

# وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJIMOKHTAR-ANNABAUNIVERSITY  
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

Année : 2018

Faculté: Sciences de l'Ingénierat  
Département: Electronique

## MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de : MASTER

### Intitulé :

**Poursuite du maximum de puissance d'une turbine à vent (MPPT) et commande avec modèle inverse sans boucle de puissance de la machine asynchrone à double alimentation(GADA)**

**Domaine : Sciences et Technologie**

**Filière : AUTOMATIQUE**

**Spécialité: AUTOMATIQUE ET INFORMATIQUE INDUSTRIELLE**

**Par :**

**SEMMAR Sara**

**DEVANT Le JURY**

Président : R.Lakal	Pr	UBM Annaba
Directeur de mémoire: Kherfane Hamid	MCA	UBM Annaba
Examineurs: M.Ramdani	Pr	UBM Annaba
Examineurs: M.Benourath	Pr	UBM Annaba

# **REMERCIEMENT:**

Avant tout, je remercie Dieu Le tout puissant de nous  
avoir donné le courage, la volonté, la patience, et la santé  
durant toutes ces longues années d'étude.

J'adresse mes sincères remerciements à tous mes enseignants  
de L'université d'Annaba, notamment à mon promoteur  
'Mr. KHERFANE Hamid' d'avoir proposé le sujet sur lequel  
j'ai travaillé, et qui a assuré la direction et l'encadrement du  
travail présenté dans ce mémoire. Je tiens notamment, à  
adresser l'expression de ma sincère reconnaissance aux  
membres du jury, pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail.

Cette page ne serait être complète sans remercier mes  
meilleurs collègues et frères sans leurs soutiens je n'aurais  
sûrement pas pu mener à bien ce mémoire.

Enfin, mes remerciements vont à tous ceux qui m'ont soutenu  
de près ou de loin à réussir ce travail.

# **DÉDICACE:**

Je dédicace

A mon père et ma mère

A mes chers parents, aux quel je n'arrivai jamais à  
exprimer ma gratitude et ma reconnaissance  
, leur soutient tout au long de mes études, leur DOUAA

Et ma famille

A toutes mes amies et mes collègues.

A tout ce qui ont suivi mon parcours universitaire et

Mon prodigué conseille et soutien moral

A tous ceux qui connaissent la valeur réelle

Du savoir.

## ملخص

الهدف من هذه الدراسة هو تطوير نموذج دقيق لتوربينات الرياح في قاعدة آلة متزامن مع وينبغي أيضا أن يكون النموذج مغناطيس دائم لاستخراج الطاقة القصوى من طاقة الرياح المقترح مناسب للتحكم في الجهاز واستخدام هذا الجهاز في إنتاج طاقة الرياح وقد تم تنفيذ النماذج المتقدمة اثنين باستخدام برنامج مطلب 'مطلب'.

### Résumé :

Le but de cette étude est de développer un modèle précis d'une éolienne à la base d'une machine synchrone à aimants permanents pour l'extraire le maximum de puissance de l'énergie du vent. Le modèle proposé devrait également être approprié pour la commande de la machine et pour utiliser cette machine dans la production d'énergie. Les deux modèles développés ont été mis en œuvre à l'aide du logiciel "Matlab".

### Abstract:

The aim of this study is to develop an accurate model of a wind turbine at the base of a synchronous machine with permanent magnets to extract maximum power from wind energy. The proposed model should also be suitable for the control of the machine and to use this machine in the production of wind energy the two developed models have been implemented using the software "Matlab".

# Table de matière

## Chapitre 01 :

### État de l'art de la conversion de l'énergie du vent

1.1 Introduction .....	1
1.2 Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	1
1.3 L'Aérogénérateur .....	1
1.4 Le Vent .....	2
1.5 Evaluation de l'énergie éolienne en Algérie .....	3
1.6 Les différents types d'éoliennes .....	4
1.6.1 Les éoliennes à axe vertical .....	4
1.6.1.1 Avantages.....	5
1.6.1.2 Inconvénient.....	5
1.6.2 Les éoliennes à axe horizontal .....	5
1.6.2.1 Avantages .....	7
1.6.2.2 Inconvénient.....	7
1.7 Principe du fonctionnement de l'éolienne.....	7
1.7.1 Principe.....	7
1.7.2 Constitution et Fonctionnement d'une éolienne.....	8
1.8 Classification des systèmes éoliens .....	9
1.9 Éléments constitutifs d'un aérogénérateur.....	10
1.10 Génératrice synchrone à aimant permanent .....	11
1.11 Principe de fonctionnement de la machine synchrone à aimants permanents.....	12
1.12 La machine synchrone à aimants permanents fonctionnement mode.....	13
1.13 Conclusion.....	13

## **Chapitre 02 :**

### **Modélisation de la turbine de l'aérogénérateur**

2.1 Introduction.....	14
2.2 Modélisation global de la chaîne de conversion de l'éolienne basse sur une MADA.....	14
2.2.1 Description du système éolien.....	14
2.2.2 Modèle de la turbine.....	15
2.2.2.1 Modèle aérodynamique.....	15
2.2.2.2 Modèle des pales.....	15
2.2.2.3 Modèle du multiplicateur de vitesse.....	17
2.2.2.4 Modèle de l'arbre mécanique.....	18
2.3 Technique d'extraction du maximum de puissance (MPPT).....	19
2.3.1 Résultats de simulation de la stratégie de commande (MPPT).....	20
2.4 Conclusion.....	22

## **Chapitre 03 :**

### **La modélisation et commande de la machine asynchrone à double alimentation**

3.1 Introduction .....	23
3.2 Stratégie de la Commande Vectorielle du Générateur Asynchrone à Double Alimentation (GADA) pour le Contrôle Indépendant des Puissances Active et Réactive.....	23
3.3 Commande Indirecte des Puissances active et réactive.....	26
3.3.1 Commande Indirecte sans Boucles des Puissances.....	26
3.3.2 Découplage par Compensation.....	27

3.3.3 Dimensionnement du Régulateur PI.....	27
3.4 Résultats de Simulation .....	30
3.4.1 Résultats de Simulation des Commandes Directe et Indirecte du GADA.....	31
3.4.1.1 Résultats de Simulation de la Commande Indirecte.....	31
3.4.1.1.1 Commande Indirecte sans Boucles des Puissances.....	31
3.5 Résultats de Simulation de la Commande Indirecte sans Boucles des Puissances à Vitesse Variable.....	31
3.6 Conclusion.....	31

Référence bibliographiques

## **LISTE DES FIGURES :**

### **Chapitre 01 : État de l’art de la conversion de l’énergie du vent**

Figure 1.1 Conversion de l’énergie cinétique du vent.....	1
Figure 1.2 Correspondance taille- puissance des éoliennes.....	2
Figure 1.3 La naissance du vent.....	3
Figure 1.4 Atlas de la vitesse moyenne du vent (en m/s) de l’Algérie estimée à 10 m du sol.....	4
Figure 1.5 Eolienne à axe vectoriel.....	5
Figure 1.6 Eolienne à axe horizontal.....	6
Figure 1.7 configuration à axe horizontal.....	7
Figure 1.8.1 principe de la conversion d’énergie.....	8
Figure 1.8.2 Exemple de système éolien de type aérogénérateur.....	9
Figure 1.9 Classification des systèmes éoliens.....	10
Figure 1.10 Eléments constitutifs d’un aérogénérateur.....	10
Figure 1.11 a) Structure à rotor interne b) structure à rotor externe.....	12

### **Chapitre 02 : Modélisation de la turbine de l’aérogénérateur**

Figure 2.1 Système de conversion éolienne à base de la MADA.....	14
--	----

Figure 2.2 Schéma explicatif de la turbine éolienne.....	15
Figure 2.3 Coefficient de puissance en fonction de la vitesse relatif.....	17
Figure 2.4 Modèle mécanique simplifié de la turbine.....	17
Figure 2.5 Schéma bloc du modèle de la turbine éolienne.....	18
Figure 2.6 Schéma bloc stratégie MPPT sans mesure de la vitesse du vent.....	20
Figure 2.7 Schéma de simulation de la stratégie MPPT sans mesure de la vitesse du vent.....	20
Figure 2.8 Modèle du profil du vent sous MATLAB/SIMULINK.....	21
Figure 2.9 Vitesse de la turbine.....	21
Figure 2.10 Vitesse mécanique de l'arbre rapide.....	21
Figure 2.11 Puissance mécanique transmise à la MADA.....	22
Figure 2.12 Coefficient de la puissance CP.....	22
Figure 2.13 Rapport de la vitesse $\lambda$ .....	22
Figure 2.14 Couple aérodynamique (rouge) et couple électromagnétique de référence (bleu) de la MADA.....	22

### **Chapitre 03 La modélisation et commande de la machine asynchrone à double alimentation**

Figure 3.1 Orientation du repère de Park.....	23
Figure 3.2 Schéma bloc du modèle simplifié de la MADA.....	25
Figure 3.3 Schéma bloc de la commande indirecte sans boucles des puissances du GADA.....	27
Figure 3.4 Schéma de régulation des courants $i_{rd}$ et $i_{rq}$ .....	28
Figure 3.5 Schéma de régulation du courant $i_{rq}$ .....	29
Figure 3.6 Puissance active statorique de la commande indirecte sans boucles des puissances....	30
Figure 3.7 Schéma de régulation du courant $i_{rd}$ .....	30
Figure 3.8 Puissance réactive statorique de la commande indirecte sans boucles des puissances....	30



## LISTE DES SYMBOLES :

$p_v$  : La puissance du vent.

$\rho$  : La masse volumique de l'air.

$S$  : La surface décrite par les pales de l'éolienne en rotation.

$V$  : Vitesse du vent.

$\lambda$  : Ratio de vitesse.

$\Omega_t$  : Vitesse de rotation de la turbine.

$R$  : Rayon de l'aérogénérateur ou la longueur des pales.

$p_{aer}$  : Puissance aérodynamique.

$C_P$  : Coefficient de puissance.

$\beta$  : Angle de l'orientation de pale.

$P_v$  : Puissance du vent.

$R$  : Longueur de pales.

$C_t$  : Couple de la turbine.

$C_m$  : Couple mécanique sur l'arbre de la MADA (N.m).

$G$  : Gain du multiplicateur.

$\Omega_m$  : Vitesse de rotation de la MADA (rad/s).

$f_v$  : Coefficient dû aux frottements visqueux de la MADA (N.m/rad/s).

$J_t$  : Moment d'inertie de la turbine (Kg.m<sup>2</sup>).

$J_m$  : Moment d'inertie de la MADA (Kg.m<sup>2</sup>).

$C_{em}$  : couple électromagnétique de la MADA.

$C_{p-max}$  : Coefficient de puissance maximal.

$C_{em-ref}$  : Couple électromagnétique de référence.



**INTRODUCTION GENERAL**

## **Introduction général :**

La production d'électricité à partir de l'énergie éolienne est l'une des méthodes qui connaît la croissance la plus rapide dans le monde. L'énergie cinétique de l'air en mouvement est transformée en électricité par des éoliennes qui sont installées à des endroits où les conditions météorologiques sont les plus propices. Les éoliennes peuvent être utilisées individuellement, mais elles sont souvent regroupées pour former des « parcs éoliens » ou des « centrales éoliennes ». L'électricité produite à partir des parcs éoliens peut servir à répondre à des besoins locaux ou à alimenter un réseau de distribution d'électricité desservant des résidences et des commerces qui sont plus éloignés. L'utilisation de cette forme d'énergie permet de réduire les effets de la production d'électricité sur l'environnement, car elle nécessite aucun combustible et ne produit aucun polluant ni gaz à effet de serre. Il est nécessaire de poursuivre l'amélioration continue des technologies pour parvenir à incorporer de grandes quantités d'énergie éolienne, à améliorer l'efficacité des éoliennes, à prolonger leur durée de vie et atténuer les problèmes d'interconnexion. Différents types de génératrices peuvent être utilisés pour convertir l'énergie mécanique produite par le mouvement de l'arbre éolien en énergie électrique avec différentes structures, vont prendre de plus en plus la prédominance sur les autres machines électriques. Notre mémoire est composée de trois principale parties la première traite l'état de l'art de la turbine, la deuxième est consacré à la modélisation de la turbine et à sa commande avec poursuite du maximum de puissance(MPPT). La troisième et consacré à la modélisation de la(MADA) et à la commande indirecte sans boucle de puissance.

**CHAPITRE I : ETAT DE L'ART DE LA  
CONVERSION DE L'ENERGIE DU VENT**

# Chapitre 01 État de l'art de la conversion de l'énergie du vent

## 1.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons la constitution générale d'un système éolien, les turbines usuelles, puis un état de l'art sur les différents types d'aérogénérateurs et leur principe de fonctionnement dans le cadre de la conversion de l'énergie éolienne. Ensuite, une description des générateurs électriques les plus utilisées actuellement est présentée.

Différentes structures utilisant la génératrice asynchrone à double alimentation sont décrites et comparées, puis une brève revue de la littérature technique concernant les stratégies de commande est présentée. Enfin, la problématique et les objectifs de la présente thèse sont explicités en fin de chapitre.

## 1.2 Conversion de l'énergie cinétique de vent :

La capacité de l'aérogénérateur à transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique de rotation a été la déduction logique et inévitable pour la production de l'énergie électrique. Cependant, il est à noter que pour l'emploi efficace de cette ressource, il est nécessaire voir indispensable d'étudier les caractéristiques aérodynamiques de la turbine utilisée.

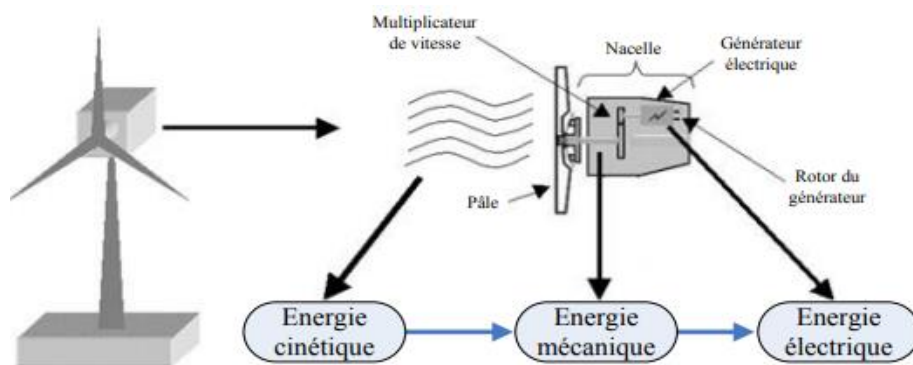


Figure 1.1. Conversion de l'énergie cinétique du vent.

## 1.3 L'Aérogénérateur :

Un aérogénérateur, appelé généralement éolienne, est un dispositif qui capte l'énergie cinétique du vent pour la transformer en une énergie mécanique disponible (mouvement

# Chapitre 01 État de l'art de la conversion de l'énergie du vent

rotatif). Cette énergie est amplifiée par un système d'engrenage (multiplicateur), puis transmise à un arbre de rotation lié à une génératrice qui la convertit à son tour en une énergie électrique [1].

Les éoliennes sont classées selon leur puissance nominale en trois catégories [MUL 08] :

Eoliennes de petites puissances :  $P \leq 40 \text{ kW}$ .

Eoliennes de moyennes puissances :  $40 \text{ kW} < P < 1 \text{ MW}$ .

Eoliennes de fortes puissances :  $P > 1 \text{ MW}$ .

La figure (1-2) illustre la correspondance taille et puissance des éoliennes.

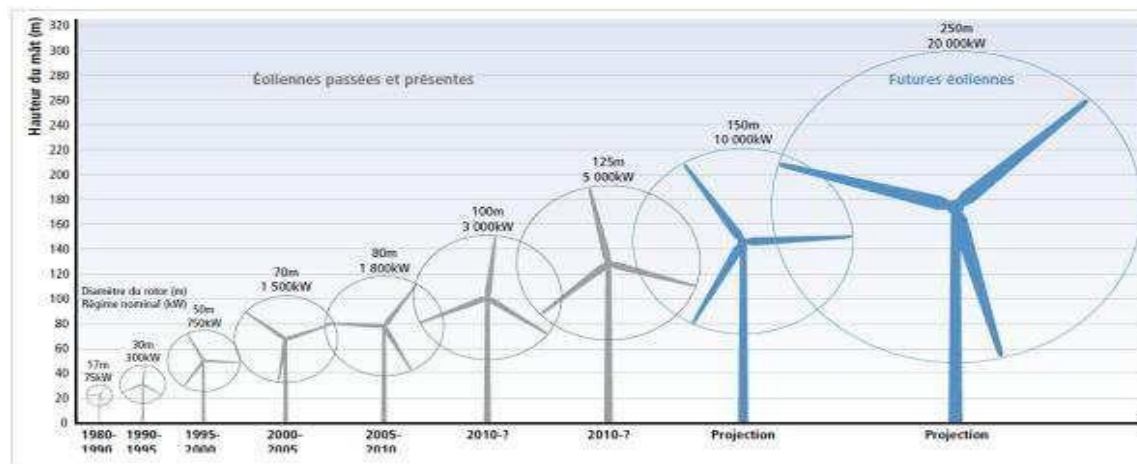


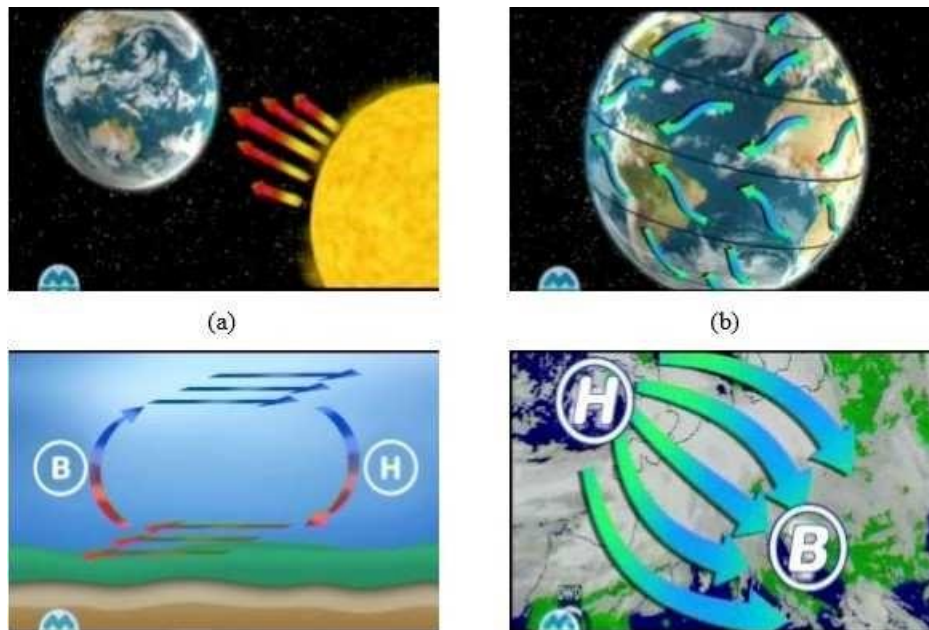
Figure 1.2. Correspondance taille-puissance des éoliennes.

## 1.4 Le Vent :

Le vent naît sous l'effet des différences de températures et de pression. Le grand responsable de ce phénomène est le soleil (figure 1.3.a). Il chauffe les mers et les continents mais pas au même rythme (figure 1.3.b). Une fois réchauffés, ces derniers chauffent à leur tour les masses d'air qui les surplombent. L'air augmente de volume lorsqu'il est chauffé (figure 1.3.b), ce qui crée un déplacement des particules de l'air et (figure 1.3.d) c'est en capturant leur énergie cinétique que les éoliennes se mettent à fonctionner.

# Chapitre 01 État de l'art de la conversion de l'énergie du vent

---



**Figure 1.3.** La naissance du vent.

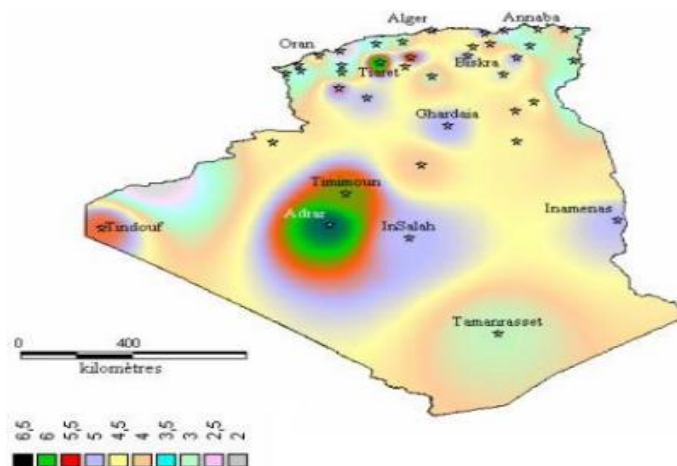
## 1.5 Evaluation de l'énergie éolienne en Algérie :

La carte des vents de l'Algérie, estimée à 10 m du sol est présentée en figure (1-4).

Les vitesses moyennes annuelles obtenues varient de 2 à 6.5 m/s. Nous remarquons qu'à l'exception de la région côtière (moins Bejaia et Oran), du Tassili et de Beni Abbés, la vitesse de vent moyenne est supérieure à 3 m/s. La région centrale de l'Algérie est caractérisée par des vitesses de vent variant de 3 à 4 m/s, et augmente au fur et à mesure que l'on descend vers le sud-ouest. Le maximum est obtenu pour la région d'Adrar avec une valeur moyenne de 6.5 m/s [2]. Cependant, nous pouvons observer l'existence de plusieurs microclimats où la vitesse excède les 5 m/s comme dans les régions de Tiaret, Tindouf et Oran.



# Chapitre 01 État de l'art de la conversion de l'énergie du vent



**Figure 1.4.** Atlas de la vitesse moyenne du vent (en m/s) de l'Algérie estimée à 10 m du sol.

## 1.6 Les différents types d'éoliennes :

On classe les éoliennes suivant la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice. Il existe principalement deux grandes familles :

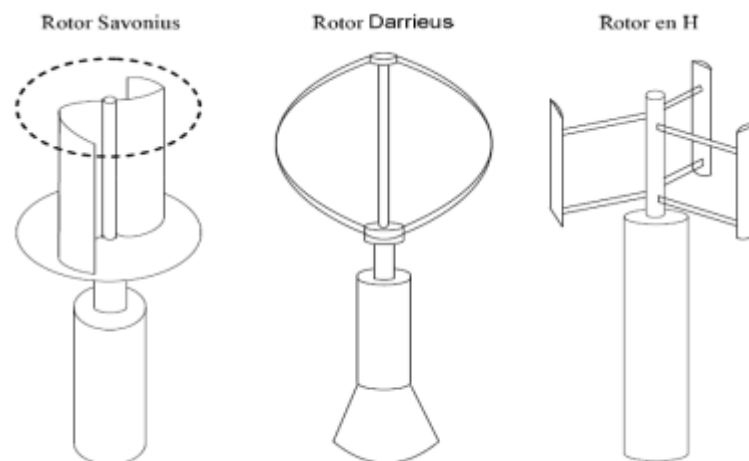
- \* Eoliennes à axe vertical.
- \* Eoliennes à axe horizontal.

### 1.6.1 Les éoliennes à axe vertical :

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour Produire de l'électricité, paradoxalement, en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol ; donc facilement accessibles. De nombreuses variantes ont été testées depuis les années vingt, dont beaucoup sans succès, mais trois structures sont parvenues au stade de l'industrialisation : Savonius, Darrieus et rotor de Musgrove prennent une forme 'H' (voir la figure 1.5).

# Chapitre 01 État de l'art de la conversion de l'énergie du vent

---



**Figure 1.5.**Eolienne à axe vertical.

## 1.6.1.1 Avantages :

- La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol.
- Son axe vertical possède une symétrie de révolution ce qui permet de fonctionner quel que soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor.
- Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien.

## 1.6.1.2 Inconvénient:

- Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal.
- La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne avec un vent proche du sol, donc moins fort car freiné par le relief.
- Leur implantation au sol exige l'utilisation des tirants qui doivent passer au-dessus des pales, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne à tour.

## 1.6.2 Les éoliennes à axe horizontal :

Ce sont les machines les plus répandues actuellement du fait de :

- Leur rendement est supérieur à celui de toutes les autres machines. Elles sont appelées éoliennes à axe horizontal car l'axe de rotation du rotor est horizontal,

# Chapitre 01 État de l'art de la conversion de l'énergie du vent

---

- parallèle à la direction de vent. Elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales, ou des hélices multipales pour le pompage de l'eau.
- Elles ont un rendement élevé.
- Les éoliennes à axe horizontal (ou à hélice) sont de conception simple.



**Figure 1.6.** Éoliennes à axe horizontal.

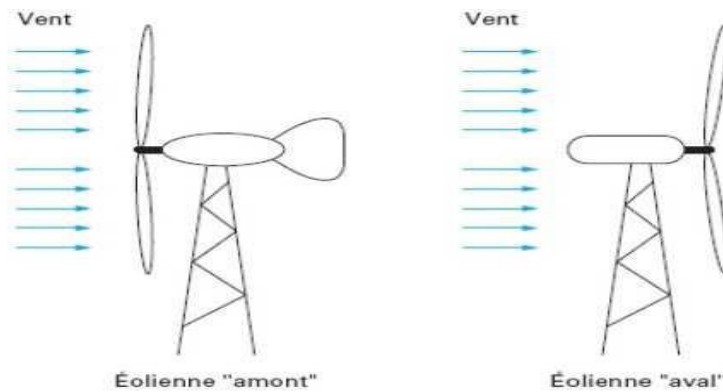
Sur base la du nombre de pales que compte l'hélice, on peut distinguer deux groupes:

- Les éoliennes à rotation lente "multipales" : Elles sont, depuis longtemps, relativement répandues dans les campagnes, et servent exclusivement au pompage de l'eau.
- Aérogénérateurs : Les éoliennes à rotation rapide, bi- ou tripales en général, constituent actuellement la catégorie des éoliennes en vogue, et sont essentiellement affectées à la production d'électricité, d'où leur nom le plus courant "d'aérogénérateurs".

Parmi les machines à axe horizontal parallèle à la direction du vent, il faut encore différencier l'aérogénérateur dont l'hélice est en amont de machine par rapport au vent « hélice au vent » et celle dont l'hélice est en aval de la machine par rapport au vent « hélice sous le vent ».

# Chapitre 01 État de l'art de la conversion de l'énergie du vent

---



**Figure 1.7.** Configuration à axe horizontal.

## 1.6.2.1 Avantages

- Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical.
- Cette structure capte le vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol.
- Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour.

Ainsi, il n'est pas nécessaire de rajouter un local pour l'appareillage.

## 1.6.2.2 Inconvénient

- Coût de construction très élevé.
- L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident.

Malgré ses inconvénients, cette structure est la plus utilisée de nos jours. Cependant, les structures à axe vertical sont encore utilisées pour la production d'électricité dans les zones isolées. Elles sont de faible puissance et généralement destinées à des utilisations permanentes comme par exemple la charge des batteries.

## 1.7 Principe du fonctionnement de l'éolienne:

### 1.7.1 Principe:

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique.

Cette conversion se fait en deux étapes :

# Chapitre 01 État de l'art de la conversion de l'énergie du vent

- au niveau de la turbine, qui reçoit une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique.
- au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique qui est transmise ensuite sur le réseau électrique.

Il doit donc y avoir conversion et transmission régulières de l'énergie la seule possibilité de stockage étant inertielle au prix d'une accélération de la turbine. Ce fonctionnement général est illustré par la figure 1.8.1.

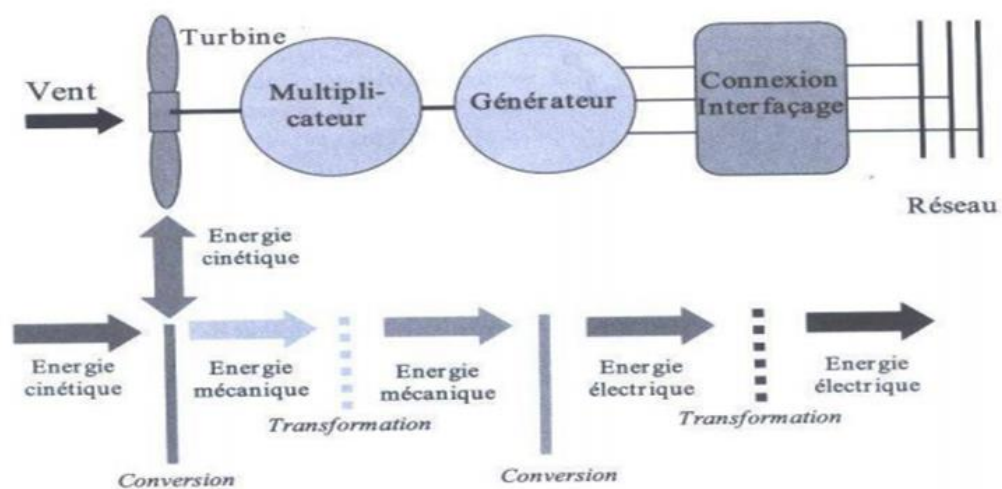


Figure 1.8.1. principe de la conversion d'énergie.

## 1.7.2 Constitution et Fonctionnement d'une éolienne:

Une éolienne typique est composée de plusieurs éléments qui sont présentés sur la figure 1.8.2 Un mât, un rotor, la nacelle, les pales.

- le mât : il permet de déplacer le rotor à une hauteur suffisante pour permettre son mouvement (nécessaire pour les éoliennes à axe horizontal), le mât abrite généralement une partie des composants électriques et électroniques (modulateur, commande multiplicateur, générateur, etc..).

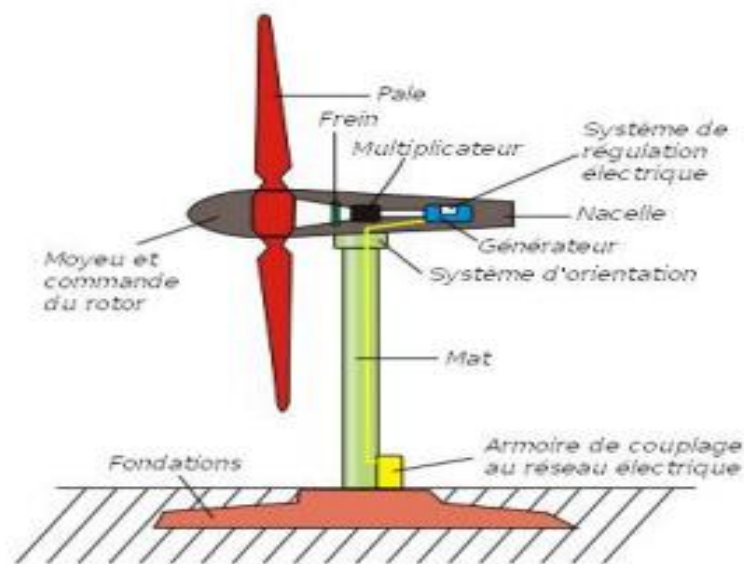
- le rotor : composé de trois pales en général et du nez de l'éolienne, il est entraîné par l'énergie du vent et peut être couplé directement ou indirectement à une pompe (cas des éoliennes à pompage) ou plus généralement à un générateur électrique. Il

# Chapitre 01 État de l'art de la conversion de l'énergie du vent

---

est lié à la nacelle par le moyeu.

- La nacelle : elle est montée au sommet du mât abritant les composants mécaniques, pneumatiques, certains composants électriques et électroniques nécessaires au fonctionnement de la machine (dans le cas des éoliennes produisant des électricités, un poste de livraison situé à proximité du parc éolien permet de relier ce parc au réseau électrique pour y injecter l'intégralité de l'énergie produite par ce mât électromagnétique).
- Les pales : elles représentent les éléments les plus importants du rotor, et elles sont le convertisseur de l'énergie cinétique du vent en couple mécanique (il y a plusieurs points à prendre en contact pour la construction des pales qui sont l'aérodynamisme et la structure)



**Figure 1.8.2.** Exemple de système éolien de type aérogénérateur.

## 1.8 Classification des systèmes éoliens :

Plusieurs classifications des turbines éoliennes peuvent être considérées selon le critère choisi. Dans la suite sont présentées les classifications les plus répandues.

# Chapitre 01 État de l'art de la conversion de l'énergie du vent

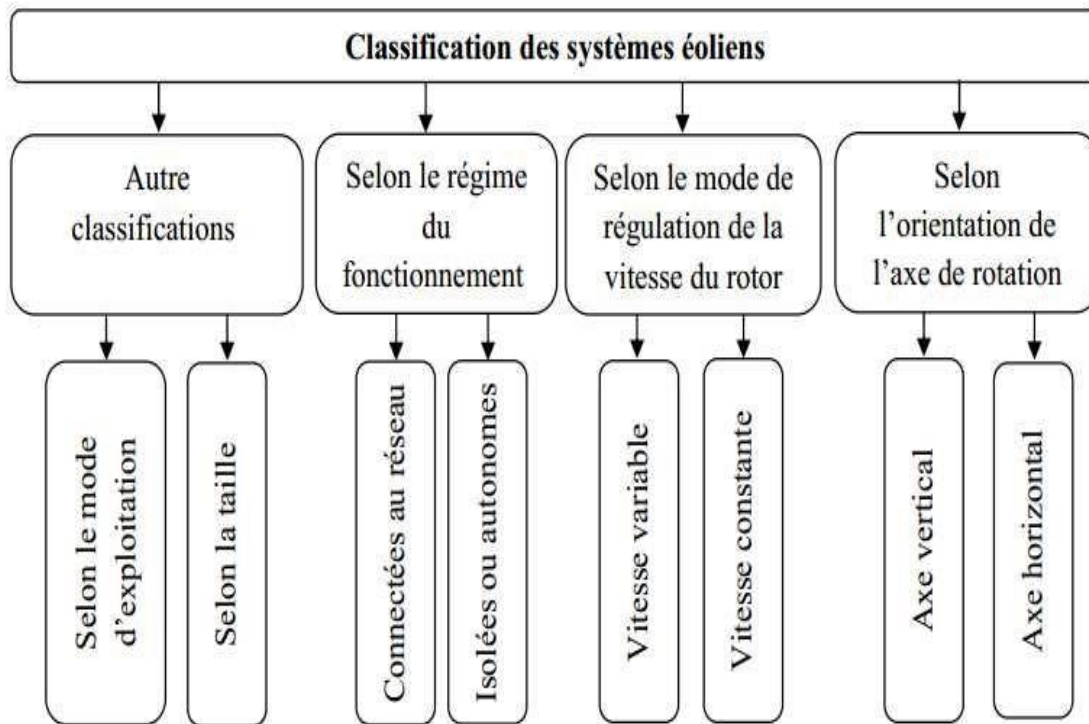


Figure 1.9. Classification des systèmes éoliens.

## 1.9 Éléments constitutifs d'un aérogénérateur (A axe horizontal) :

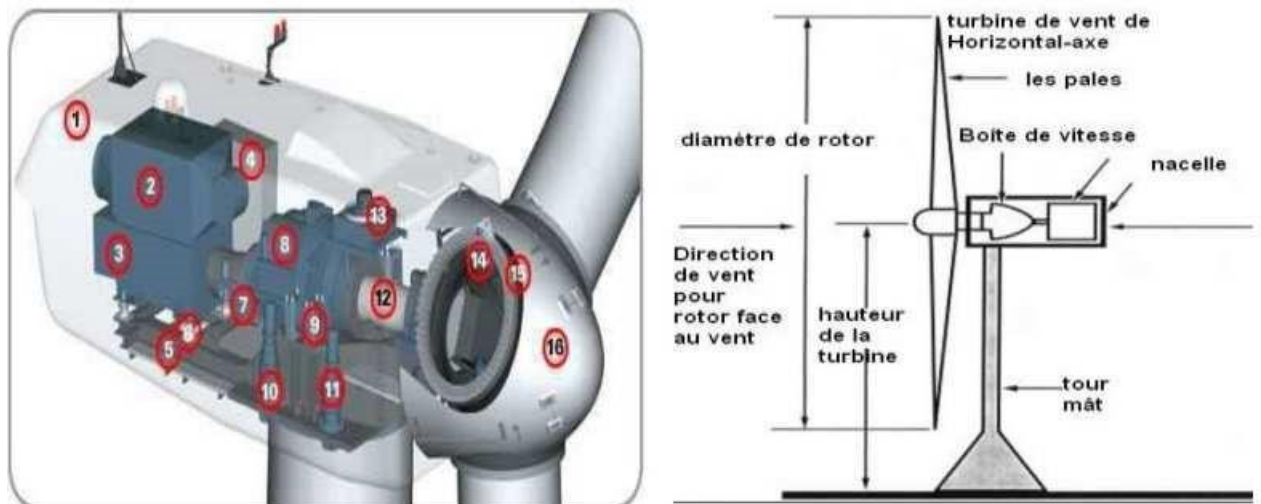


Figure 1.10. Éléments constitutifs d'un aérogénérateur.

Un mât, ou tour, supporte la nacelle (1) et la turbine (16). Il est important qu'il soit haut du fait de l'augmentation de la vitesse du vent avec la hauteur et aussi du diamètre des pales. Il est tubulaire et contient une échelle voire un

# Chapitre 01 État de l'art de la conversion de l'énergie du vent

---

ascenseur. La nacelle (1) partiellement insonorisée (6), (9), avec une armature métallique (5), accueille la génératrice (3) et son système de refroidissement (2), le multiplicateur de vitesse (8) et différents équipements électroniques de contrôle (4) qui permettent de commander les différents mécanismes d'orientation ainsi que le fonctionnement global de l'éolienne. Le multiplicateur de vitesse (quand il existe) comporte un arbre lent (12) supportant la turbine (16) et un arbre à grande vitesse (1000 à 2000 tours/min). Il est équipé d'un frein mécanique à disque (7), auquel est accouplé le générateur (3). Le multiplicateur de vitesse peut être pourvu d'un système de refroidissement (13) à huile. La turbine (16) possède trois pales (15) qui permettent de capter l'énergie du vent et de la transférer à l'arbre lent. Un système électromécanique (14) permet généralement d'orienter les pales et de contrôler ainsi le couple de la turbine et de réguler sa vitesse de rotation. Les pales fournissent également un frein aérodynamique par « mise en drapeau » ou seulement par rotation de leurs extrémités. Un mécanisme utilisant des servomoteurs électriques (10), (11) permet d'orienter la nacelle face au vent. Un anémomètre et une girouette situés sur le toit de la nacelle fournissent les données nécessaires au système de contrôle pour orienter l'éolienne et la déclencher ou l'arrêter selon la vitesse du vent.

## 1.10 Génératrice synchrone à aimant permanent:

La caractéristique d'auto excitation du GSAP lui permet de fonctionner avec un facteur de puissance élevé et un bon rendement, ce qui le rend propice à l'application à des systèmes de génération éolienne. En fait, dans la catégorie des petites turbines, son coût réduit et sa simplicité en font le générateur le plus employé. Cependant, dans les applications de plus grande puissance, les aimants et le convertisseur (lequel doit faire transiter toute la puissance générée), en font le moins compétitif.

Avenages:

- Vitesse variable sur toute la plage de vitesse.
- Puissance extraite optimisée.
- Connexion au réseau plus facile à gérer.



# Chapitre 01 État de l'art de la conversion de l'énergie du vent

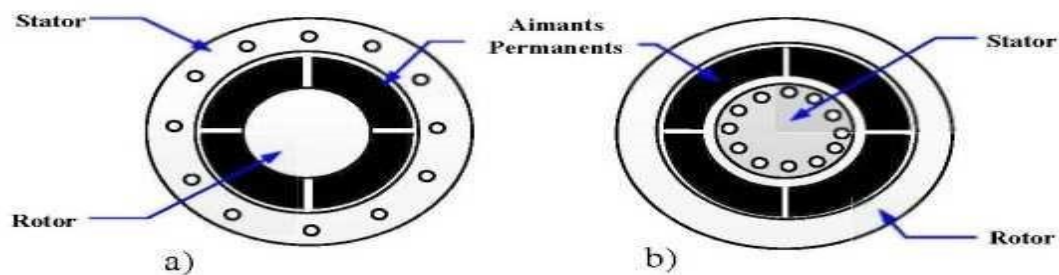
- Absence du multiplicateur de vitesse (pour les machines synchrones à grand nombre de pôles).

Inconvénients:

- Machine spécifique à plusieurs paires de pôles donc très encombrée et de grand diamètre.
- Électronique de puissance dimensionnée à au moins 100% donc plus chère.
- Coût de la machine élevé surtout dans le cas d'une machine synchrone à aimant.

## 1.11 Principe de fonctionnement de la machine synchrone à aimants permanents :

La génératrice synchrone à aimants permanents, permet d'effectuer la conversion d'énergie mécanique en énergie électrique alternative, est plus particulièrement une machine triphasée fournissant un système équilibré de tensions et de courants alternatifs, dans laquelle les champs magnétiques statorique et rotorique sont en rotation synchrone, c'est-à-dire à la même vitesse, raison pour laquelle un couple d'origine électromagnétique prend naissance. L'excitation de la génératrice synchrone à aimants permanents est faite par des aimants permanents liés au rotor (inducteur). Il y a des structures de génératrices à aimants permanents à rotor interne et stator externe d'une part, et des structures d'alternateurs à stator interne et rotor externe, d'autre part Figure 3-1. Toutefois, les alternateurs à aimants permanents avec stator externe sont plus performants en termes de puissance massique et volumique et couple massique et volumique parce que le refroidissement des enroulements statoriques est plus aisé lorsque le stator est en contact avec l'air ambiant.



# Chapitre 01 État de l'art de la conversion de l'énergie du vent

---

## 1.12 La machine synchrone à aimants permanents fonctionnement mode génératrice :

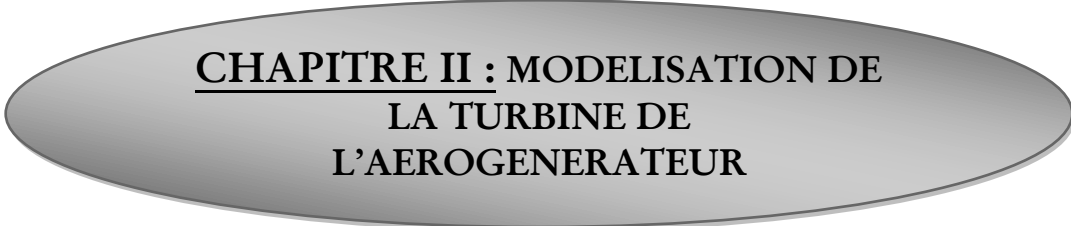
Actuellement la littérature témoigne d'un grand intérêt pour la MSAP. En effet, elle a une large utilisation dans le domaine de l'entraînement électrique à une vitesse variable. Dans notre travail, nous rappellerons les éléments de la constitution de cette machine, puis nous décrirons la modélisation de la machine dans le repère lié au rotor et dans le repère lié au stator (repère de Park).

## 1.13 Conclusion :

Dans le présent chapitre, un état de l'art sur l'énergie éolienne et une étude descriptive de l'ensemble des éléments constituant la chaîne de conversion d'énergie éolienne ont été présentés. Aussi, les différentes structures des éoliennes existantes et leurs technologies, leurs systèmes mécaniques de régulation, ainsi que leurs avantages et leurs inconvénients ont été affichés et discutés. Après avoir présenté les différentes génératrices utilisées dans les systèmes de conversion d'énergie éolienne, leurs avantages et leurs inconvénients dans le but d'atteindre une exploitation optimale de ces éoliennes quel que soit la vitesse du vent, le choix s'est porté sur la machine asynchrone double alimentation où une étude détaillée (structure, mode fonctionnement configurations d'alimentation) a été présentée. La structure d'alimentation de cette machine asynchrone dont le stator est connecté directement au réseau, et le rotor connecté au réseau à travers deux convertisseurs a été l'objet de notre étude vu les avantages qu'elle présente (un bon compromis entre la variation de vitesse qu'elle autorise et la taille du convertisseur par rapport à la puissance nominale de la machine) et qui peut être améliorée par son association à une turbine à calage variable des pales. La suite de ce travail est principalement consacrée à la modélisation et la commande de cette structure.

# **Chapitre 02 Modélisation de la turbine de l'aérogénérateur**

---



**CHAPITRE II : MODELISATION DE  
LA TURBINE DE  
L'AEROGENERATEUR**

# Chapitre 02 Modélisation de la turbine de l'aérogénérateur

## 2.1 Introduction :

Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement à la modélisation et à la commande du système de conversion éolienne basé sur une machine asynchrone à double alimentation (MADA).

Dans un premier temps, on a modélisé chaque élément de ce système de conversion éolienne, tels que la turbine éolienne et ses parties mécaniques et ensuite la machine asynchrone à double alimentation en mode générateur. Ensuite, on a appliqué la commande vectorielle de la puissance active et réactive statorique de la machine asynchrone à double alimentation qui est entraîné par une turbine éolienne commandée par la stratégie MPPT (Maximum Power Point Tracking) pour extraire le maximum de la puissance produite par cette machine. Tous les modèles ont été développés en vue d'une exploitation par le logiciel Matlab/Simulink, qui permet de mettre en place assez rapidement des modèles ainsi que les lois de commande associées.

## 2.2 Modélisation Globale de la Chaîne de Conversion de l'Eolienne Basée sur une MADA :

### 2.2.1 Description du système éolien :

La chaîne de conversion éolienne sur laquelle sont basés les travaux de cette mémoire est constituée d'une turbine éolienne, un multiplicateur, une machine asynchrone à double alimentation (MADA), un bus continu et deux convertisseurs statiques de puissance. La turbine éolienne entraîne la MADA à une vitesse de rotation variable à travers un multiplicateur de vitesse. Le stator de cette dernière est directement connecté au réseau électrique tandis que le rotor est connecté au réseau via deux convertisseurs statiques (Onduleur + Redresseur) mis en cascade à travers un bus continu, comme le montre la figure 2.1.

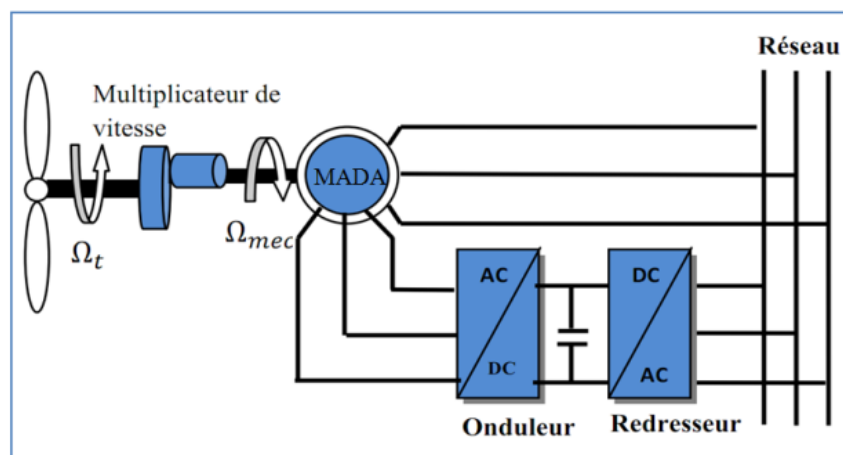


Figure 2.1. Système de conversion éolienne à base de la MADA.

# Chapitre 02 Modélisation de la turbine de l'aérogénérateur

## 2.2.2 Modèle de la turbine :

### 2.2.2.1 Modèle aérodynamique :

Considérons une turbine éolienne munie de pales de longueur  $R$  entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain  $G$  (Figure 2.2).

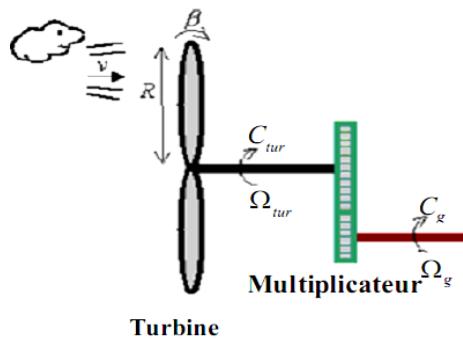


Figure 2.2. Schéma explicatif de la turbine éolienne.

### 2.2.2.2 Modèle des pales :

En appliquant la théorie de la quantité de mouvement et du théorème de Bernoulli, on peut déterminer la puissance incidente (la puissance théorique), due au vent qui s'exerce sur les pales d'une éolienne par :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S v^3 \quad (2.1)$$

Où :

$\rho$  : masse volumique de l'air (approximativement  $1,225 \text{ kg/m}^3$ );

$S$  : surface décrite par les pales de l'éolienne en rotation;

$v$  : vitesse du vent (m/s).

Le ratio de vitesse  $\lambda$  est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire de la turbine et la vitesse du vent, son expression est donnée comme suit :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{v} \quad (2.2)$$

$\Omega_t$  : vitesse de rotation de la turbine (rad/s);

$R$  : rayon de l'aérogénérateur ou la longueur des pales (m).

## Chapitre 02 Modélisation de la turbine de l'aérogénérateur

Dans un système éolien, à cause des différentes pertes, l'éolienne ne peut récupérer qu'une partie de la puissance du vent ( $P_v$ ). La puissance du vent et la puissance aérodynamique extraite par la turbine ( $P_{aer}$ ) peuvent s'exprimer en fonction du coefficient de puissance  $C_p$ .

$$P_{aer} = C_p P_v = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho S v^3 \quad (2.3)$$

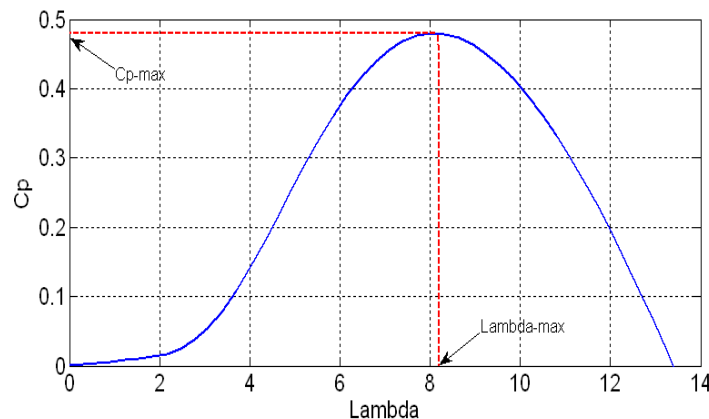
Le coefficient de puissance  $C_p$  représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne et il dépend de la caractéristique de la turbine. Ce coefficient présente une limite théorique, appelée limite de Betz, égale à 0,593 et qui n'est jamais atteinte [3].

L'évolution du coefficient de puissance est une donnée spécifique à chaque éolienne. Dans notre cas (Figure 2.3), son évolution en fonction de  $\lambda$  est basée sur l'observation de données. Suite à ces observations, nous avons alors fixé sa valeur maximale à 0,47 et ses variations sont modélisées par l'approximation polynomiale suivante:

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left( \frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \beta - C_4 \right) \exp\left(\frac{-C_5}{\lambda_i}\right) + C_6 \lambda \quad (2.4)$$

Avec :  $C_1=0.5176$ ,  $C_2=116$ ,  $C_3=0.4$ ,  $C_4=5$ ,  $C_5=21$ ,  $C_6=0.0068$ .

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (2.5)$$



**Figure 2.3.** Coefficient de puissance en fonction de la vitesse relative.

La turbine permet de convertir l'énergie aérodynamique du vent en énergie mécanique. Son couple aérodynamique  $C_t$  est donné par l'expression suivante:

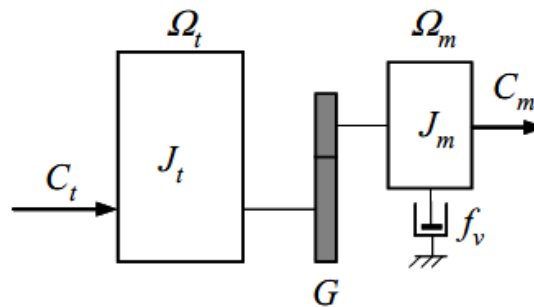
## Chapitre 02 Modélisation de la turbine de l'aérogénérateur

---

$$C_t = \frac{P_v}{\Omega_t} = \frac{C_p(\lambda, \beta) \rho S v^2}{2 \Omega_t} \quad (2.6)$$

### 2.2.2.3 Modèle du multiplicateur de vitesse :

Le multiplicateur de vitesse adapte la vitesse de rotation de la turbine (arbre lent) à la vitesse de rotation de la MADA (arbre rapide) (Figure 2.4).



**Figure 2.4.** Modèle mécanique simplifié de la turbine.

Les pertes énergétiques dans le multiplicateur sont considérées nulles. Il s'agit d'un dispositif très complexe que nous avons modélisé très simplement par les deux équations suivantes :

$$C_m = \frac{C_t}{G} \quad (2.7)$$

$$\Omega_m = G \Omega_t \quad (2.8)$$

Avec :

$J_t$ : Moment d'inertie de la turbine (Kg.m<sup>2</sup>);

$J_m$ : Moment d'inertie de la MADA (Kg.m<sup>2</sup>);

$f_v$ : Coefficient dû aux frottements visqueux de la MADA (N.m/rad/s);

$C_m$  : Couple mécanique sur l'arbre de la MADA (N.m);

$\Omega_m$  : Vitesse de rotation de la MADA (rad/s).

### 2.2.2.4 Modèle de l'arbre mécanique :

Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale  $J$  constituée de l'inertie de la turbine  $J_t$  reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice  $J_m$ .

# Chapitre 02 Modélisation de la turbine de l'aérogénérateur

$$J = \frac{J_t}{G^2} + J_m \quad (2.9)$$

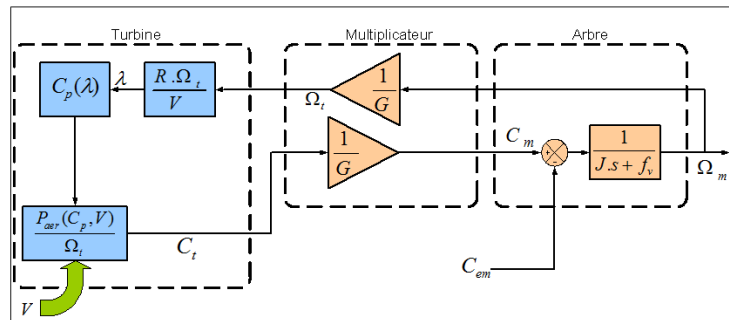
D'après la figure 2.4, nous pouvons écrire l'équation fondamentale de la dynamique du système mécanique sur l'arbre mécanique de la MADA par :

$$\left( \frac{J_t}{G^2} + J_m \right) \frac{d\Omega_m}{dt} + f_v \Omega_m = C_m - C_{em} \quad (2.10)$$

Avec :

$C_{em}$ : couple électromagnétique de la MADA.

Le schéma bloc correspondant à cette modélisation de la turbine se déduit aisément à partir des équations précédentes, c'est ce qui est représenté sur la figure ci-dessus.



**Figure 2.5.** Schéma bloc du modèle de la turbine éolienne.

## 2.3 Technique d'extraction du maximum de puissance (MPPT) :

Les techniques d'extraction du maximum de puissance consistent à déterminer la vitesse de la turbine qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée. Plusieurs dispositifs de commande peuvent être imaginés [4]. Dans cette section nous présenterons la stratégie de commande MPPT sans mesure de vitesse du vent.

Pour extraire le maximum de la puissance produite par le générateur éolien, nous devons fixer le ratio de vitesse à la valeur optimal  $\lambda_{optim}$  qui correspond au maximum du coefficient de puissance  $C_{p\_max}$ , la mesure de la vitesse du vent est difficile, une estimation de sa valeur pouvons être obtenus [5] :

$$v_{est} = \frac{\Omega_t R}{\lambda_{optim}} \quad (2.11)$$



# Chapitre 02 Modélisation de la turbine de l'aérogénérateur

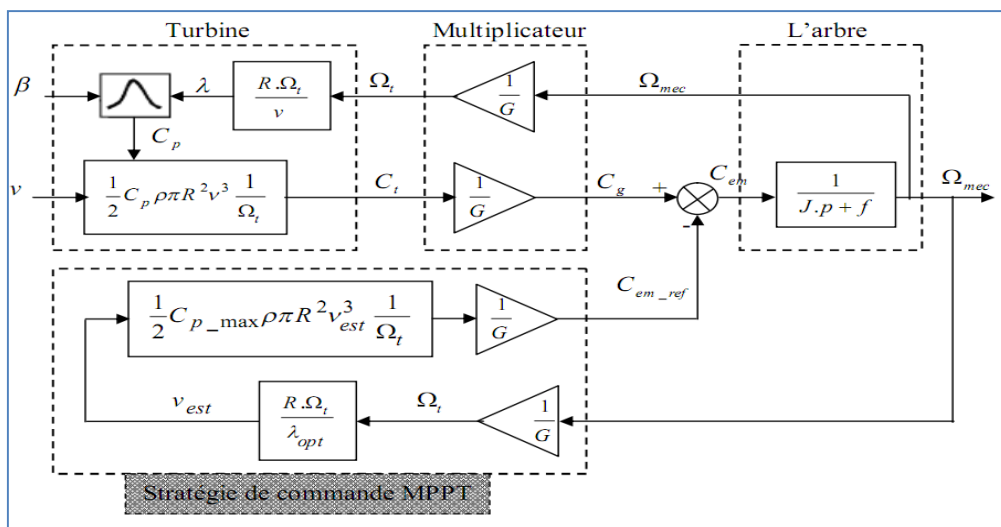
La puissance aérodynamique de référence est donc donnée par :

$$P_{aer\_ref} = \frac{1}{2} C_{p\_max} \rho S v_{est}^3 \quad (2.12)$$

Le couple électromagnétique de référence peut s'exprimer comme suit :

$$C_{em\_ref} = \frac{P_{aer\_ref}}{\Omega_t} = \frac{1}{2} C_{p\_max} \rho \pi \frac{R^5 \Omega_t^2}{\lambda_{optim}^3} \quad (2.13)$$

La figure 2.6 résume le schéma bloc de la stratégie MPPT sans mesure de la vitesse du vent.



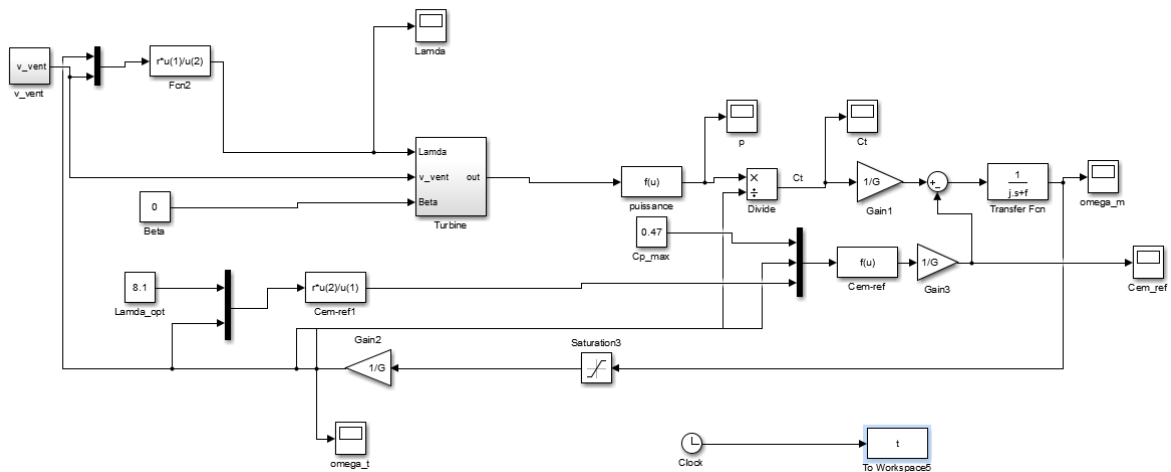
**Figure 2.6.** Schéma bloc de la stratégie MPPT sans mesure de la vitesse du vent.

### 2.3.1 Résultats de simulation de la stratégie de commande MPPT :

L'ensemble des modèles de la turbine, multiplicateur de vitesse et arbre mécanique ont été simulés sous MATLAB Simulink (Figure 2.7). La vitesse du vent  $v$ , l'angle d'orientation des pales  $\beta$  et le couple électromagnétique  $C_{em}$  fournis par la MADA constituent les entrées du système tandis que le couple de sortie du multiplicateur  $C_g$  et la vitesse mécanique  $\Omega_{mec}$  sont les sorties.

L'angle d'orientation des pales est fixé à une valeur constante (égale à 0). Le couple électromagnétique de la MADA correspond à un point de fonctionnement optimal quant à la puissance générée (Maximum Power Point Tracking).

# Chapitre 02 Modélisation de la turbine de l'aérogénérateur

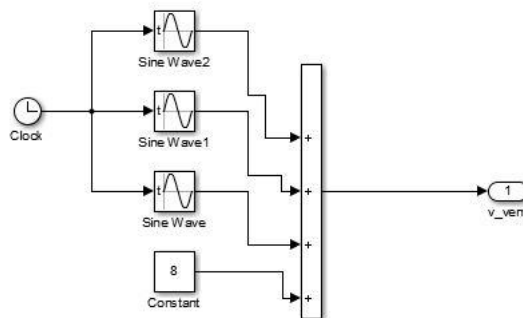


**Figure 2.7.** Schéma de simulation de la stratégie MPPT sans mesure de la vitesse du vent.

Le modèle du vent utilisé dans notre étude est donné par la relation :

$$V(t)=8+0.2\sin (0.1047.t) +2\sin (0.2665.t) + 0.2\sin (3.6645.t)$$

Cette équation est modélisée sous MATLAB/SIMULINK par le schéma bloc suivant :



**Figure 2.8.** Modèle du profil du vent sous MATLAB/SIMULINK.

La vitesse de la turbine et la vitesse mécanique de l'arbre sont illustrées respectivement sur les figures 2.9 et 2.10.

La figure 2.11 illustre la puissance mécanique transmise à la MADA, on peut constater la forte influence du vent sur cette grandeur, rappelons que la puissance évolue selon le cube de la vitesse du vent, le gain en énergie de cette configuration dépend évidemment du type de gisement et en particulier de la variation du vent.

L'extraction du maximum de puissance du vent est réalisée en imposant un rapport optimal  $\lambda_{optim}$  qui garantit un coefficient de puissance maximal  $C_{p\_max}$  (rendement aérodynamique maximal)

# Chapitre 02 Modélisation de la turbine de l'aérogénérateur

comme la montre les figures 2.12 et 2.13. On s'aperçoit que le rendement est quasiment constant que toute la plage de la vitesse du vent, néanmoins il est sensible aux faibles vitesses (le  $C_p$  subit une diminution pour les faibles vitesses contrairement à  $\lambda$ ). L'efficacité énergétique est quasi optimale pour toute la plage de vitesse.

La figure 2.14 montre que le couple électromagnétique est asservi à leur grandeur de référence.

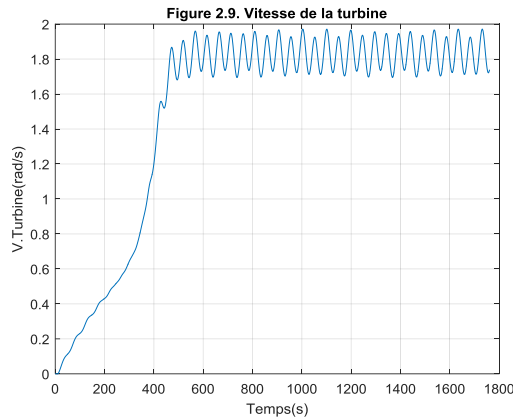


Figure 2. 9. Vitesse de la turbine.

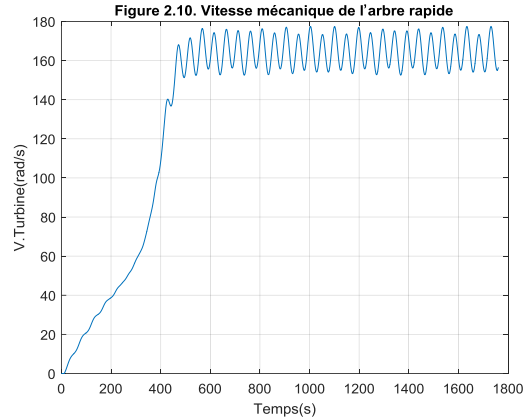


Figure 2. 10. Vitesse mécanique de l'arbre rapide.

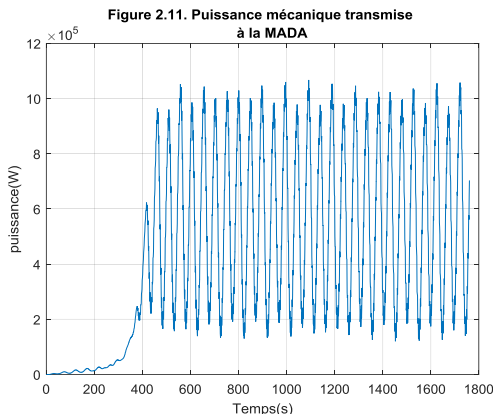


Figure 2. 11. Puissance mécanique transmise à la MADA.

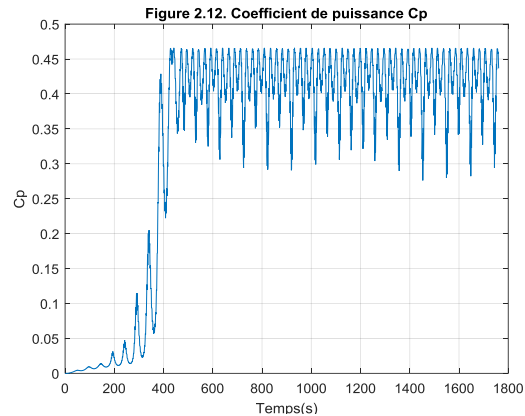


Figure 2. 12. Coefficient de puissance  $C_p$ .

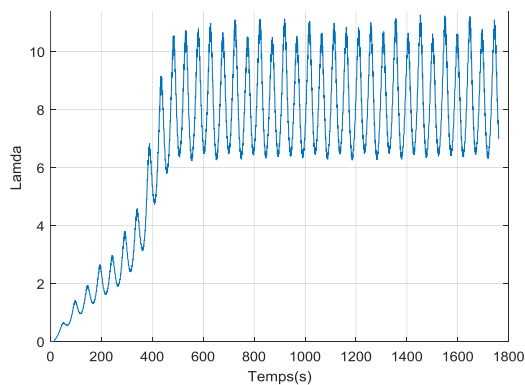


Figure 2. 13. Rapport de vitesse  $\lambda$ .

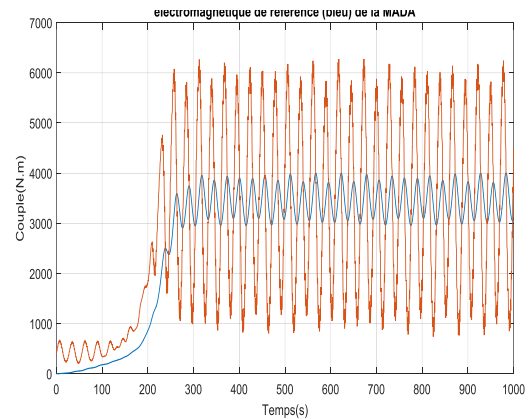


Figure 2.14. Couple Aérodynamique (rouge) et couple électromagnétique de référence (bleu) de la MADA.

## Chapitre 02 Modélisation de la turbine de l'aérogénérateur

---


### 2.4 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons modélisé et simulé la turbine et le multiplicateur et en suite nous avons réalisé une commande MPPT.

Les résultats obtenus par simulation concordent avec la réalité, la validation a été obtenue par comparaison avec les résultats qui se trouvent dans la bibliographie.

# **Chapitre 03 La modélisation et commande de la machine asynchrone à double alimentation**

---



**CHAPITRE III : LA MODELISATION  
ET COMMANDE DE LA MACHINE  
ASYNCHRONE A DOUBLE  
ALIMENTATION**

# Chapitre 03 La modélisation et commande de la machine asynchrone à double alimentation

## 3.1 Introduction :

Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement à la modélisation et à la commande du système de conversion éolienne basé sur une machine asynchrone à double alimentation (MADA). Dans un premier temps, on a modélisé chaque élément de ce système de conversion éolienne, tels que la turbine éolienne et ses parties mécaniques et ensuite la machine asynchrone à double alimentation en mode générateur. Ensuite, on a appliqué la commande vectorielle de la puissance active et réactive statorique du générateur asynchrone à double alimentation (GADA) qui est entraîné par une turbine éolienne commandée par la stratégie MPPT (Maximum Power Point Tracking) pour extraire le maximum de la puissance produite par ce générateur. Tous les modèles ont été développés en vue d'une exploitation par le logiciel Matlab/Simulink, qui permet de mettre en place assez rapidement des modèles ainsi que les lois de commande associées. Si on veut examiner la robustesse de cette commande à vitesse variable, on peut soumettre à la turbine une vitesse du vent variable en échelons et une autre variable aléatoire.

## 3.2 Stratégie de la Commande Vectorielle du Générateur Asynchrone à Double Alimentation (GADA) pour le Contrôle Indépendant des Puissances Active et Réactive :

En vue de la commande vectorielle de ce générateur, il convient de choisir un référentiel lié au champ tournant, lequel serait relatif à la fréquence 50Hz. Le repère de Park serait, de ce fait, synchronisé avec le flux statorique, dont l'axe d est aligné avec le vecteur de flux statorique, comme le montre la figure 3.1.

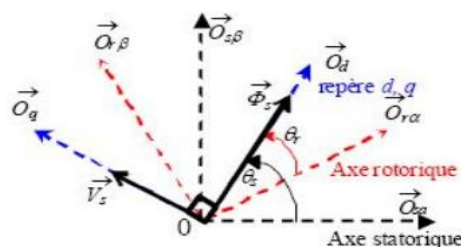


Figure 3.1. Orientation du repère de Park.

En adoptant l'hypothèse d'une résistance statorique  $R_s$  négligeable et que le flux statorique est constant et orienté selon l'axe d, on déduit :

## Chapitre 03 La modélisation et commande de la machine asynchrone à double alimentation

---

$$\Phi_{sd} = \Phi_s = L_S i_{sd} + M i_{rd} \quad (3.1)$$

$$\Phi_{sq} = 0 = L_S i_{sq} + M i_{rq} \quad (3.2)$$

$$V_{sd} = 0 \quad (3.3)$$

$$V_{sq} = V_s \approx \omega_s \Phi_s \quad (3.4)$$

Les puissances active et réactive statoriques peuvent être écrites selon les courants rotoriques comme suit:

$$P_S = -V_s \frac{M}{L_S} i_{rd} \quad (3.5)$$

$$Q_S = \frac{V_s^2}{\omega_s L_S} - V_s \frac{M}{L_S} i_{rd} \quad (3.6)$$

Si on considère l'inductance mutuelle  $M$  constante, on remarque que l'équation 3.5 fait apparaître que la puissance active statorique  $P_S$  est directement proportionnelle au courant rotorique quadrature  $i_{rq}$ . De plus, la puissance réactive statorique  $Q_S$  est proportionnelle au courant rotorique direct  $i_{rd}$ , à une constante près  $\frac{V_s^2}{\omega_s L_S}$  [6].

L'arrangement des équations donne les expressions des tensions rotoriques selon les courants rotoriques [7] :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r i_{rd} + \sigma L_r \frac{di_{rd}}{dt} - g \omega_s \sigma L_r i_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \sigma L_r \frac{di_{rq}}{dt} + g \frac{M}{L_S} V_s + g \omega_s \sigma L_r i_{rd} \end{cases} \quad (3.7)$$

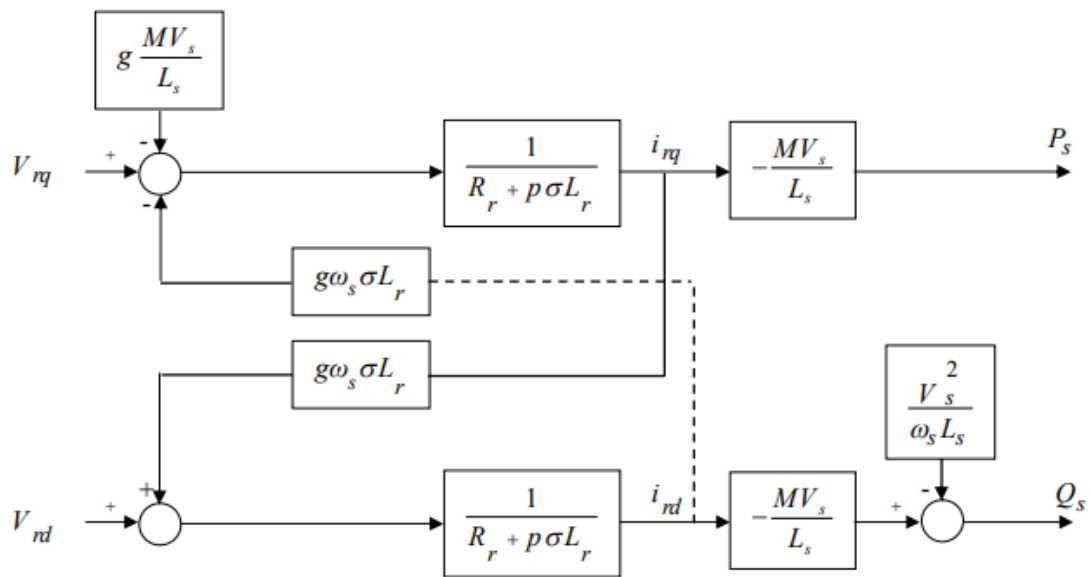
Avec :

$$\sigma = -\frac{M^2}{L_S L_r} : \text{Coefficient de dispersion,}$$

$$g = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} : \text{coefficient de glissement.}$$

## Chapitre 03 La modélisation et commande de la machine asynchrone à double alimentation

A partir des équations que nous venons de mettre en place, nous pouvons établir les relations entre les tensions appliquées au rotor de la machine et les puissances statoriques que cela engendre. Il est donc possible maintenant de décrire le schéma bloc de la machine asynchrone à double alimentation qui sera le bloc à réguler par la suite. Le schéma bloc représentant le modèle mathématique ainsi simplifié de la MADA est illustré dans la figure 3.2.



**Figure 3.2.** Schéma bloc du modèle simplifié de la MADA.

Ce schéma fait apparaître des fonctions de transfert du premier ordre pour les deux axes liant les tensions rotoriques aux puissances statoriques. Il montre également que nous pouvons mettre en place une commande vectorielle étant donnée qu'à l'influence des couplages près, chaque axe peut être commandé indépendamment, avec chacun son propre régulateur.

Les grandeurs de références pour ces régulateurs seront : la puissance active pour l'axe rotorique q et la puissance réactive pour l'axe rotorique d . La consigne de puissance réactive sera maintenue nulle pour assurer un facteur de puissance unitaire côté stator de façon à optimiser la qualité de l'énergie renvoyée sur le réseau. La consigne de puissance active devra permettre de garder le coefficient de puissance de l'éolienne optimal.

On remarque que les puissances et les tensions sont liées par une fonction de transfert du premier ordre. De plus, du fait de la faible valeur du glissement  $g$  , il sera possible d'établir sans difficulté une



# Chapitre 03 La modélisation et commande de la machine asynchrone à double alimentation

---

commande vectorielle car les influences des couplages resteront faibles et les axes d et q pourront donc être commandés séparément avec leurs propres régulateurs [6].

Ainsi, il apparaît deux solutions pour effectuer la commande en puissance de cette machine [8] :

- La première méthode consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances active et réactive. Cette méthode sera appelée méthode directe car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la machine.
- La deuxième méthode consiste à tenir compte des termes de couplage et à les compenser en effectuant un système comportant deux boucles permettant de contrôler les puissances et les courants rotoriques. Cette méthode appelée méthode indirecte.

D'après [6], il a trouvé que la méthode directe est que sa mise en œuvre est simple, par contre la méthode indirecte a l'avantage de contrôler les courants rotoriques ce qui permettra de faire une protection de la machine en limitant ces courants mais elle est plus complexe à mettre en œuvre.

Dans la suite, on va appliquer au GADA les deux méthodes précédentes pour examiner l'efficacité de ces commandes de ce générateur.

## 3. 3 Commande Indirecte des Puissances active et réactive

### 3.3.1 Commande Indirecte sans Boucles des Puissances :

Les courants rotoriques  $i_{rq}$  et  $i_{rd}$ , sont respectivement les images de la puissance active statorique  $P_s$  et la puissance réactive statorique  $Q_s$ , doivent poursuivre leurs courants de références [9].

### 3.3.2 Découplage par Compensation :

De l'équation (3.7), on peut voir que les équations de tension incluent deux termes de couplage entre l'axe d et l'axe q.

Nous devons présenter un système de découplage, en présentant les termes de compensation:

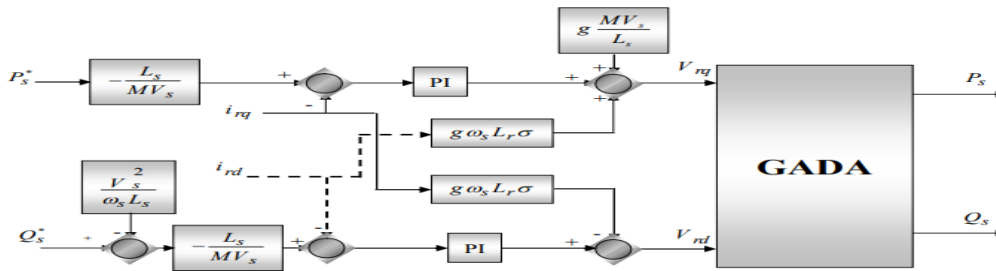
$$\begin{cases} E_{rd} = g\omega_s \sigma L_r i_{rq} \\ E_{rq} = -g \frac{M}{L_s} V_s - g\omega_s \sigma L_r i_{rd} \end{cases} \quad (3.8)$$

# Chapitre 03 La modélisation et commande de la machine asynchrone à double alimentation

Puis, on a défini deux nouvelles variables intermédiaires de découplage par deux expressions qui sont :

$$\begin{cases} V_{rdl} = V_{rd} + E_{rd} \\ V_{rql} = V_{rq} + E_{rq} \end{cases} \quad (3.9)$$

Le schéma bloc de la commande indirecte sans boucles des puissances du GADA et son équivalent sous Matlab/Simulink sont représentés, respectivement, par les figures 3.3. La figure 3.3 consiste à contrôler ces puissances indirectement par le réglage des deux composantes ; directe et en quadrature du courant rotorique par des régulateurs PI dont les consignes sont directement déduites des valeurs des puissances que l'on veut imposer au GADA.



**Figure 3.3.** Schéma bloc de la commande indirecte sans boucles des puissances du GADA.

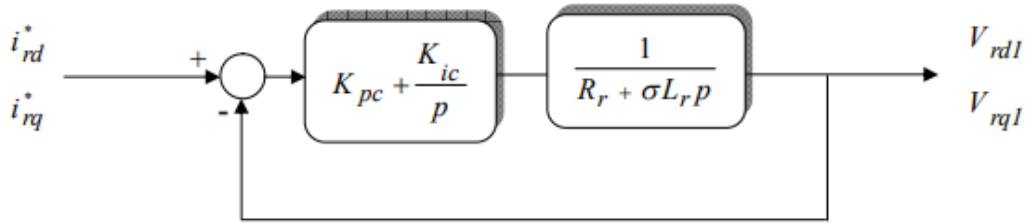
### 3.3.3 Dimensionnement du Régulateur PI :

Les fonctions de transferts des courants rotoriques directe et quadrature sont obtenues à partir de l'équation (3.1) et par l'annulation des termes de découplages par les termes de compensations :

$$\frac{i_{rd}}{V_{rd}} = \frac{1}{R_r + \sigma L_r p} \quad \text{et} \quad \frac{i_{rq}}{V_{rq}} = \frac{1}{R_r + \sigma L_r p} \quad (3.10)$$

## Chapitre 03 La modélisation et commande de la machine asynchrone à double alimentation

La boucle de régulation des courants  $i_{rd}$  et  $i_{rq}$  peut se présenter par le schéma bloc de la figure 3.4 :



**Figure 3.4.** Schéma de régulation des courants  $i_{rd}$  et  $i_{rq}$ .

On note que les gains des correcteurs PI sont identiques pour l'axe d et l'axe q . Soit un régulateur PI de fonction de transfert :

$$PI (P) = K_{pc} + \frac{K_{ic}}{p} \quad (3.11)$$

La FTBO de la figure 3.4 sera :

$$FTBO (P) = \frac{K_{ic}}{P} \left( P \frac{K_{pc}}{K_{ic}} + 1 \right) \frac{1}{R_r \left( 1 + \frac{\sigma L_r p}{R_r} \right)} \quad (3.12)$$

Par compensation de pôle ce qui traduit par la condition, on trouve :

$$\frac{K_{pc}}{K_{ic}} = \sigma T_r \quad (3.13)$$

Où :

$$T_r = \frac{L_r}{R_r}$$

Alors la FTBO s'écrit maintenant comme suit :

$$FTBO (P) = \frac{k_{ic}}{R_r \cdot p} \quad (3.14)$$

Donc la FTBO de la figure 3.4 sera :

$$FTBO (P) = \frac{\frac{K_{ic}}{R_r \cdot p}}{1 + \frac{K_{ic}}{R_r \cdot p}} = \frac{1}{\frac{R_r}{K_{ic}} \cdot p + 1} \quad (3.15)$$

Par analogie de l'expression (3.15) , on trouve :

# Chapitre 03 La modélisation et commande de la machine asynchrone à double alimentation

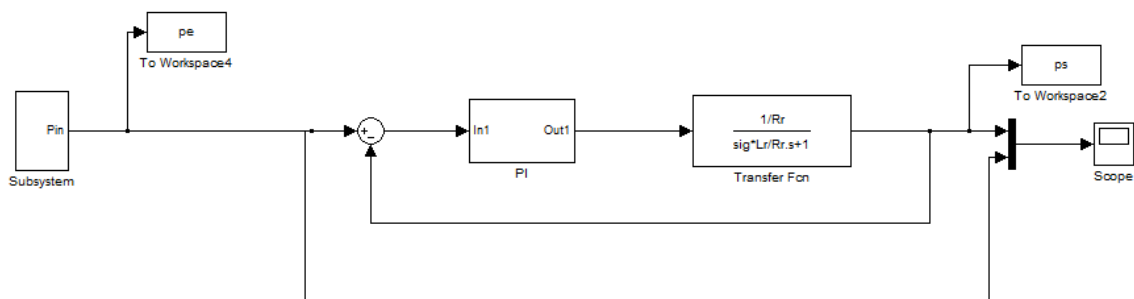
$$\tau = \frac{R_r}{K_{ic}} \tag{3.16}$$

De l'expression (3.13) et (3.15) on a :

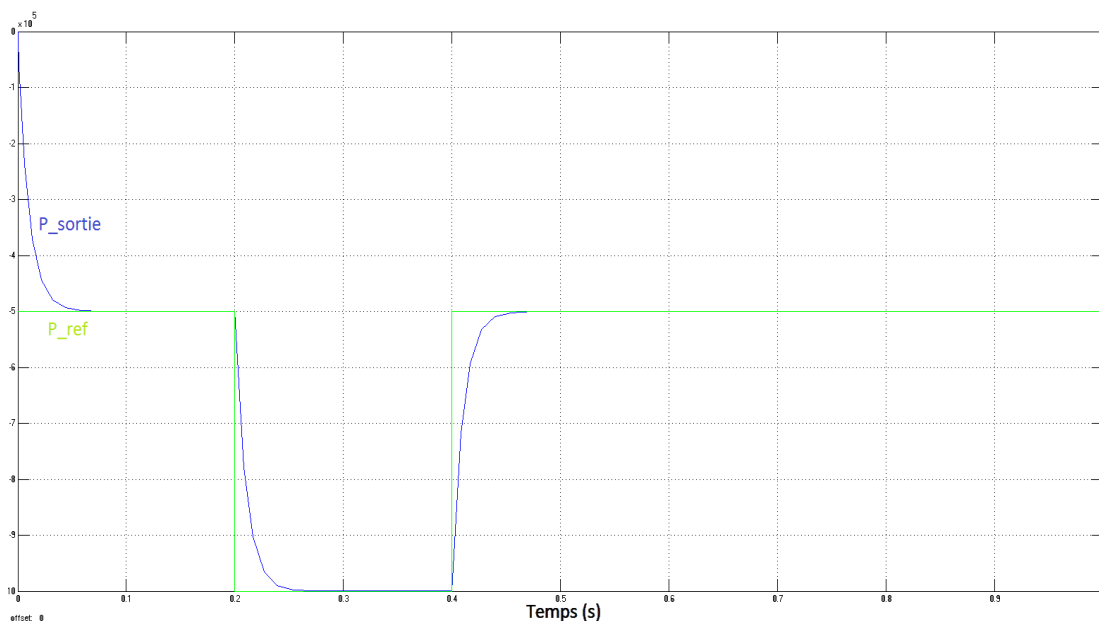
$$\begin{cases} K_{pc} = K_{ic} \tau T_r = \frac{\sigma L_r}{\tau} \\ K_{ic} = \frac{R_r}{\tau} \end{cases} \tag{3.17}$$

### 3.4 Résultats de Simulation :

On note ici, dans cette partie les résultats de simulation ont été obtenus où la MADA est alimentée par un convertisseur coté rotor à partir d'une source continue.



**Figure 3.5.** Schéma de régulation du courant  $i_{rq}$ .



**Figure 3.6.** Puissance active statorique de la commande indirecte sans boucles des puissances.

# Chapitre 03 La modélisation et commande de la machine asynchrone à double alimentation

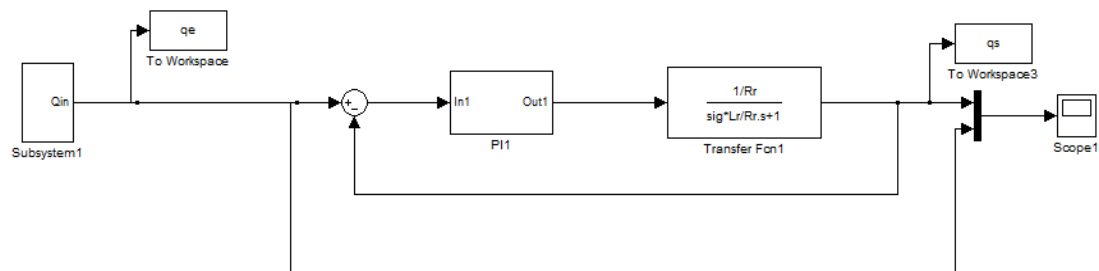


Figure 3.7. Schéma de régulation du courant  $i_{rd}$ .

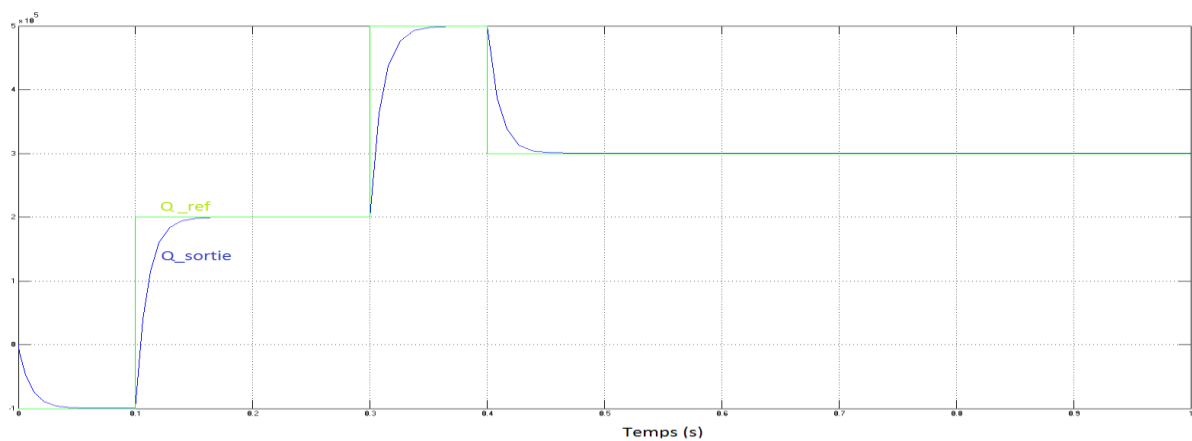


Figure 3.8. Puissance réactive statorique de la commande indirecte sans boucles des puissances.

### 3.4.1 Résultats de Simulation des Commandes Directe et Indirecte du GADA :

Pour examiner et visualiser le comportement de chaque type de commande, dans cette partie, nous avons donc soumis ces commandes à des échelons des puissances, active et réactive, statoriques.

Les paramètres de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) en mode générateur utilisée dans la simulation sont reportés en annexe.

On note ici que la vitesse mécanique qui entraîne le rotor du GADA est une vitesse fixe proche de la vitesse de synchronisme qui est égale à 152 rad/s (1452 tr/mn). Les échelons des puissances active et réactive, qui sont appliqués à chaque type de commande du GADA.

#### 3.4.1.1 Résultats de Simulation de la Commande Indirecte :

##### 3.4.1.1.1 Commande Indirecte sans Boucles des Puissances :

Les résultats obtenus montrent bien les grandes performances du contrôle indirect de la puissance active et réactive sans boucles des puissances, ceci a été confirmé par le découplage parfait et la

## Chapitre 03 La modélisation et commande de la machine asynchrone à double alimentation

---

bonne poursuite avec une réduction des ondulations au niveau de la puissance active et réactive statorique, par conséquent une minimisation des harmoniques.

### 3.5 Résultats de Simulation de la Commande Indirecte sans Boucles des Puissances à Vitesse Variable :

D'après [6] et la validation de nos résultats de simulation, nous avons trouvé que la méthode directe est que sa mise en œuvre est simple, par contre la méthode indirecte sans boucles des puissances a l'avantage de contrôler les courants rotoriques ce qui permettra de faire une protection de la machine en limitant ces courants mais elle est plus complexe à mettre en œuvre.

Dans la suite, nous allons appliquer au GADA la commande indirecte sans boucles des puissances seulement pour des raisons citées précédentes. Le fonctionnement de l'ensemble turbine-GADA est commandé vectoriellement en puissance active et réactive où le courant d'axe d ( $i_{rd}^*$ ) est déterminé à partir de la puissance réactive tandis que le courant d'axe q ( $i_{rq}^*$ ) est déterminé à partir de la puissance active issue de la stratégie MPPT.

# Chapitre 03 La modélisation et commande de la machine asynchrone à double alimentation

---

## 3.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons exposé la modélisation et la commande du système de conversion éolienne basé sur la machine asynchrone à double alimentation (MADA) en mode générateur pour la régulation de la puissance active et réactive statorique avec la commande MPPT de la turbine pour extraire le maximum de la puissance générée par le générateur.

En principe on trouve trois méthodes de contrôle du générateur asynchrone à double alimentation (GADA) sous Matlab/Simulink afin de visualiser les résultats de simulation. Une méthode directe dans laquelle les puissances active et réactive sont mesurées et comparées à leurs références. Une autre indirecte sans boucles des puissances où les courants rotoriques sont utilisés pour contrôler les puissances. Une troisième avec boucles des puissances a pour rôle d'améliorer le suivi de consigne de la commande indirecte sans boucles des puissances en y ajoutant deux boucles des puissances.

Le développement de différentes méthodes de commande a permis de mettre en évidence des aspects intéressants pour la poursuite de l'étude du système éolien. Effectivement, nous pouvons dire que la commande directe est la plus simple à mettre en œuvre, présentait des résultats convenables avec une faible complexité de mise en œuvre. En revanche, la méthode indirecte nous permet d'obtenir un système performant et robuste.

# **Chapitre 03 La modélisation et commande de la machine asynchrone à double alimentation**

---





**CONCLUSION GENERAL**

## **Conclusion général :**

Dans le cadre de la réalisation de ce travail, nous avons choisi de travailler sur la production et conversion de l'énergie éolienne. Pour cela nous avons commencé par un état de l'art sur les différents types des éoliennes de grandes puissances raccordées au réseau et leurs capacités de réglage ainsi que les différentes configurations électriques utilisées dans le domaine de l'énergie éolienne. Parmi les topologies citées, notre choix s'est porté sur l'aérogénérateur machine asynchrone à double alimentation (MADA ou GADA). Nous avons ensuite établi les modèles de ces derniers. Et après nous avons construit un dispositif de commande de l'ensemble afin de faire fonctionner l'éolienne de manière à extraire le maximum de puissance de l'énergie du vent. Les résultats de simulation de ce modèle sous Matlab/Simulink ont été présentés et discutés. La validation est faite par utilisation de la bibliographie.

## Référence bibliographiques

- [1] M. Lopez, « Contribution a l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée ». Thèse doctorat, Université Paris Sud - Paris XI, 2008.
- [2] Ahmed M. Kassem, Khaled M. Hasaneen , Ali M. Yousef , « Dynamic modeling and robust power control of DFIG driven by wind turbine at infinite grid ». *Electr Power and Energy Syst* 44 (2013).pp: 375–382.
- [3] F. Poitiers, “Etude et commande de génératrice asynchrones pour l’utilisation de l’énergie éolienne - machine asynchrone à cage autonome - machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau,” Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique de l’Université de Nantes, 2003.
- [4] S. El Aimani, “Modélisation de différentes technologies d’éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension,” Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lille, Université des Sciences et Technologies de Lille, 2004.
- [5] Y. Bekakra D. Ben Attous, “Sliding mode controls of active and reactive power of a DFIG with MPPT for variable speed wind energy conversion,” *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, Vol. 5, No. 12, pp,2011,2274-2286.
- [6] A. Boyette, “Contrôle-commande d’un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne,” Thèse de doctorat de l’université de Henri Poincaré, Nancy I, Décembre 2006.
- [7] Y. Bekakra, D. Ben attous, “Optimal tuning of PI controller using PSO optimization for indirect power control for DFIG based wind turbine with MPPT,” *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, Springer, Volume 5, Issue 3, pp. 219-229, September 2014.
- [8] A. Boyette, Ph. Poure and Sh. Saadate, “Direct and indirect control or a doubly fed induction generator wind turbine including a storage unit,” *IECO’06*, November 2006, Paris (CD Rom).
- [9] Y. Bekakra D. Ben Attous, “Sliding mode controls of active and reactive power of a DFIG with MPPT for variable speed wind energy conversion,” *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, Vol. 5, No. 12, pp,2011,2274-2286.