de la puissance électrique produite les ont écartées du marché.[8]

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 gain  $G$  de vitesse (figure 2.5).



**Fig. 2.5.** Schéma d'un système éolien

La puissance du vent ou la puissance éolienne est définie de la manière suivante

$$P_v = \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \quad (2.1)$$

Avec:

- $\rho$  est la densité de l'air (approx. 1.22kg/m à la pression atmosphérique à 15°C).
- $S$  est la surface circulaire balayée par la turbine [m<sup>2</sup>] de rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pale  $R$ [m].
- $v$  est la vitesse du vent [m/s].

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

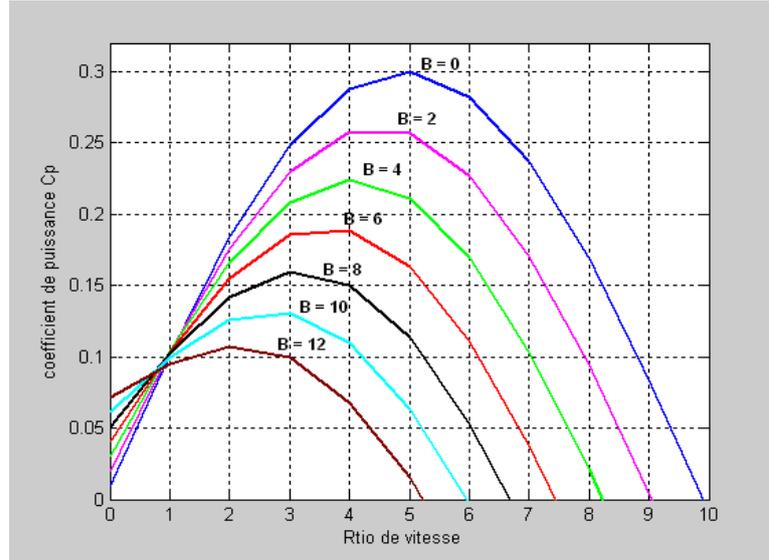
$$P_{aer} = C_p \cdot P_v = C_p(\lambda, \beta) \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \quad (2.2)$$

Le coefficient de puissance  $C_p$  représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne, il dépend de la caractéristique de la turbine. La figure (2.5) représente la variation de ce coefficient en fonction du ratio de vitesse  $\lambda$  et de l'angle de l'orientation de la pale  $\beta$ . [4]

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

$$\lambda = \frac{\Omega_{turbine} R}{v} \quad (2.3)$$

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



**Fig. 2.6.** Coefficient de puissance en fonction du ratio de vitesse  $\lambda$  [4]

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

$$C_{ear} = \frac{P_{ear}}{\Omega_{turbine}} = Cp \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine}} \quad (2.4)$$

### 3.1. Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice (figure 2.5).

Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes:

$$Cg = \frac{C_{aer}}{G} \quad (2.5)$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{méc}}{G} \quad (2.6)$$

### 3.2. Equation dynamique de l'arbre

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

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \quad (2.7)$$

Il est à noter que l'inertie du rotor de la génératrice est très faible par rapport à l'inertie de la turbine reportée par cet axe. A titre illustratif, pour une éolienne Vestas de 2MW, une pale a une longueur de 39 m et pèse 6.5 tonnes [09]. L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total ( $C_{mec}$ ) appliqué au rotor:

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (2.8)$$

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

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (2.9)$$

Le couple résistant du aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux f : [11]

$$C_{vis} = f \cdot \Omega_{mec} \quad (2.10)$$

### 3.2. Schéma bloc du modèle de la turbine

Une représentation globale du modèle de cette turbine utilisant le schéma bloc correspondant à cette modélisation est représentée sur la figure 2.7.

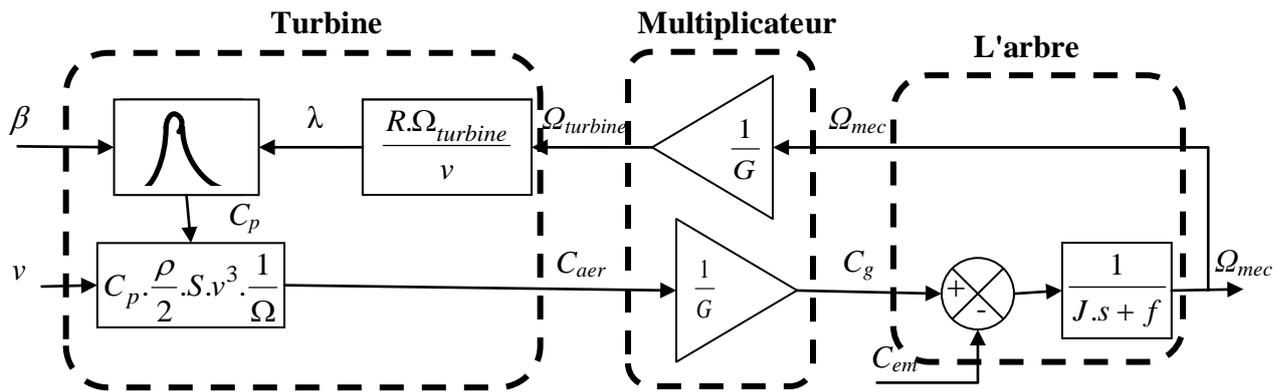
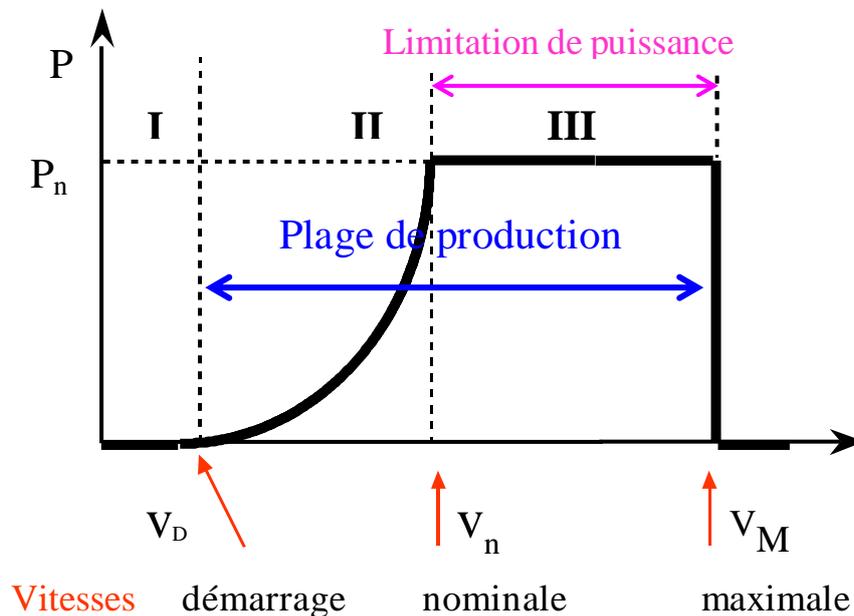


Fig. 2.7. Schéma bloc du modèle de la turbine

## 4. Stratégies de commande de la turbine éolienne

### Caractéristique puissance vitesse d'éoliennes de grande puissance



**Fig.1.8.** Caractéristique puissance vitesse typique d'une éolienne de grande puissance

On distingue trois types de fonctionnement: la phase de démarrage et le partial load ou fonctionnement à charge partielle et le full load ou fonctionnement à pleine charge.

- **Zone 1:** C'est la zone de démarrage de la machine,

- **Zone 2:** ( $\lambda_{opt}$ ,  $C_{p_{max}}$ ,  $\beta = 0$ ) : dans cette zone que l'on nomme partial load, on cherche à extraire le maximum de puissance du vent. Le contrôle vise à faire varier la vitesse de rotation de l'éolienne de manière à rester aux alentours de  $\lambda_{opt}$ . Comme l'angle de calage est fixe, le coefficient de puissance de l'éolienne est alors égal à sa valeur maximale  $C_{p_{max}}$ .

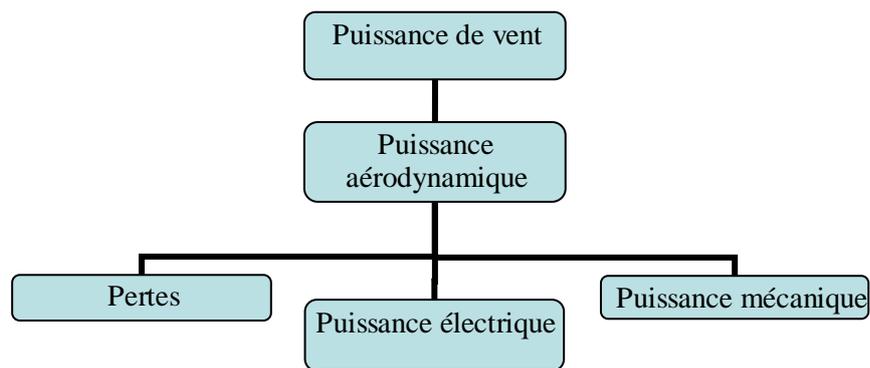
- **Zone 3:** ( $N_{nom}$ ,  $P_{nom}$ ) : Pour le full load, on cherche à maintenir constante la puissance électrique produite à sa valeur nominale en agissant sur l'angle de calage, dans cette dernière zone, la vitesse de rotation est toujours égale à sa valeur nominale mais cette fois-ci la puissance délivrée par l'éolienne a atteint sa valeur nominale. [8]

## 5. Techniques d'extraction du maximum de la puissance

### 5.1. Bilan des puissances

L'équation (2.2) quantifie la puissance capturée par la turbine éolienne. Cette puissance peut être essentiellement maximisée en ajustant le coefficient  $C_p$ . Ce coefficient étant

dépendant de la vitesse de la génératrice (ou encore du ratio de vitesse), l'utilisation d'une éolienne à vitesse variable permet de maximiser cette puissance. Il est donc nécessaire de concevoir des stratégies de commande permettant de maximiser la puissance électrique générée (donc le couple) en ajustant la vitesse de rotation de la turbine à sa valeur de référence quelque soit la vitesse du vent considérée comme grandeur perturbatrice. En régime permanent, la puissance aérodynamique  $P_{aer}$  diminuée des pertes (représentées par les frottements visqueux) est convertie directement en puissance électrique (fig. 2.9).



**Fig. 2.9.** Diagramme de conversion de puissance

Dans cette partie, nous présenterons différentes stratégies pour contrôler le couple électromagnétique (et indirectement la puissance électromagnétique convertie) afin de régler la vitesse mécanique (figure 2.4) 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

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

Dans notre travail nous nous intéressons au contrôle sans asservissement de la vitesse mécanique.

## 5.2 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 fausse 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 ou 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. [6]

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

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} = 0 = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (2.11)$$

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

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

$$C_{em-ref} = \frac{C_{aer-estimé}}{G} \quad (2.12)$$

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'équations (2.4) :

$$C_{aer-estimé} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine-estimé}} \cdot v_{estimé}^3 \quad (2.13)$$

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

$$\Omega_{turbine-estimé} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (2.14)$$

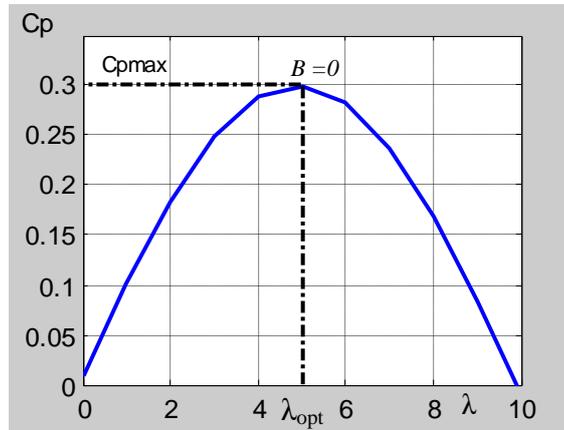
La mesure de la vitesse du vent apparaissant au niveau de la turbine étant délicate, une estimation de sa valeur peut être obtenue à partir de l'équation (2.15)

$$v_{estimé} = \frac{\Omega_{turbine-estimé} \cdot R}{\lambda} \quad (2.15)$$

En regroupant ces quatre équations  $R_{c0}$ ,  $R_{c1}$ ,  $R_{c2}$ ,  $R_{c3}$ , on obtient une relation globale de contrôle:

$$C_{em-ref} = \frac{C_p}{\lambda^3} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5}{2} \cdot \frac{\Omega_{mec}}{G^3} \quad (2.16)$$

Pour extraire le maximum de la puissance générée, il faut fixer le ratio de vitesse à la valeur  $\lambda_{Cpmax}$  qui correspond au maximum du coefficient de puissance  $C_{pmax}$  (figure 2.9).



**Fig.2.10.** Coefficient de puissance en fonction de ratio de vitesse

Le couple électromagnétique de référence doit alors être réglé à la valeur suivante : [11]

$$C_{em-ref} = \frac{C_p}{\lambda_{Cpmax}^3} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5}{2} \cdot \frac{\Omega_{mec}^2}{G} \quad (2.17)$$

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

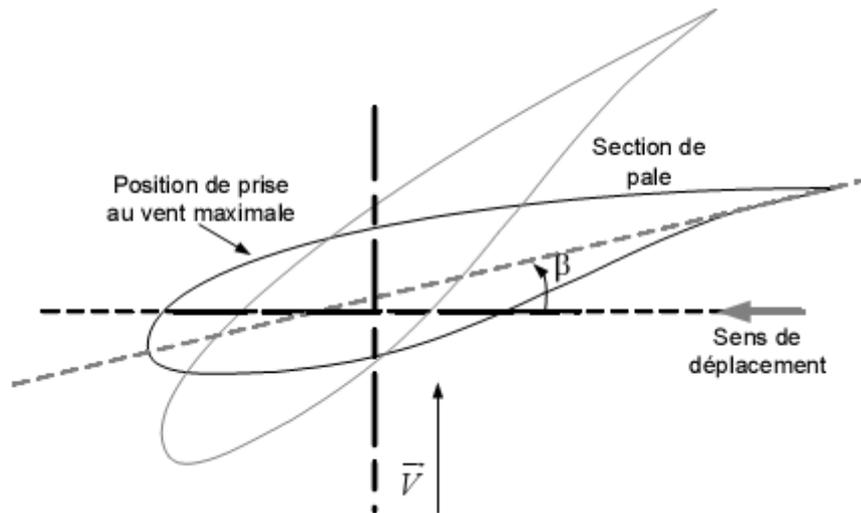
$$C_{em-ref} = A \cdot \Omega_{mec}^2$$

Avec :

$$A = \frac{C_p}{\lambda_{Cpmax}^3} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5}{2} \cdot \frac{1}{G^3} \quad (2.18)$$

## 6. Système d'orientation des pales

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". (Fig.2.11).



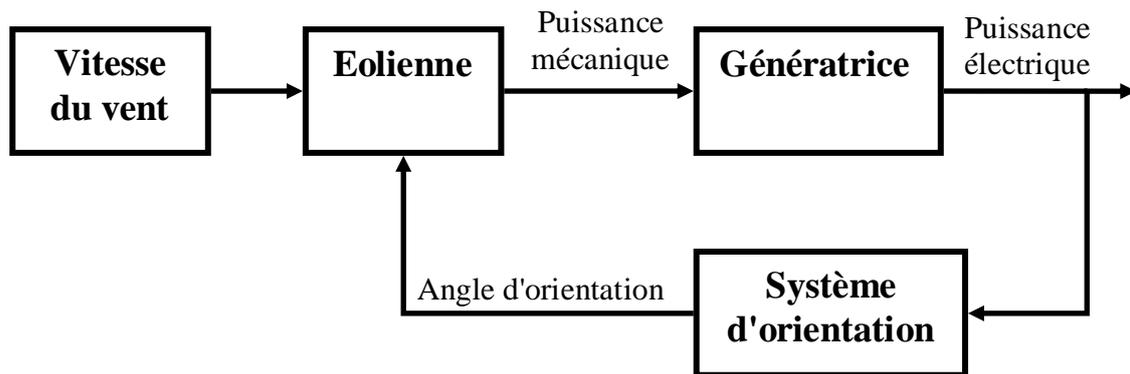
**Fig.2.11.** Variation de l'angle de calage d'une pale

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 grader le coefficient de puissance. Elles atteignent la position "en drapeau" à la vitesse maximale  $V_{\max}$ .

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 (figure.2.12).



**Fig.2.12.** système d'orientation des pales

## 7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une étude de modélisation et de commande de la turbine. Dans l'objectif de modélisation nous avons décrit le modèle simplifié de différents composants de la turbine (multiplicateur, arbre, turbine). Ainsi que pour la commande de la turbine nous avons identifié trois zones de fonctionnement: une zone d'optimisation de la conversion énergétique, une zone de limitation de la puissance produite et une zone intermédiaire.

La dernière partie de ce chapitre a fait l'objet d'une étude permettant d'illustrer la principale méthode de contrôle de la puissance aérodynamique recueillie par la turbine et ainsi limiter cette puissance lorsque le vent devient trop élevé.

Dans le chapitre suivant, nous avons étudié le modèle de la machine à double alimentation et leur commande.

## 1. Introduction

La modélisation de la machine électrique est une étape primordiale de son développement. Les progrès de l'informatique et du génie des logiciels, permettant de réaliser des modélisations performantes et d'envisager l'optimisation des machines électriques.

Le modèle classique de la machine asynchrone correspondant au schéma monophasé équivalent, n'est valable qu'en régime sinusoïdale à fréquence fixe au stator, pour étudier son comportement à une fréquence variable et avec des signaux fournis par les convertisseurs statiques qui ne sont pas sinusoïdaux, il faut faire appel à un modèle plus compliqué; on considère que chaque armature triphasée statorique et rotorique peut être représentée par une armature diphasée équivalente à l'aide de la transformation de PARK, chaque armature diphasée est donc représentée par deux enroulements identiques placés sur deux axes en quadrature, tout en tenant compte des hypothèses simplificatrices suivantes:

- La machine est de construction parfaitement symétrique;
- Même nombre des phases entre le stator et le rotor;
- Répartition sinusoïdale des champs magnétiques de chaque bobinage, le long de l'entrefer;
- L'absence de saturation dans le circuit magnétique. [7]

La commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation est une solution plus attractive pour des applications à haute performance comme l'entraînement à vitesse variable et les systèmes de génération de l'énergie électrique. En général la commande vectorielle peut être présentée selon deux méthodes, l'une est appelée directe est due à Blaschke, et l'autre appelée méthode indirecte a été développée par Hasse, nos études sont basées sur cette dernière méthode à cause de sa facilité à réaliser avec un simple contrôle, ainsi sa robustesse. [12]

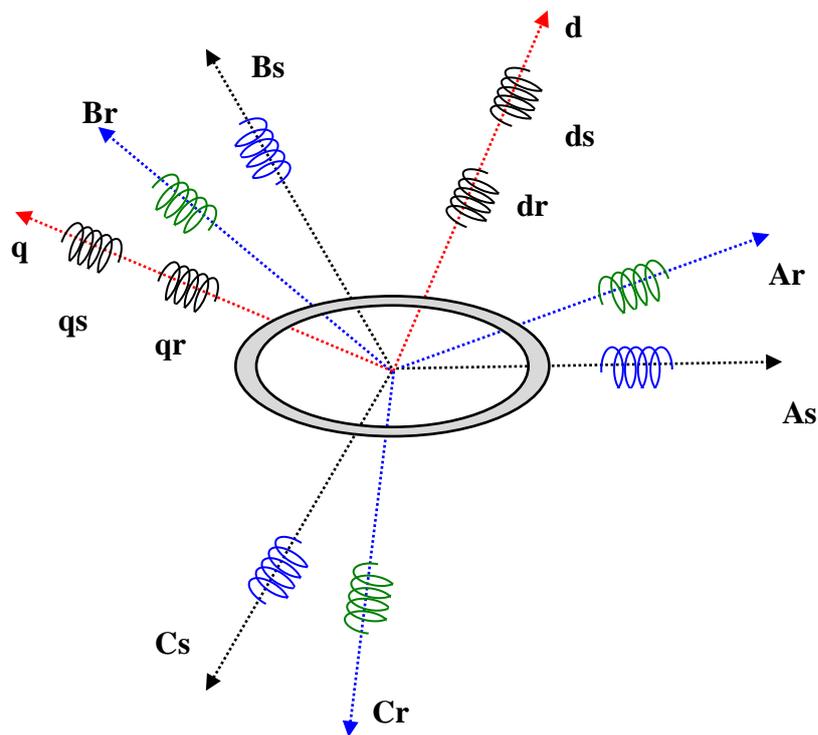
Dans ce chapitre on va présenter la modélisation de machine asynchrone à double alimentation, ainsi que la commande vectorielle.

## 2. Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

### 2.1. Représentation de la MADA dans le système triphasé et biphasé

La machine asynchrone à double alimentation est formée d'un stator fixe, et d'un rotor cyclique mobile. Le stator a trois enroulements couplés en étoile ou en triangle alimenté par un système triphasé de tension, il résulte alors la création d'un champ magnétique glissant dans l'entrefer de la machine, (THÉORÈME DE FERRARIS). La vitesse de glissement de ce champ par rapport au stator est  $\Omega_s = w_s/p$ , ou  $w_s$  désigne la pulsation de réseau d'alimentation et  $p$  le nombre de paire de pôles. Le rotor de la machine supporte un bobinage triphasé avec un même nombre de paire de pôles que celui du stator couplé en étoile.

La machine asynchrone à double alimentation doit être représentée dans le système triphasé et biphasé par la figure (3.1)



**Fig. 3.1** . Représentation de la MADA dans le système biphasé et triphasé

## 2.2. Les équation électrique de la MADA

A partir de la loi de Faraday, on a :

$$\frac{d\Phi}{dt} = V - R.i \quad (3.1)$$

On applique cette relation sur l'enroulement triphasé du stator et de rotor on trouve:

- pour le stator :

$$\begin{cases} V_{sa} = R_s.i_{sa} + \frac{d\Phi_{sa}}{dt} \\ V_{sb} = R_s.i_{sb} + \frac{d\Phi_{sb}}{dt} \\ V_{sc} = R_s.i_{sc} + \frac{d\Phi_{sc}}{dt} \end{cases} \quad (3.2)$$

- pour le rotor :

$$\begin{cases} V_{ra} = R_r.i_{ra} + \frac{d\Phi_{ra}}{dt} \\ V_{rb} = R_r.i_{rb} + \frac{d\Phi_{rb}}{dt} \\ V_{rc} = R_r.i_{rc} + \frac{d\Phi_{rc}}{dt} \end{cases} \quad (3.3)$$

## 2.3. Les équations magnétiques sous forme matricielle

Les équations magnétiques sont données par les expressions suivantes :

$$\begin{bmatrix} \Phi_s \\ \Phi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [l_s] & [M_{sr}] \\ [M_{sr}] & [l_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Tel que :

$$\begin{bmatrix} \Phi_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_{SA} \\ \Phi_{SB} \\ \Phi_{SC} \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} \Phi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_{rA} \\ \Phi_{rB} \\ \Phi_{rC} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} i_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} i_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix}$$

$$[l_s] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix}$$

$$[l_r] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix}$$

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

Cette dernière matrice est nommée inductance mutuelle entre le rotor et le stator.

## 2.4. L'équation mécanique

$$C_e - C_r = j \frac{d\omega_m}{dt} \Rightarrow \dot{\omega} = \frac{1}{j} \cdot (C_e - C_r) \quad (3.5)$$

Les équations différentielles décrivent le fonctionnement de cette machine sont en fonction de  $\theta_r$  (système à résolution différentielles).

L'application de la transformation de park, s'avère nécessaire, cette dernière appliquée aux courants, tensions, et aux flux pour obtenir des équations différentielles à des coefficients constants.

## 2.5. Choix de référentiel

Nous avons trois orientations possibles du repère d-q : [10]

- 1- repère d-q lié au stator :  $\dot{\theta}_{coord} = 0$  et  $\omega_r = -\omega_m$  ;
- 2- repère d-q lié au rotor :  $\dot{\theta}_{coord} = \omega_m$  et  $\omega_r = 0$  ;
- 3- repère d-q lié au champ tournant :  $\dot{\theta}_{coord} = \omega_s$  et  $\omega_r = \omega_s - \omega_m$  .

En générale le dernier est utilisé pour réaliser le contrôle vectoriel du fait que les grandeurs de réglage deviennent continues. Le système d'axe lié au champ tournant à l'avantage qu'avec une alimentation sinusoïdale les grandeurs variables sont traitées comme des grandeurs continues, [5]

Ainsi que ce référentiel est le seul qui n'introduit pas de simplification dans la formulation des équations, il est très intéressant dans les problèmes où la fréquence d'alimentation est constante ce qui simplifie considérablement les calculs. [9]

En plus, le choix d'un tel référentiel approprié pour la modélisation repose sur la stratégie de commande appliquée et les grandeurs à commander.[5]

## 2.6. Transformation de PARK

La transformation de Park consiste à appliquer aux courants, tensions, et aux flux un changement de variable faisant intervenir l'angle entre l'axe d'une phase ( $V_a$ ) statorique et le système d'axe (d-q), elle est définie par,

$$[A_P] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

L'angle  $\theta$  dans la matrice de Park  $[A_P]$  prend la valeur ( $\theta_s$ ) pour les grandeurs statoriques et ( $\theta_s - \theta_r$ ) pour les grandeurs rotoriques.

D'autre part:

$$[A_P]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

## 2.7. Application de la transformation de PARK

En application la transformation de Park aux équation de la machine asynchrone à double alimentation dans le repère quelconque (équation (3.2), (3.3)).

Alors le modèle de la machine est obtenu en tenant compte des composantes homopolaire sous la forme suivant :

$$[A_P]^{-1} \cdot [V_{dqo}] = [R] [A_P]^{-1} \cdot [i_{dqo}] + \frac{d}{dt} [A_P]^{-1} \cdot [\Phi_{dqo}] \quad (3.8)$$

$$[A_P] [V_{dqo}] = [R] [i_{dqo}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{dqo}] + \left[ \frac{d}{dt} \cdot [A_P]^{-1} \cdot [\Phi_{dqo}] \right] \quad (3.9)$$

$$[A_P] \left[ \frac{d}{dt} \cdot [A_P]^{-1} \right] = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \left[ \frac{d\theta}{dt} \right] \quad (3.10)$$

Tel que :

$\theta = \theta_s$  : pour les grandeurs statoriques

$\theta = \theta_s - \theta_r$  : pour les grandeurs rotoriques

En remplaçant la relation (3.10) dans (3.9) on obtient le modèle biphasé équivalent suivant :

$$\begin{cases} V_d = R.i_d + \frac{d\Phi_d}{dt} - \frac{d\theta}{dt} \Phi_q \\ V_q = R.i_q + \frac{d\Phi_q}{dt} + \frac{d\theta}{dt} \Phi_d \\ V_o = R.i_o + \frac{d\Phi_o}{dt} \end{cases} \quad (3.11)$$

**Remarque** la composante homopolaire du système (3.11) est de valeur nulle pour un système équilibré ; à partir de ce qui précède on tire les équations suivantes :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s.i_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \omega_s \cdot \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s.i_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + \omega_s \cdot \Phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r.i_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_m) \cdot \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r.i_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_m) \cdot \Phi_{dr} \end{cases} \quad (3.12)$$

L'équation (3.12) représente le modèle de la machine asynchrone à double alimentation dans le repère (d,q) lié au champ tournant.

En appliquant la transformation de Park pour établir les relations entre les flux d'axes (d,q,o) et ceux des axes (a,b,c) on obtient :

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \Phi_{dqos} \end{bmatrix} = [A_p] \begin{bmatrix} \Phi_s \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \Phi_{dqor} \end{bmatrix} = [A_p] \begin{bmatrix} \Phi_r \end{bmatrix} \end{cases} \quad (3.13)$$

Au stator :

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \Phi_{dqos} \end{bmatrix} = [A_p] \begin{bmatrix} l_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \end{bmatrix} + [M_{sr}] \begin{bmatrix} i_r \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \Phi_{dqos} \end{bmatrix} = [A_p] \begin{bmatrix} l_s \end{bmatrix} [A_p]^{-1} \begin{bmatrix} i_{dqos} \end{bmatrix} + [A_p] \begin{bmatrix} M_{sr} \end{bmatrix} [A_p]^{-1} \begin{bmatrix} i_{dqor} \end{bmatrix} \end{cases}$$

Après un calcul prolongé et fastidieux des équations (3.13) et (3.15), on obtient le système matriciel suivant :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \\ \Phi_{os} \\ \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \\ \Phi_{or} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s - M_s & 0 & 0 & 3/2(M_{sr}) & 0 & 0 \\ 0 & l_s - M_s & 0 & 0 & 3/2(M_{sr}) & 0 \\ 0 & 0 & l + 2M_s & 0 & 0 & 0 \\ 3/2(M_{sr}) & 0 & 0 & l_r - M_r & 0 & 0 \\ 0 & 3/2(M_{sr}) & 0 & 0 & l_r - M_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & l_r + 2M_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{os} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \\ i_{or} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Ou :

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

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

$L_m = 3/2M_{sr}$  : inductance mutuelle cyclique entre l'enroulement du stator et celui du rotor.

$L_{os} = l_s + 2M_s$  : inductance homopolaire statorique.

$L_{or} = l_r + 2M_r$  : inductance homopolaire rotorique.

Si on élimine la composante homopolaire du système (3.16) on obtient :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \\ \Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

### 3. Représentation du modèle de la MADA sous forme d'état

Dans ce cas, nous considérons les flux rotorique ( $\Phi_{dr}, \Phi_{qr}$ ) et les courants statoriques ( $i_{ds}, i_{qs}$ ) comme variable d'état, et les tensions ( $V_{ds}, V_{qs}, V_{dr}, V_{qr}$ ) comme variables de commande, on a donc :

$$\dot{X} = A X + B U$$

Avec :

$$X = (i_{ds}, i_{qs}; \Phi_{dr}, \Phi_{qr})$$

$$U = (V_{ds}, V_{qr}; V_{dr}, V_{qr})$$

D'après l'équation (3.17) nous avons :

$$\begin{cases} i_{dr} = \frac{1}{L_r} \Phi_{dr} - \frac{L_m}{L_r} i_{ds} \\ i_{qr} = \frac{1}{L_r} \Phi_{qr} - \frac{L_m}{L_r} i_{qs} \end{cases} \quad (3.18)$$

En remplaçant les équations (3.17) et (3.18) dans l'équation (3.12) et après le calcul et la simplification nous aurons :

$$\begin{cases} V_{ds} = i_{ds} \cdot R_s + (L_s - \frac{L_m^2}{L_r}) \cdot \frac{di_{ds}}{dt} - \omega_s (L_s - \frac{L_m^2}{L_r}) \cdot i_{qs} - \omega_s \frac{L_m}{L_r} \Phi_{qr} + \frac{L_m}{L_r} \cdot \frac{d\Phi_{dr}}{dt} \\ V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + (L_s - \frac{L_m^2}{L_r}) \cdot i_{qs} + \omega_s (L_s - \frac{L_m^2}{L_r}) \cdot i_{ds} + \omega_s \frac{L_m}{L_r} \Phi_{dr} + \frac{L_m}{L_r} \frac{d\Phi_{qr}}{dt} \\ V_{dr} = R_r \cdot \frac{L_m}{L_r} \cdot i_{ds} + \frac{R_r}{L_r} \Phi_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_m) \cdot \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot \frac{L_m}{L_r} \cdot i_{qs} + \frac{R_r}{L_r} \Phi_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_m) \cdot \Phi_{dr} \end{cases} \quad (3.19)$$

On pose :

$$\sigma = L_s(1 - (L_m^2 / L_s L_r))$$

$$T_s = L_s / R_s$$

$$T_r = L_r / R_r$$

En remplaçant  $\sigma$ ,  $T_s$ ,  $T_r$ , dans le système d'équation (19) on obtient :

$$\begin{cases} \frac{di_{ds}}{dt} = - \left[ \frac{R_s}{\sigma} + \frac{L_m^2}{L_r \cdot T_r \cdot \sigma} \right] \cdot i_{ds} + \omega_s \cdot i_{qs} + \left[ \frac{L_m}{L_r \cdot T_r \cdot \sigma} \right] \cdot \Phi_{dr} + \left[ \frac{L_m}{L_r \cdot \sigma} \right] \cdot \omega_m \cdot \Phi_{qr} + \frac{1}{\sigma} V_{ds} - \left[ \frac{L_m}{L_r \cdot \sigma} \right] \cdot V_{dr} \\ \frac{di_{qs}}{dt} = -\omega_s \cdot i_{ds} - \left[ \frac{R_s}{\sigma} + \frac{L_m^2}{L_r \cdot T_r \cdot \sigma} \right] \cdot i_{qs} - \left[ \frac{L_m}{L_r \cdot \sigma} \right] \cdot \omega_m \cdot \Phi_{dr} + \left[ \frac{L_m}{L_r \cdot T_r \cdot \sigma} \right] \cdot \Phi_{qr} + \frac{1}{\sigma} V_{qs} - \left[ \frac{L_m}{L_r \cdot \sigma} \right] \cdot V_{qr} \\ \frac{d\Phi_{dr}}{dt} = \frac{L_m}{T_r} \cdot i_{ds} - \frac{1}{T_r} \cdot \Phi_{dr} + (\omega_s - \omega) \cdot \Phi_{qr} + V_{dr} \\ \frac{d\Phi_{qr}}{dt} = \frac{L_m}{T_r} \cdot i_{qs} - (\omega_s - \omega) \cdot \Phi_{qr} - \frac{1}{T_r} \cdot \Phi_{qr} + V_{qr} \end{cases} \quad (3.20)$$

Le système d'équations (3.20) sous forme matricielle est donné par :

$$\begin{bmatrix} \frac{di_{ds}}{dt} \\ \frac{di_{qs}}{dt} \\ \frac{d\Phi_{dr}}{dt} \\ \frac{d\Phi_{qr}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left[\frac{R_s}{\sigma} + \frac{L_m^2}{L_r T_r \sigma}\right] & \omega_s & \frac{L_m}{L_r T_r \sigma} & \omega_m \frac{L_m}{L_r \sigma} \\ -\omega_s & -\left[\frac{R_s}{\sigma} + \frac{L_m^2}{L_r T_r \sigma}\right] & -\omega_m \frac{L_m}{L_r \sigma} & \frac{L_m}{L_r T_r \sigma} \\ \frac{L_m}{T_r} & 0 & -\frac{1}{T_r} & \omega_s - \omega_m \\ 0 & \frac{L_m}{T_r} & -(\omega_s - \omega_m) & \frac{1}{T_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma} & 0 & \frac{L_m}{L_r \sigma} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma} & 0 & -\frac{L_m}{L_r \sigma} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix}$$

#### 4. Expression du couple

$$\text{On a: } P_a = V_{ds} \cdot i_{ds} + V_{qs} \cdot i_{qs}$$

En remplaçant les tension par leur valeurs, on obtient :

$$\begin{aligned} P_a &= R_s i_{ds}^2 + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} i_{ds} - \omega_s \Phi_{qs} i_{ds} + R_s i_{qs}^2 + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} i_{qs} + \omega_s \Phi_{ds} i_{qs} \\ P_a &= R_s (i_{ds}^2 + i_{qs}^2) + \left( \frac{d\Phi_{ds}}{dt} i_{ds} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} i_{qs} \right) + \omega_s (\Phi_{ds} i_{qs} - \Phi_{qs} i_{ds}) \end{aligned} \quad (3.21)$$

$$P_a = P_j + P_r + P_{el}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} P_j = R_s (i_{ds}^2 + i_{qs}^2) \\ P_r = \frac{d\Phi_{ds}}{dt} i_{ds} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} i_{qs} \\ P_{el} = \omega_s (\Phi_{ds} i_{qs} - \Phi_{qs} i_{ds}) \end{cases} \quad (3.22)$$

A partir de la relation qui donne l'énergie électromagnétique en fonction du couple:

$$P_{el} = \omega_s C_e \quad (3.23)$$

On distingue l'expression du couple :

$$C_e = np \cdot (\Phi_{ds} i_{qs} - \Phi_{qs} i_{ds}) \quad (3.24)$$

En plus, on peut écrire l'expression du couple en fonction des courants statorique et les flux rotorique comme suit :

$$C_e = np \cdot \frac{L_m}{L_r} (\Phi_{dr} i_{qs} - \Phi_{qr} i_{ds}) \quad (3.25)$$

Donc l'équation mécanique devient :

$$\dot{\omega}_m = \frac{1}{j} \left[ np \cdot \frac{L_m}{L_r} \cdot (\Phi_{dr} \cdot i_{qs} - \Phi_{qr} \cdot i_{ds}) - C_r \right] \quad (3.26)$$

## 5. Expressions des Puissances Active et réactive

Les expressions des la puissances active et réactive sont données par:

$$P_s = \frac{3}{2} \cdot (v_{sd} \cdot i_{sd} - v_{sq} \cdot i_{sq})$$

$$Q_s = \frac{3}{2} \cdot (v_{sq} \cdot i_{sd} - v_{sd} \cdot i_{sq}) \quad (3.27)$$

## 6. Commande d'une éolienne a la base de MADA à vitesse variable

La commande de la génératrice asynchrone à double alimentation est basée sur trois fonctions :

1. l'algorithme d'extraction du maximum de puissance (M.P.P.T);
2. la commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation;
3. le contrôle du convertisseur MLI.

### 6.1. Commande vectorielle de la MADA

"La commande à flux oriente" appliquée aux moteurs électriques est utilisée pour obtenir le mode de fonctionnement recherché en positionnant d'une manière optimale les vecteurs courants et les vecteurs flux résultants.

De nombreuses variantes de ce principe de commande ont été présentées dans la littérature, que l'on peut classifier suivant l'orientation du repère (d-q) sur:

- le flux rotorique;
- le flux statorique;
- le flux d'entrefer.

Suivant la détermination de la position du flux:

- Directe par mesure ou observation du vecteur flux (module, phase)
- Indirecte par contrôle de la fréquence du glissement.

Dans le cadre de cette mémoire, nous utilisons la commande vectorielle de la génératrice asynchrone à double alimentation avec orientation du repère (d-q) suivant le flux statorique.

Cette dernière se décompose en trois parties:

- le contrôle du flux;

- le contrôle des courants statoriques;
- le découplage ou compensation.

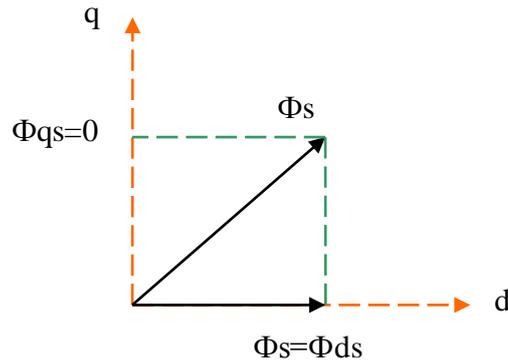
## 6.2 Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique

La Commande par orientation du flux consiste à régler le flux par une composante du courant et le couple par une autre composante. Pour cela, il faut choisir un système d'axe d-q et une loi de commande assurant le découplage du couple et du flux [10].

Or, le couple est donné par:

$$C_e = np \cdot \frac{L_m}{L_r} (\Phi_{dr} \cdot i_{qs} - \Phi_{qr} \cdot i_{ds})$$

Pour simplifier la commande il est nécessaire de faire un choix judicieux de référentiel. Pour cela, on se place dans un référentiel d-q lié au champ tournant avec une orientation du flux statorique (l'axe d aligné avec la direction du flux statorique) comme le montre la Fig.3.3.



**Fig.3.2.** Orientation de flux statorique

La particularité de la MADA est qu'elle possède deux courants à contrôler directement à savoir  $i_{rq}$ ,  $i_{sq}$ , et deux courants contrôlés indirectement  $i_{qr}$ ,  $i_{qs}$ .

On rappelle d'abord le système d'équations différentielles de la machine :

$$\frac{d\Phi_{ds}}{dt} = V_{ds} \cdot R_s \cdot i_{ds} + \Phi_{qs} \cdot \omega_S \quad (3.28)$$

$$\frac{d\Phi_{qs}}{dt} = V_{qs} - R_s \cdot i_{qs} - \Phi_{ds} \cdot \omega_S \quad (3.29)$$

$$\frac{d\Phi_{dr}}{dt} = V_{dr} - R_r \cdot i_{dr} + \omega_r \cdot \Phi_{qr} \quad (3.30)$$

$$\frac{d\Phi_{qr}}{dt} = V_{qr} - R_r \cdot i_{qr} - \omega_r \cdot \Phi_{dr} \quad (3.31)$$

En orientant un des flux, le modèle obtenu de la MADA se simplifie et le dispositif de commande qui en résulte l'est également. Un contrôle vectoriel de cette machine a été conçu en orientant le repère de Park pour que le flux statorique suivant l'axe q soit constamment nul:  $\Phi_{qs} = 0$ . [4]

Une simplification des équations de la machine asynchrone (au stator et rotor) est obtenue en supposant les composantes homopolaires nulles:

$$\frac{d\Phi_{ds}}{dt} = V_{ds} - R_S \cdot i_{ds} \quad (3.32)$$

$$V_{qs} = R_S \cdot i_{qs} + \omega_S \cdot \Phi_{ds} \quad (3.33)$$

$$\frac{d\Phi_{dr}}{dt} = V_{dr} - R_r \cdot i_{dr} + \omega_r \cdot \Phi_{qr} \quad (3.34)$$

$$\frac{d\Phi_{qr}}{dt} = V_{qr} - R_r \cdot i_{qr} - \omega_r \cdot \Phi_{dr} \quad (3.35)$$

A partir des équations des composantes directe et quadrature du flux statoriques (relations.3.18), on obtient les expressions suivantes des courants statoriques:

$$i_{qs} = -\frac{L_m}{L_S} \cdot i_{qr} \quad (3.36)$$

$$i_{ds} = \frac{\Phi_{ds} - L_m \cdot i_{dr}}{L_S} \quad (3.37)$$

Ces courants statoriques sont remplacés dans les équations des composantes directe et quadrature des flux rotoriques (équation 3.17):

$$\Phi_{dr} = \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_S}\right) \cdot i_{dr} + \frac{L_m}{L_S} \cdot \Phi_{ds} = L_r \cdot \sigma \cdot i_{dr} + \frac{L_m}{L_S} \cdot \Phi_{ds} \quad (3.38)$$

$$\Phi_{qr} = L_r \cdot i_{qr} - \frac{L_m^2}{L_S} \cdot i_{qr} = L_r \cdot \sigma \cdot i_{qr} \quad (3.39)$$

$\sigma$  est le coefficient de dispersion entre les enroulements d et q :

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_S \cdot L_r}$$

En remplaçant les expressions des composantes directes et quadrature des courants statoriques (3.36 et 3.37) dans les équations (3.32 et 3.33), puis les expressions des composantes directes et quadrature des flux rotoriques (3.38 et 3.39) dans les équations (3.34 et 3.35), on obtient:

$$V_{ds} = \frac{R_S}{L_S} \cdot \Phi_{ds} - \frac{R_S}{L_S} \cdot L_m \cdot i_{dr} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} \quad (3.40)$$

$$V_{qs} = -\frac{R_S}{L_S} \cdot L_m \cdot i_{qr} + \omega_S \cdot \Phi_{ds} \quad (3.41)$$

$$V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + L_r \cdot \sigma \cdot \frac{di_{dr}}{dt} + \frac{L_m}{L_S} \cdot \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - L_r \cdot \omega_r \cdot \sigma \cdot i_{qr} \quad (3.42)$$

$$V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + L_r \cdot \sigma \cdot \frac{di_{qr}}{dt} + L_r \cdot \sigma \cdot \omega_r \cdot i_{dr} + \omega_r \cdot \frac{L_m}{L_S} \cdot \Phi_{ds} \quad (3.43)$$

Les équations rotoriques (3.30 et 3.31) permettent de déterminer les courants rotoriques:

$$\frac{di_{dr}}{dt} = \frac{1}{L_r \cdot \sigma} (V_{dr} - R_r \cdot i_{dr} + \omega_r \cdot L_r \cdot \sigma \cdot i_{qr} - \frac{L_m}{L_S} \cdot \frac{d\Phi_{ds}}{dt}) \quad (3.44)$$

$$\frac{di_{qr}}{dt} = \frac{1}{L_r \cdot \sigma} (V_{qr} - R_r \cdot i_{qr} - \omega_r \cdot L_r \cdot \sigma \cdot i_{dr} - \omega_r \cdot \frac{L_m}{L_S} \cdot \Phi_{ds}) \quad (3.45)$$

En notant les f.e.m suivantes:

$$e_d = -L_r \cdot \omega_r \cdot \sigma \cdot i_{qr} + \frac{L_m}{L_S} \cdot \frac{d\Phi_{ds}}{dt} \quad (M_{ed})$$

$$e_\Phi = \omega_r \cdot \frac{L_m}{L_S} \cdot \Phi_{ds} \quad (M_{e\Phi})$$

$$e_q = L_r \cdot \omega_r \cdot \sigma \cdot i_{dr} \quad (M_{eq})$$

On obtient,

$$\frac{di_{dr}}{dt} = \frac{1}{L_r \cdot \sigma} (V_{dr} - R_r \cdot i_{dr} - e_d) \quad (3.46)$$

$$\frac{di_{qr}}{dt} = \frac{1}{L_r \cdot \sigma} (V_{qr} - R_r \cdot i_{qr} - e_q - e_\Phi) \quad (3.47)$$

Le couple a pour expression

$$C_{em} = P.(\Phi_{ds}.i_{qs} - \Phi_{qs}.i_{ds}) \quad (3.48)$$

Avec une orientation du flux statorique et elle que  $\Phi_{qs}=0$ , on obtient une expression simplifiée

$$C_{em} = P.\Phi_{ds}.i_{qr} \quad (3.49)$$

Le courant  $i_{qs}$  ne pouvant être directement contrôlé, en utilisant l'équation (4.24), on fait apparaître la composante en quadrature du courant rotorique dans l'expression du couple électromagnétique :

$$C_{em} = -P.\frac{L_m}{L_S}.\Phi_{ds}.i_{qr}$$

## 7. Conclusion

L'étude de modélisation nous a permis d'élaborer un modèle mathématique simple et adéquat pour commander la machine asynchrone à double alimentation.

Le modèle de la MADA dans le référentiel lié au champ tournant nous a permis l'analyse de cette machine en régime temporel. Ce choix de référentiel repose sur la stratégie de commande appliquée et les grandeurs à commander.

Dans ce chapitre, nous avons vu que la génératrice asynchrone à double alimentation triphasée a été ramenée à une génératrice biphasée équivalente à l'aide d'une transformation de PARK.

Pour contrôler la MADA nous avons utilisé une loi de commande vectorielle directe par un système d'orientation de flux statorique.

Cette commande qui ramène les équations de modèle de la machine en deux équations permet de faciliter la commande de la machine à double alimentation.

Le chapitre suivant est consacré aux résultats de simulation du système aérogénérateur à la base de la machine à double alimentation.

## 1. Introduction

A partir de l'étude de modélisation du système de génération complet (turbine, GADA) et leur structure de commande il est intéressant de réaliser une simulation numérique sous l'environnement Matlab/Simulink du système complète, afin d'analyser et interpréter ces résultats obtenus.

Dans l'objectif de tester la robustesse de la commande utilisée au niveau de la turbine ainsi que au niveau de la GADA nous avons utilisé deux profils de vent.

## 2. Schéma bloc de simulation de système complète

Les paramètres de la GADA et la turbine sont donnés par le tableau suivant

Paramètre de la GADA	Signification
$R = 35.25$	Rayon de l'éolienne en (m)
$G = 90$	Gain de multiplicateur de vitesse
$R_s = 0.012$	Résistance statorique ( $\Omega$ )
$R_r = 0.021$	Résistance rotorique ( $\Omega$ )
$L_{os} = 2.0372 * 10^{-4}$	Inductance de fuite statorique (H)
$L_{or} = 1.7507 * 10^{-4}$	Inductance de fuite rotorique (H)
$M = 0.0135$	Mutuelle inductance (H)
$L_s = M + L_{os}$	Inductance statorique (H)
$L_r = M + L_{or}$	Inductance rotorique (H)
$J = 50$	Inertie de l'arbre ( $\text{kg.m}^2$ )
$f = 0.0024$	Coefficient de frottement
$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s.L_r}$	Coefficient de dispersion
$p = 2$	Nombre de paire de pôles
$T_s = \frac{L_s}{R_s}$	Constante de temps statorique (s)
$T_r = \frac{L_r}{R_s}$	Constante de temps statorique (s)
$P = 1,5$	La puissance nominale (w)
$\Phi_{ref} = 1$	Le flux de référence

Tableau.4.1. Paramètre de la machine et la turbine

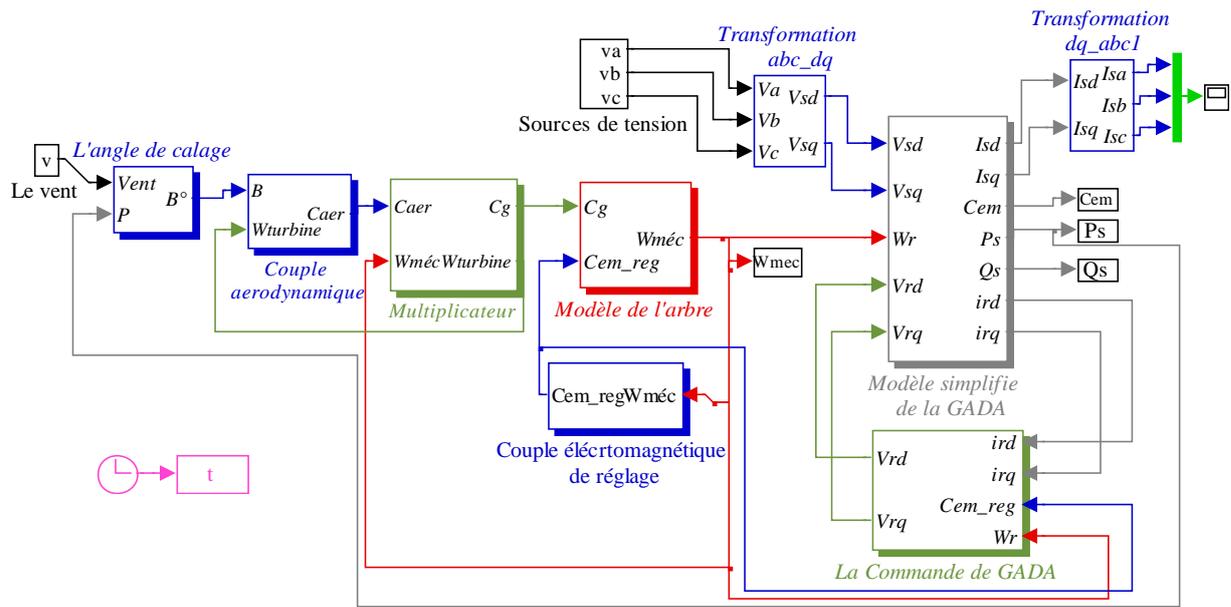


Fig.4.2. Schéma bloc de système complet

### 3. Résultats de simulation

Cette structure de commande a été simulée en considérant un profil de vent moyen autour de (12.5m/s) (figure4.3). Nous montrons les résultats obtenus pour la stratégie de commande utilisée.

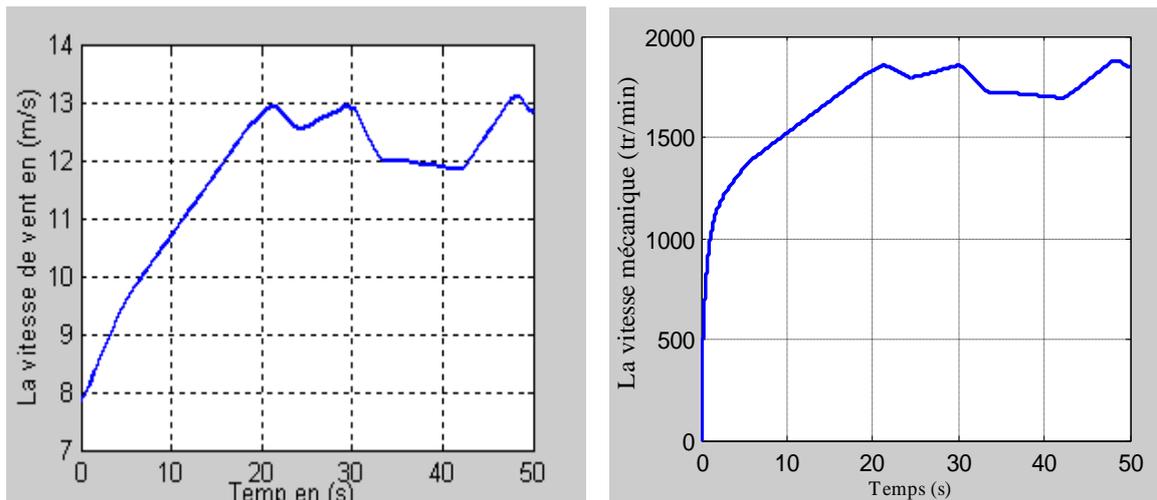
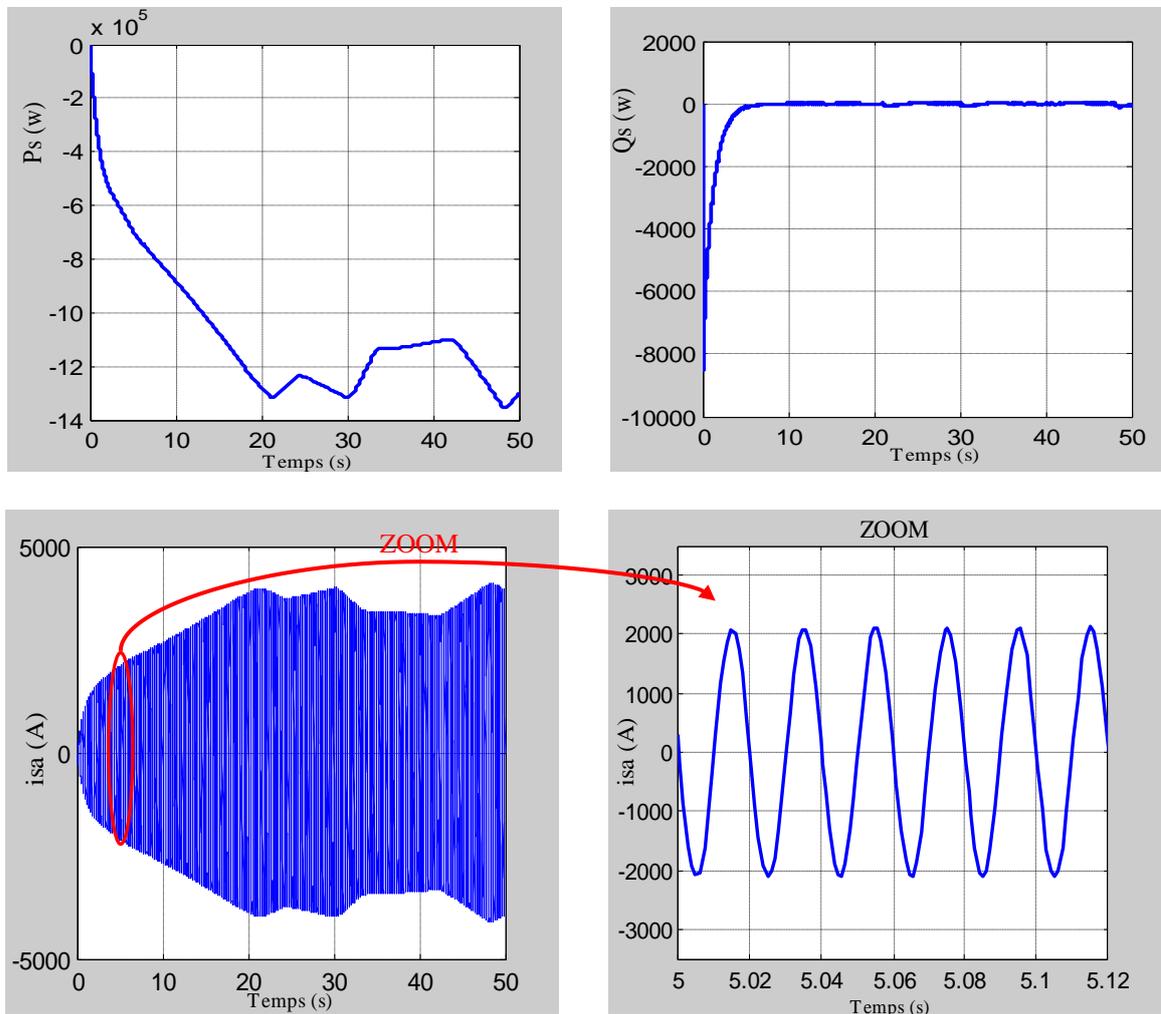
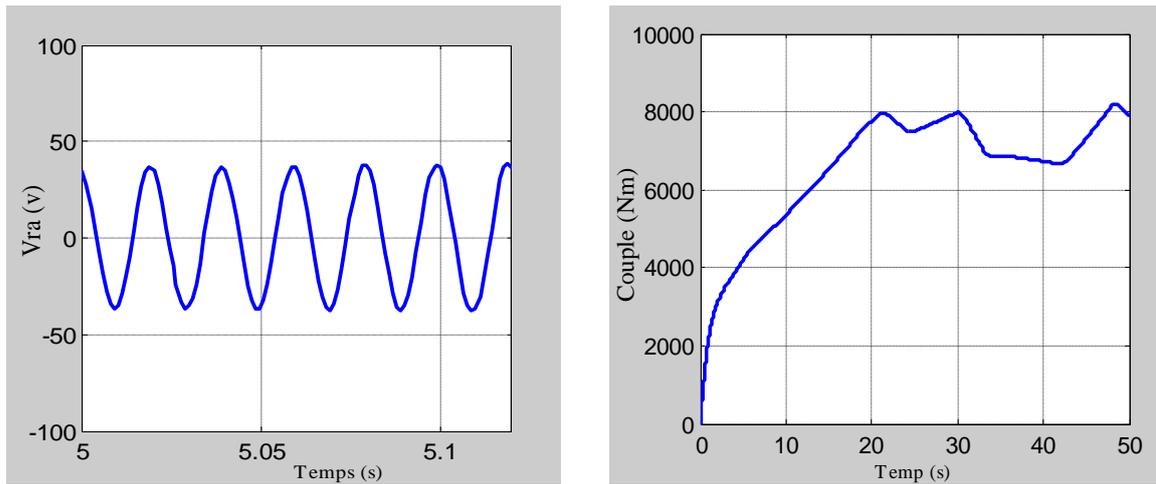


Fig.4.3. Profil de vent appliqué et la vitesse mécanique

D'après les résultats obtenus par simulation on constate que la puissance active de même forme que le profil de vent appliqué ainsi que la puissance réactive est nulle. 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. La puissance électromagnétique convertie en puissance électrique active produite est très fluctuante. Cette puissance sera comptabilisée négativement car elle s'oppose à la puissance aérodynamique. On obtient une forme de courant et de tension qui loupé est parfaitement sinusoïdal avec une amplitude évolue de la même forme que le profil du vent utilisé

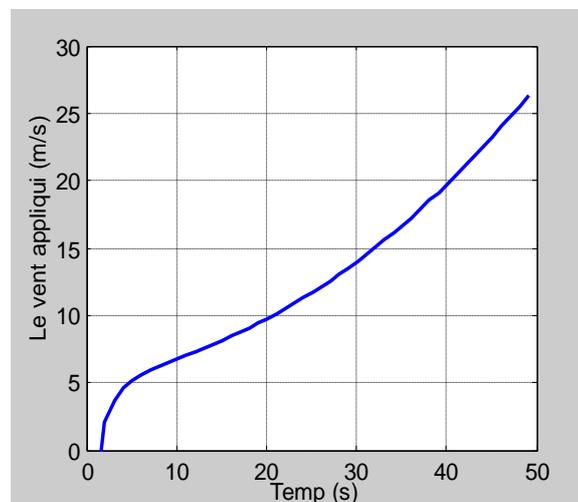




**Fig.4.3.** Résultat obtenu par la simulation

#### 4. Résultats de simulation pour les trois zones de fonctionnement

Pour valider le système de régulation de système, nous avons appliqué à la turbine un profil de vent à une vitesse croissante qui évolue de 0 à 27m/s (figure4.7). (Valeur permettant d'avoir environ 1.5MW, figure.4.4).



**Fig.4.4.** profil de vent utilisée

Nous présentons sur la figure 2.18, l'évolution temporelle de la puissance électrique (active et réactive) et celle du coefficient de puissance et le courant statorique. 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 1.5MW, lorsque le vent est supérieur à 18 m/s. (à  $t=17$  s). Le coefficient de puissance décroît en fonction du ratio de vitesse et sa nulle Lorsque le vent passe au maximum (22 m/s).

On obtient aussi une forme d'onde de courant et de tension parfaitement sinusoïdal. (figure.4.5)

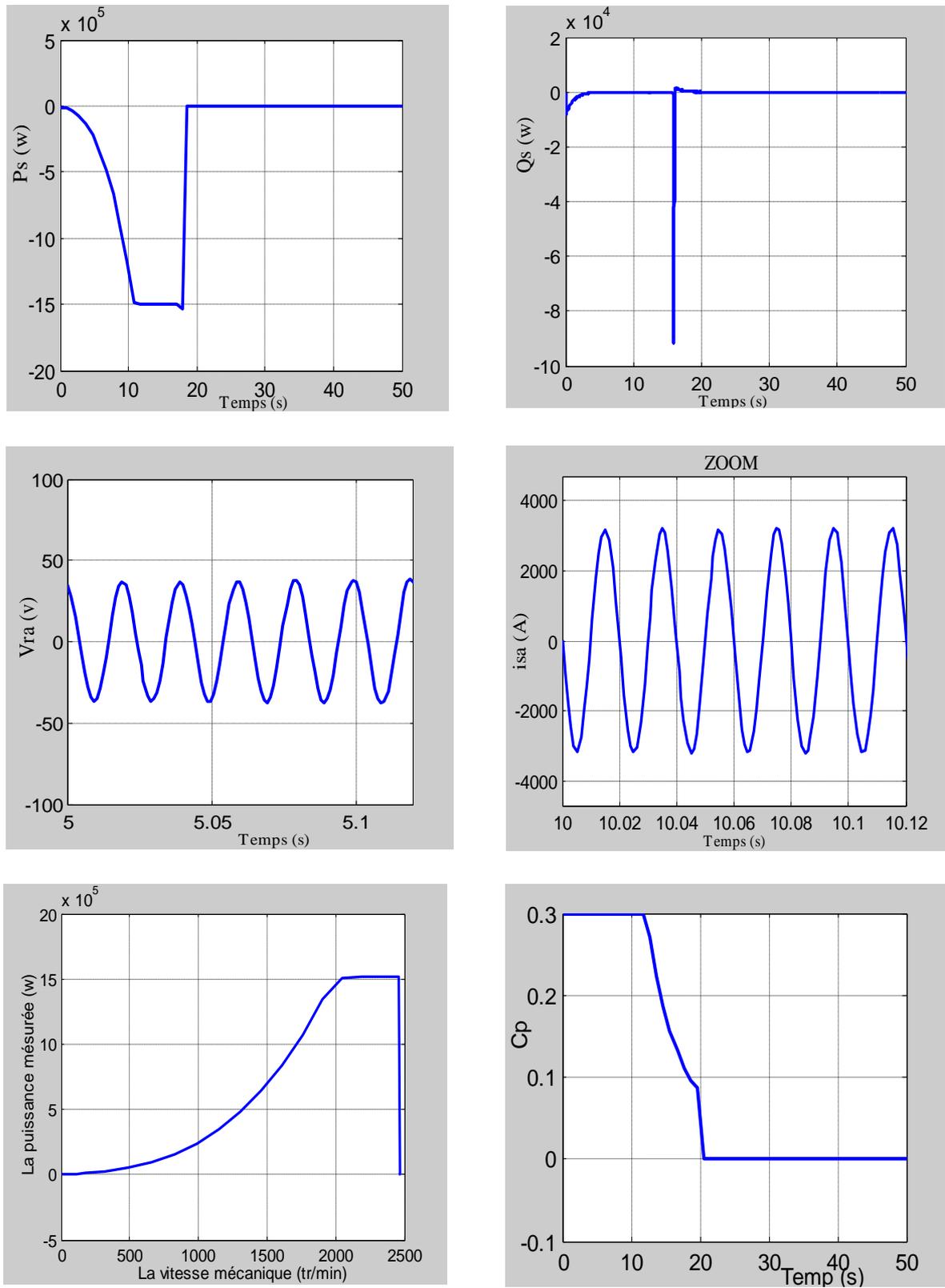


Fig.4.5. Résultat de simulation pour les trois zone de fonctionnement

## **5. Conclusion**

Les résultats obtenus montrent les hautes performances et la robustesse des algorithmes de contrôle appliqués au niveau de la turbine, tel que celui de maximisation et de limitation de la puissance générée par le système complète, ainsi que au niveau de la GADA tel que la commande vectorielle qui permet d'obtenir un fonctionnement a un facteur de puissance unitaire.

# *Conclusion générale*

Ce mémoire est consacré à la modélisation et commande de la génératrice asynchrone à double alimentation.

Nous avons commencé par l'étude de la modélisation de la turbine et on adapté un algorithme pour le système de limité et d'extraction le maximum de la puissance aérodynamique puis on a établi le modèle de la génératrice asynchrone à double alimentation, afin de réaliser un système de commande de l'ensemble GADA, par des algorithmes de commande appropriés à chaque partie de système de génération sous l'environnement MATLAB/Simulink.

Les résultats obtenus montrent le fort couplage entre le flux et le couple électromagnétique. Ceci nous a conduit à introduire une commande découplée. Il s'agit de la commande vectorielle par orientation du flux statorique.

Ainsi que, l'étude en régime permanent, et la recherche bibliographique sur la GADA, menées aussi bien sur les plans théorique que simulation, ont permis de montrer que :

- ✚ La GADA est bien adaptée aux systèmes de génération électrique, surtout dans les systèmes éoliens à vitesse variable;
- ✚ L'avantage principal offert par la GADA, est que le convertisseur de puissance associé au rotor ne traite qu'une fraction de 20-30% de toute la puissance du système, ce qui permet de minimiser les pertes et réduire les dimensions de ce dernier. Par conséquent, le coût de production est aussi réduit;
- ✚ Les grandeurs électriques du stator et du rotor de la GADA sont des grandeurs mesurables, ce qui facilite l'implémentation des différents algorithmes de commande.

Finalement, il va sans dire que la GADA a un pouvoir d'application très vaste dans les applications de production de l'énergie électrique, notamment dans les systèmes éoliens à vitesse variable.

## LISTE DES SYMBOLES ET D 'ABREVIATIONS

<b>MADA</b>	: Machine asynchrone à double alimentation.
<b>GADA</b>	: Génératrice asynchrone à double alimentation.
<b>M.L.I</b>	: Modulation de largeur d'impulsions.
$V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}$	: Tensions simples triphasées statoriques.
$i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$	: Courants triphasés statoriques.
$\Phi_{sa}, \Phi_{sb}, \Phi_{sc}$	: Flux propres statoriques.
$V_{ra}, V_{rb}, V_{rc}$	: Tensions rotoriques triphasées.
$i_{ra}, i_{rb}, i_{rc}$	: Courants triphasés rotoriques.
$\Phi_{ra}, \Phi_{rb}, \Phi_{rc}$	: Flux propres rotoriques.
$R_s$	: Résistance des enroulements statoriques.
$R_r$	: Résistance des enroulements rotoriques.
$l_s$	: Inductance propre d'une phase statorique.
$l_r$	: Inductance propre d'une phase rotorique.
$M_s$	: Inductance mutuelle entre deux phases du stator.
$M_r$	: Inductance mutuelle entre deux phases du rotor.
$M_{sr}$	: Inductance mutuelle maximale entre le stator et le rotor.
$L_r$	: Inductance cyclique d'un phase rotorique.
$L_s$	: Inductance cyclique d'un phase statorique.
$L_m$	: Inductance mutuelle cyclique entre l'enroulement statorique et rotorique.
$T_r$	: Constante de temps rotorique.
$T_s$	: Constante de temps statorique.
$W_r$	: Pulsation rotorique.
$W_s$	: Pulsation statorique.
$W_m$	: Pulsation mécanique
$[A_p]$	: Matrice de PARK.
$[A_p]^{-1}$	: Matrice inverse de PARK.
$i_{ds}, i_{qs}, i_{dr}, i_{qr}$	: Courants statorique et rotorique biphasés.
$\Phi_{rd}, \Phi_{rq}, \Phi_{sd}, \Phi_{sq}$	: Flux rotorique et statorique biphasée.
<b>P</b>	: Nombre de paires de pôles.
<b>J</b>	: Moment d'inertie.

---

---

$C_e$	: Couple électromagnétique.
$C_r$	: Couple résistant.
$C_{em-reg}$	: Couple électromagnétique de réglage.
$C_g$	: Couple gearbox (multiplicateur).
$C_{aer}$	: Couple aérodynamique.
$\sigma$	: Coefficient de dispersion.
$P_s$	: La puissance active.
$Q_s$	: La puissance réactive.
$P_v$	: La puissance de vent.
$P_{aer}$	: La puissance aérodynamique..

---

---

---

---

## REFEREENCE BIBLIOGRAFIQUE

- [1] **Meny Ivan**, "*Modélisation et réalisation d'une chaîne de conversion éolienne petite puissance*", Laboratoire d'électrotechnique de Montpellier (LEM), 2005.
- [2] **S KEDJOUTI et C MESSAOUDI**, "*Réglage des puissances active et réactive de la génératrice asynchrone a double alimentation par des régulateurs en mode glissant*", mémoire d'ingénieur d'état en Electrotechnique, Msila 2005.
- [3] **B.Francois, B.Robyns, S.El Aimani**, "*Modélisation de générateurs éoliens a vitesse variable connectes a un bus continu commun*", Ecole Centrale de Lille (L2EP) ,2002.
- [4] **S.El Aimani**, "*Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension*", Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lille, 2004.
- [5] **H. Camblong**, "*Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable*", thèse de Doctorat, centre de Bordeaux, 2003.
- [6] **B.Multon, G.Robin, O.Gergaud, H.Ben Ahmed**, "*Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable.*" JCGE03, Saint Nazire, 2003.
- [7] **N.Ghoul et I.Ihaddadene**, "*Réglage des puissance actives et réactive de la génératrice asynchrone a double alimentation par des régulateur PI*", Mémoire d'ingénieur d'état en Electrotechnique, Msila 2005.
- [8] **V.Rogez**, "*Modélisation simplifiée de sources de production décentralisée pour des études de dynamique des réseaux. Application à l'intégration d'une production éolienne dans un réseau de distribution insulaire*", thèse de Doctorat, L'université de Lille, 2004.
- [9] **R.Abdessamed et M.Kadjoudj**, "*Modélisation des machine électriques*", presses de l'université de Batna, 1997.
- [10] **H.Tamrabet**, "*Robustesse d'un contrôle vectoriel de structure minimale d'une Machine Asynchrone* ", thèse de magistère, Université de Annaba, 2006.
- [11] **B. Francois, F. Minne, B.Robyns, S.El. Aimani**, "*Comparison Analysis of Control Structures For Variable Speed Wind Turbine*", CESA2003 Computational Engineering in Systems applications, Lille, July 9-11, 2003.
- [12] **N.Ghedbane. et A.Medjadi**, "*Commande de la Machine Asynchrone à Double Alimentation à base d'un régulateur RST*", Mémoire d'ingénieur d'état en Electrotechnique, Msila 2005.
- 
-