

République Algérienne Démocratique et Populaire.  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique.  
Université A. MIRA-BEJAIA.  
Faculté de Technologie.  
Département de Génie Electrique.



## **Mémoire de Fin d'Etudes**

En Vue de l'Obtention du Diplôme de Master En  
Electrotechnique.  
Option Energies Renouvelables.

### **Thème**

**Etude d'une éolienne autonome avec  
Un système de stockage**

#### **Réalisé Par :**

- BOUSBA Cherifa
- ZOUAOUI Thanina

#### **Encadré par :**

Mr BABOURI Rabah

**Année universitaire : 2020/2021**

# Remerciement

*On remercie dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.*

*Tous d'abord ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de Mr BABOURI Rabah, on le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.*

*Nos remerciements s'adressent également à tous nos professeurs pour leurs générosités et la grande patience dont ils ont su faire preuve malgré leurs charges académiques et professionnelles.*

# *Dédicace*

*A mes très chers parents, source de vie,*

*D'amour et d'affection*

*A mon cher frère et mes sœurs, source de*

*Joie et de bonheur*

*A toutes ma famille, source d'espoir et de*

*Motivation*

*A mon fiancé et tous mes amis*

*A vous cher lecteur*

*Cherifa*

# *Dédicace*

*Mes très chers parents*

*A mes frères et sœurs les bien aimés*

*Tous mes amis*

*Thanina*

# Table des matières

Liste des figures

Nomenclature

<b>Introduction générale</b> .....	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Généralités du système de stockage à base d'éolienne</b>	
<b>I.1. Introduction</b> .....	<b>2</b>
<b>I.2. Définition de l'énergie éolienne</b> .....	<b>2</b>
<b>I.3. Situation de l'énergie éolienne dans le monde</b> .....	<b>3</b>
<b>I.4. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne</b> .....	<b>4</b>
<b>I.5. Les différents types d'éoliennes</b> .....	<b>5</b>
<b>I.5.1. Eolienne à axe horizontal</b> .....	<b>6</b>
<b>I.5.2. Eolienne à axe domestique</b> .....	<b>6</b>
<b>I.5.3. Eolienne à axe vertical</b> .....	<b>7</b>
<b>I. 5.4. Hydrolienne</b> .....	<b>8</b>
<b>I.5.5. Eolienne pompage</b> .....	<b>9</b>
<b>I.6. Comment et fabriqué une éolienne</b> .....	<b>9</b>
<b>I.6.1. Le générateur des l'éolienne</b> .....	<b>9</b>
<b>I.6.2. Particularité d'une éolienne</b> .....	<b>9</b>
<b>I.7. Vent idéal pour fonctionnement d'une éolienne</b> .....	<b>10</b>
<b>I.8. Eolienne en fonctionnement autonome</b> .....	<b>10</b>
<b>I.9. Définition de stockage</b> .....	<b>11</b>
<b>I.10. Différente technique de stockage</b> .....	<b>11</b>
<b>I.10.1. Stockage sous forme d'énergie électrochimique</b> .....	<b>12</b>
<b>I.10.2. Stockage sous forme d'énergie thermique</b> .....	<b>12</b>
<b>I.10.3. Stockage sous forme de chaleur latente</b> .....	<b>13</b>
<b>I.10.4. Stockage sous forme de chaleur sensible</b> .....	<b>13</b>
<b>I.10.5. Stockage sous forme d'énergie cinétique</b> .....	<b>13</b>
<b>I.10.6. Stockage sous forme d'énergie gravitaire</b> .....	<b>13</b>
<b>I.10.7. Stockage sous forme chimique</b> .....	<b>14</b>

I.11. Conclusion .....	14
<b>Chapitre II : Modélisation du système éolien</b>	
II.1. Introduction .....	15
II.2. Modélisation des éléments de l'éoliennes.....	15
II.3. Modélisation de la partie mécanique .....	16
II.3.1. Modélisation de la vitesse du vent .....	16
II.3.2. Modélisation de la turbine .....	16
II.3.3. Modélisation de l'arbre mécanique.....	18
II.3.4. Modélisation du multiplicateur .....	18
II.3.4.1. Point de fonctionnement maximal .....	18
II.4. Modélisation de la partie électrique.....	19
II.4.1. Modélisation de la MADA.....	19
II.4.1.1. Mise en équation.....	19
II.4.1.2. Modélisation de la MADA dans le repère de Park.....	21
II.4.1.3. Application aux équations magnétiques.....	22
II.4.1.4. Application à l'équations mécanique.....	23
II.5. Modélisation du convertisseur statique coté charge (onduleur).....	23
II.6. Modélisation du bus continu .....	25
II.7. Modélisation de la charge R-L.....	26
II.8. Conclusion.....	26
<b>Chapitre III : Commande et simulation de l'éolienne autonome</b>	
III.1. Introduction .....	27
III.2. Commande de la turbine sans régulation de vitesse .....	27
III.3. Commande vectorielle de la MADA .....	27
III.4. Commande des onduleurs LMI sinus-triangulaire .....	29
III.5. Simulation du système .....	30
III.6. Interprétation des résultats.....	35
III.7. Conclusion .....	35

**Conclusion générale .....36**

**Annexes**

**Bibliographie**

# Liste de figures

## Chapitre I :

Fig. I.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent .....	3
Fig. I.2: Evolution des nouvelles capacités éoliennes installées.....	4
Fig. I.3: Eolienne à axe horizontal.....	6
Fig. I.4: Eolienne à axe domestique .....	6
Fig .I.5 :Eolienne à axe vertical .....	7
Fig .I.6 :Hydroeolienne.....	8
Fig. I.7: Eolienne de pompage.....	9
Fig. I.8: Construction d'une éolienne .....	10
Fig. I.9: Schéma d'une station de pompage.....	14

## Chapitre II :

Fig. II.1: Représentation schématique des éléments du système éolien .....	15
Fig. II.2: Représentation d'une MADA.....	20
Fig. II.3: Schéma du convertisseur statique coté charge (Onduleur) .....	24
Fig. II.4: Schéma du bus continue.....	25
Fig. II.5: Modèle d'une charge RL.....	26

## Chapitre III :

Fig.III.A Vecteur flux dans le système d'axe dq.....	28
Fig.III.B : Schéma bloc de la commande MPPT sans régulation de vitesse.....	29
Fig.III.C : Schéma global du système.....	30
Fig.III.1 :Allure de la vitesse du vent .....	30
Fig.III.2 : Allure de la puissance éolienne produite.....	31
Fig.III.3 : Allure de la puissance de charge à courant continu.....	31
Fig.III.4 : Allure de la tension de charge à courant continu.....	31
Fig.III.5 : Allure de courant éolien.....	32
Fig.III.6 : Allure de courant de charge à courant alternatif.....	32
Fig.III.7 : Allure de courant de charge à courant continu.....	32
Fig.III.8 : Allure de courant de stockage .....	33



**Fig.III.9** : Allure de la puissance de charge courant continue.....33

**Fig.III.1** :Allure de la vitesse du vent .....33

## Nomenclature

$\rho$  : Est la densité d'air ( $\text{Kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ).

$S$  : Est la surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pale ( $\text{m}^2$ ).

$V_v$  : Est la vitesse du vent ( $\text{m} / \text{s}$ ).

$R$  : Le rayon de la turbine ( $\text{m}$ ).

$J$  : Inertie totale de l'arbre de transmission comprenant l'inertie de la génératrice et de la turbine.

$f$  : Coefficient de frottement dynamique.

$\Omega_g$  : La vitesse d'entraînement de la MADA.

$C_g$  : Le couple d'entraînement de la MADA.

$\Omega_t$  : La vitesse, développée par la turbine éolienne.

$C_t$  : Le couple développée par la turbine.

$G$  : Le gain de multiplicateur de vitesse.

$\omega_s$  : Représente la pulsation du réseau d'alimentation triphasé statorique.

$P$  : Est le nombre de pair de pôles du champ magnétique apparaissent au stator.

$\theta$  : L'angle entre le repère statorique et le repère rotorique.

$V_{sa} V_{sb} V_{sc}$  : Les tensions par phase au stator de la machine.

$V_{ra} V_{rb} V_r$  : Les tensions par phase au rotor de la machine.

$i_{sa} i_{sb} i_{sc} i_{ra} i_{rb} i_{rc}$  : Représente les courants au stator et au rotor de la machine.

$\Phi_{sa} \Phi_{sb} \Phi_{sc} \Phi_{ra} \Phi_{rb} \Phi_{rc}$  : Représente les flux propres circulant au stator et au rotor de la machina.

$R_r$  : est la résistance des enroulements statorique.

$R_s$  : est la résistance des enroulements rotorique.

$L_s$  : Inductance propre des enroulements statoriques.

$L_r$  : Inductance de l'enroulement rotorique.

$L_{fs}$  : Inductance de fuite des enroulements statorique.

$L_{fr}$  : Inductance des fuites des enroulements rotorique.

$M_s$  : Inductance mutuelle entre des enroulements statorique.

$M_r$  : Inductance mutuelle entre des enroulements rotorique.

$M_{sr(123)}$  : Inductance mutuelle entre les enroulements statorique et rotorique ;

La matrice  $L[\theta]$  fait apparaître quatre sous-matrices inductances :

$M_{\max}$  : La valeur maximale des inductances mutuelles entre les phases du stator et les phases du rotor.

$i_{eol}$  : Courant fourni par le système éolien [A].

$i_c$  : Courant qui traverse la capacité [A].

$i_{batt}$  : Courant de la batterie [A].

$R$  : Résistance de la charge inductive

$L$  : Inductance de la charge inductive



*INTRODUCTION*  
*GENERALE*

## Introduction Générale

Les énergies renouvelables sont des énergies issues du soleil, du vent, de la géothermie, ses chutes d'eau, des marées ou de biomasse ; leur exploitation n'engendre pas ou peu de déchets et d'émissions polluantes : ce sont les énergies de l'avenir !

Actuellement, l'énergie éolienne est l'une de ces énergies renouvelables les plus sollicitées pour la production de l'énergie électrique, aussi bien pour des sites isolés que comme appoint pour les réseaux interconnectés. Elle peut être une alternative contribuant à la réduction de la demande de plus en plus galopante de l'électricité. Le développement et la multiplication de l'utilisation de chaînes de conversion de l'énergie éolienne ont conduit les industriels et les scientifiques à s'investir dans l'amélioration des indices technico-économiques de cette conversion et la qualité de l'énergie fournie [1].

Il existe de nombreux sites isolés dans le monde, alimentés par des systèmes autonomes de génération de l'électricité. Ces générateurs utilisent les sources renouvelables locales (solaire, éolienne, hydraulique, biomasse et etc.). Dans ces systèmes autonomes, le moyen de stockage d'énergie présente un point très important et primordial. L'utilisation de sources d'énergie renouvelable induit le concept de stockage d'électricité en raison de la disponibilité intermittente de telles ressources. Les sites géographiquement isolés et non raccordés au réseau sont donc alimentés par un système de sources renouvelables et un système de stockage pour assurer la continuité de la production lorsque l'énergie renouvelable récupérée est insuffisante [1].

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à l'étude et la modélisation d'une chaîne complète de conversion d'énergie éolienne autonome, basée sur une machine asynchrone double alimentations avec un système de stockage [1].

Ce mémoire est subdivisé en trois parties :

Le premier chapitre contient deux parties. La première partie présente une description de l'éolien, son mode de fonctionnement, différents types de l'éolien en citant les avantages et les inconvénients et puis la situation de l'énergie éolienne dans le monde et l'Algérie en particulier. La deuxième partie décrit les différentes techniques de stockage d'énergie électrique.

Le deuxième chapitre présente une modélisation des différents éléments composants notre système ; la partie mécanique tel que : la turbine éolienne et la partie électrique tel que : la MADA et la modélisation des différents convertisseurs (onduleur).

Dans le chapitre trois nous avons fait une commande et une simulation du système globale d'une éolienne autonome. Et nous avons terminé par une conclusion générale



# *CHAPITRE I*

**Etat de l'art des systèmes  
de stockage à base  
d'éolienne**

### I.1. Introduction

Le début de l'utilisation de l'énergie éolienne remonte à approximativement 3 000 ans avant J.-C., dans le cadre de l'utilisation des premiers bateaux à voile. Après, les premiers moulins à vent sont inventés par les Perses vers 200 avant J.-C. Cette technique n'est ensuite importée en Europe qu'au XII<sup>e</sup> siècle [2].

Le développement des moulins à vent n'a pas cessé d'augmenter, depuis que l'on a connu le moulin à vent.

De différentes technologies sont utilisées pour le captage du vent et c'est au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes ont été utilisés avec succès pour générer du vent. Une éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, dite énergie éolienne, laquelle est ensuite le plus souvent transformée en énergie électrique [3].

L'énergie éolienne est une source d'énergie qui dépend du vent. Le soleil chauffe inégalement la terre, ce qui crée des zones de températures et de pression atmosphérique différentes tout autour du globe. De ces différences de pression naissent des mouvements d'air, appelés vent. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité dans des éoliennes, appelées aussi aérogénérateurs, grâce à la force du vent [4].

Cette forme d'énergie est l'une des premières à avoir été utilisée après l'exploitation du bois comme combustible. Nous ne pouvons malheureusement recueillir qu'une partie infime de l'immense quantité d'énergie qu'il produit [5].

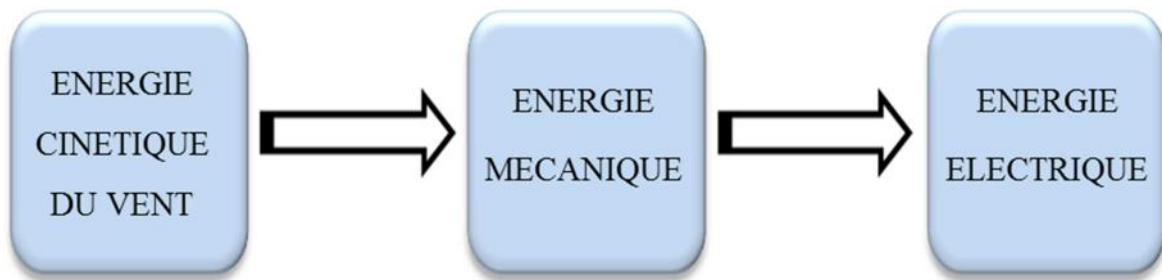
Comme les autres sources d'énergies renouvelables qui permettent de produire de l'électricité verte, l'énergie éolienne est difficile à stocker. Si l'on ajoute à cela une production électrique discontinue, la question du stockage de l'énergie éolienne prend encore plus d'importance. Parvenir à stocker de l'énergie produite de manière épisodique, c'est pouvoir se donner la possibilité de l'utiliser n'importe quand pour répondre aux besoins du réseau. Cette problématique n'a rien de simple et de nombreuses techniques existent qui ont chacune leurs coûts, leurs avantages et leurs inconvénients [5].

### I.2 Définition de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice [6].

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en

hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences.



**Fig. I.1 :** Conversion de l'énergie cinétique du vent [6].

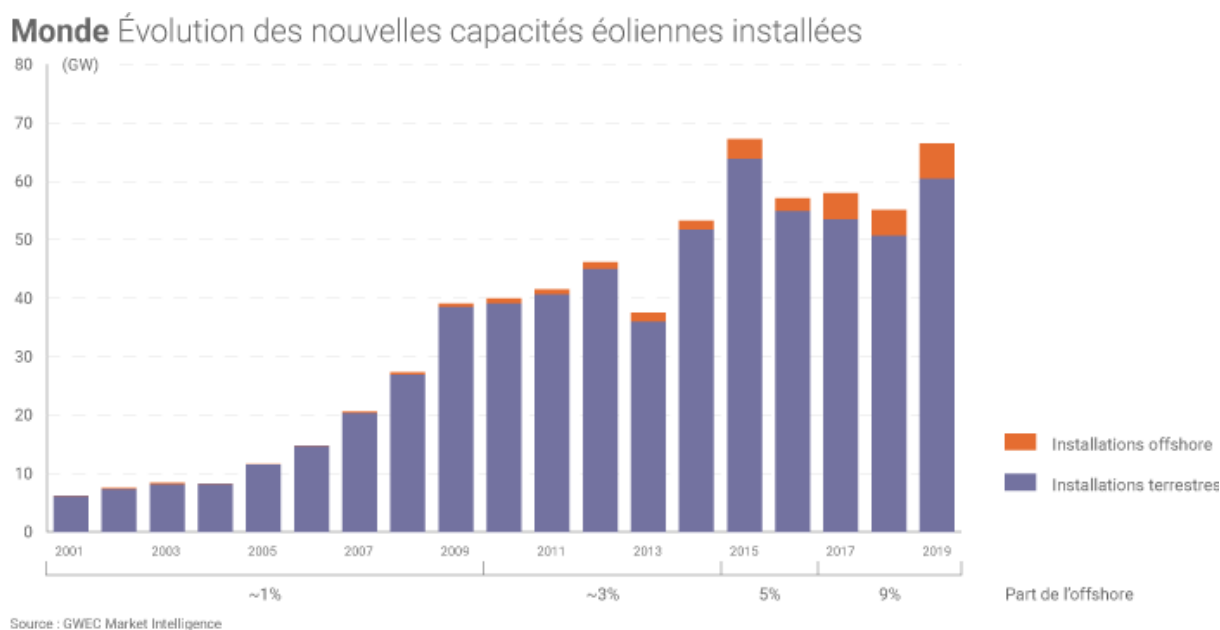
### **I.3. Situation de l'énergie éolienne dans le monde :**

En 2019, près de 60,4 GW de capacités éoliennes ont été installées dans le monde (dont 6,1 GW offshore), soit 19% de plus qu'en 2018 (50,7 GW). Il s'agit de « la deuxième meilleure année » de Développement dans l'histoire de la filière. Au total, la puissance installée du parc éolien mondial atteignait 651 GW à fin 2019 [7].

Ces données de puissance doivent être rapportées à la production d'électricité associée. Selon le GWEC, le parc éolien mondial a généré 1 390 TWh en 2019. Cette production équivaldrait ainsi à près de 5,8% de la consommation annuelle d'électricité dans le monde [7].

Les facteurs de charge moyens des parcs éoliens au niveau mondial sont estimés par le GWEC à 23% pour les installations terrestres et à 40% pour celles implantées en mer.





**Fig. I.2:** Evolution des nouvelles capacités éoliennes installées [7].

Et pour les études faites par rapport à l'Algérie :

Selon le premier Atlas Vent de l'Algérie établi par l'ONM en 1990 (8), les vitesses les plus élevées sont de l'ordre de 6 m/s et sont localisées dans la région d'Adrar. Ces résultats, qui avaient été obtenus à partir d'un traitement statistique des données vent couvrant jusqu'à 10 années de mesures, sont la base des cartes éoliennes établies par les chercheurs du CDER [8].

Mais récemment, dans le nouvel Atlas éolien établi par l'ONM l'existence de sites ventés dans d'autres régions du Sud a été mise en évidence. Outre Adrar, les régions de Tamanrasset, Djanet et In Salah disposeraient d'un potentiel éolien exploitable. A noter que lors de l'élaboration du premier Atlas, seules 36 stations météorologiques existaient alors que pour le dernier Atlas, le nombre de points de mesures est passé à 74.

Cependant, étant donnée la superficie du territoire algérien, ce dernier chiffre reste faible. Des stations de mesures éoliennes complémentaires sont en cours d'installation. Le gisement éolien en Algérie est donc toujours en cours d'évaluation [8].

### **I.4. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :**

Comme les autres énergies, l'énergie éolienne présente quelques avantages et inconvénients.

### a. Avantages :

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui ne nécessite aucun carburant, ne crée pas de gaz à effet de serre, ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs.
- La production éolienne d'électricité suit notre consommation d'énergie : le vent souffle plus souvent en hiver, cette saison étant celle où la demande d'électricité est la plus forte.
- L'énergie éolienne est l'une des sources de production d'électricité permettant de parvenir à moindre coût à la réalisation des objectifs.
- L'énergie éolienne offre la possibilité de réduire les factures d'électricité et peut vous permettre de vous mettre à l'abri des ruptures de courant [9].

### b. Inconvénients :

- L'électricité éolienne est une énergie intermittente, l'énergie éolienne ne suffit pas en elle-même à définir une politique énergétique et environnementale, la solution serait de coupler l'électricité éolienne à des panneaux solaires photovoltaïques.
- Des effets sur le paysage (esthétique), problème de bruit [9].

## I.5. Les différents types d'éoliennes

On distingue les éoliennes on shore (sur les continents), et les éoliennes off-shore (sur la mer). Ces dernières présentent des avantages au niveau des nuisances sonores puisqu'elles sont éloignées des habitations et au niveau des vents car les vents marins sont plus nombreux et plus forts que les vents continentaux. En revanche, elles sont beaucoup plus difficiles à installer et donc beaucoup plus coûteuses [6].

- Les éoliennes à axe horizontal
- Les éoliennes à axes verticaux
- Les éoliennes domestiques
- Les hydroliennes
- Eolienne de pompage

Les deux premières sont les plus utilisées.

La hauteur totale de ces éoliennes varie entre 25 et 180m pour une puissance qui va de 100 KW à 5 MW.

### I.5.1. Eolienne à axe horizontal



**Fig.I.3** : Eolienne à axe horizontal

### I.5.2. Eolienne à axe domestique



**Fig.I.4** : Eolienne à axe domestique .

Leur taille n'excède pas les 12m et elles ont une puissance comprise entre 100W et 20Kw. Leur implantation en France est encore très faible, environ 600. (Beaucoup moins que dans certains autres pays européens).

Les éoliennes horizontales ou domestiques peuvent être de type « aval » ou « amont ». Dans la majorité des cas, ce sont des éoliennes « amont », c'est-à-dire que le vent souffle directement sur les pâles de l'éolienne. Cela implique l'utilisation de pâles très rigides car elles sont très exposées au vent.

La configuration « aval » est utilisée plus particulièrement pour les petites éoliennes qui sont munies de pâles plus fragiles.

### I.5.3. Eoliennes à axe vertical



**Fig.I.5 :** Eolienne à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical sont plus onéreuses que les éoliennes à axe horizontal et de conception plus complexes mais s'adaptent plus facilement à des zones de vent irrégulier. Une éolienne à axe vertical est surtout utile dans les endroits où il n'y a pas beaucoup de place : en ville, sur le toit d'un immeuble par exemple.

Il existe deux modèles d'éoliennes à axe vertical : Savonius et Darrieus

#### **Darrieus :**

Elles sont peu encombrantes, ne nécessitent pas de systèmes d'orientations et sont simples à installer. Par contre, elles ont un faible rendement et ne démarrent pas toutes seules.

#### **Savonius :**

Cette éolienne a également un faible rendement par rapport à une éolienne classique mais elle a l'avantage de fonctionner avec toutes les directions du vent. L'éolienne est compacte et le fait d'être sur un axe vertical diminue les vibrations ce qui peut être très contraignant sur un bâtiment.

### I.5.4. Hydrolienne

Les hydroliennes sont des éoliennes spécifiques qui fonctionnent sous l'eau en utilisant l'énergie des courants marins. Ce sont des éoliennes sous-marines ou aérogénérateurs marins.

Le développement des hydroliennes est très récent et déjà très prometteur. Si la fabrication des éoliennes terrestres est beaucoup moins complexe que celle des hydroliennes, ces dernières peuvent déployer une puissance beaucoup plus grande pour une taille beaucoup plus petite. Cela est dû au fait que l'énergie des courants marins est 800 fois supérieure à celle du vent. Les variations au sein des courants marins sont également beaucoup plus faibles que les variations du vent.

L'inconvénient majeur des hydroliennes est son impact sur l'environnement marin : si les hélices tournent assez lentement et créent moins de perturbations que les hélices d'un bateau, les hydroliennes créent cependant des zones de turbulence plus grandes empêchant le développement de la faune et de la flore marine sur de grands périmètres.

Les hydroliennes étant sous l'eau, l'érosion est très forte et pour l'instant la durée de vie des hydroliennes est assez limitée. L'installation d'hydroliennes notamment au niveau des courants de marée reste une voie très intéressante pour la production d'énergie nouvelle.



**Fig.I.6** : Hydrolienne

### I.5.5. Eolienne de pompage



**Fig. I.7:** Eolienne de pompage.

### I.6. Comment est fabriquée une éolienne ?

Pour ce faire, on utilise, entre autres, les éoliennes à forte puissance ou les éoliennes domestiques. Ces dernières sont composées d'un mât et d'une hélice multi-pale et mesurent entre 60 centimètres et 35 mètres. Dans la partie haute de l'éolienne, se trouvent le générateur (pièce maîtresse), et une hélice qui se compose de 2 ou 3 pales. Sous l'action du vent, ces pales se mettent en mouvement et entraînent le générateur qui produit de l'électricité [6].

#### I.6.1. Générateur de l'éolienne

La génératrice de l'éolienne nécessite un alternateur, c'est-à-dire que le courant produit doit être alternatif. Le courant continu pourrait être fonctionnel mais possède des défauts (perte durant le transport et risque de surchauffe des câbles). Un alternateur est composé d'un rotor (partie en mouvement) et d'un stator (partie statique). Le premier produit l'électricité qui sera recueillie dans le deuxième [6].

Le générateur électrique (ou moteur) agit comme un calculateur qui va donner plus ou moins de force et de vitesse aux électrons (présents dans les atomes de cuivre) utilisant le magnétisme. Plus le champ magnétique ne sera fort et sa vitesse importante, plus l'électricité produite sera abondante [6].

#### I.6.2. Particularité d'une éolienne

Les éoliennes fonctionnent généralement avec un générateur à aimants permanents. Ce générateur à coût moindre a une vitesse d'amorçage supérieure et son rendement est excellent.

Il dispose également d'un freinage « dynamique » [6].

### I.7. Vent idéal pour le fonctionnement d'une éolienne :

Le vent a beau être une source d'énergie gratuite et écologique, il n'en est pas moins capricieux. Il faut tenir compte de nombreux paramètres pour savoir si le terrain est adapté et si la production d'électricité sera rentable (zone venteuse ou non, hauteur de l'axe de l'éolienne, longueur des pales, obstacles locaux...). Il est préférable bien sûr d'installer une éolienne dans une région venteuse. Cependant, des vents trop forts peuvent détruire l'éolienne, il est donc important qu'elle soit équipée d'un frein ou d'une palette qui bloque la machine. Des vents faibles produisent peu d'énergie. C'est pourquoi, les vents moyens réguliers sont idéaux pour faire fonctionner une éolienne domestique.

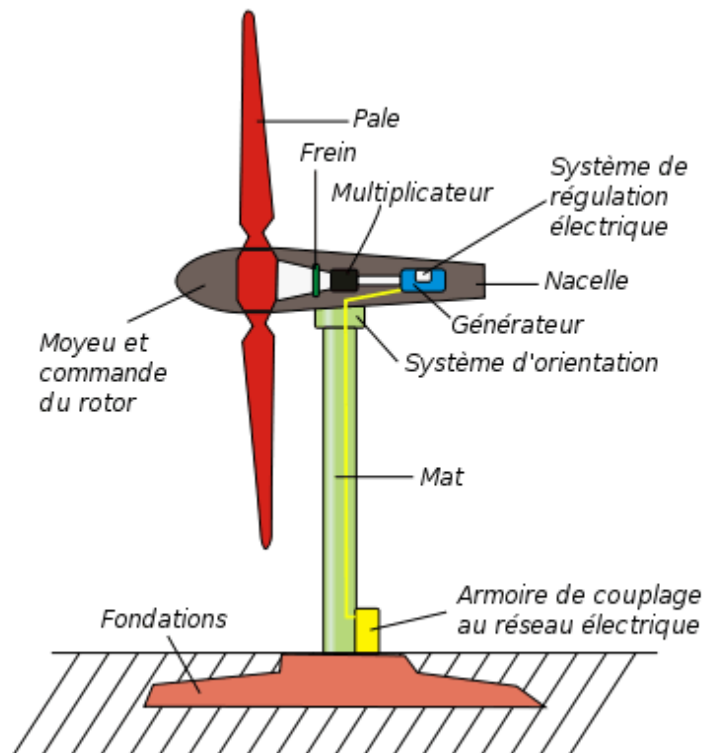


Fig. I.8 : Construction d'une éolienne [6].

### I.8. Eolienne en fonctionnement autonome

De plus en plus d'applications ne peuvent pas être reliées au réseau à cause de la complexité de la connexion à celui-ci ou du coût d'installation. Ces sites peuvent alors être alimentés en électricité par l'énergie renouvelable. Dans la plupart des régions isolées et ventées, l'énergie éolienne constitue la principale source potentielle d'énergie électrique. La baisse continue des

prix des aérogénérateurs et les développements technologiques de l'électronique de puissance, conduisent à une utilisation d'éoliennes autonomes de plus en plus courante dans ces régions isolées [9].

La conception des petits systèmes éoliens est considérablement différente de celle des éoliennes connectées aux grands réseaux. Le générateur synchrone à aimants permanents est une solution très intéressante dans les applications des petits systèmes éoliens autonomes, vu ses avantages (un bon rendement et un bon couple massique). Ces différentes structures de machines synchrones à aimants permanent alimentant des charges autonomes à travers des dispositifs d'électronique de puissance pour obtenir une tension alternative à fréquence constante si nécessaire [9].

Ces éoliennes sont associées à des unités de stockage d'énergie, généralement constituées de batteries d'accumulateur. Ces dernières se chargent par l'aérogénérateur. Soit directement par une génératrice synchrone à aimant permanent par l'intermédiaire d'un pont redresseur. La tension continue des batteries est utilisée soit directement ou alors mise en forme par onduleur pour obtenir une alimentation sinusoïdale de fréquence 50HZ [9].

### **I.9. Définition de stockage**

Le stockage de l'énergie consiste à garder une quantité d'énergie sous une forme utilisable en un lieu donné pour un usage ultérieur.

On rencontre deux modes de production d'énergie où l'importance du stockage apparaît clairement

- Cas de production d'énergie conventionnelle dont le stockage permet de pallier une défaillance momentanée d'une unité de génération et de satisfaire une obligation commerciale de fourniture d'énergie
- Cas de production d'énergie renouvelable dont le stockage apporte de la valeur au courant fourni en rendant ce type d'énergie prévisible de l'énergie [12].

### **I.10. Différentes techniques de Stockage**

Physiquement, l'électricité peut être stockée directement dans des condensateurs et dans des inductances. Cependant, même avec les super-condensateurs ou avec les inductances supraconductrices, les quantités d'énergie qu'il est possible de confiner avec ces composants sont faibles.



Le stockage de l'électricité peut se faire d'une façon significative. Il faut d'abord la transformer en une autre forme d'énergie stockable, puis effectuer la transformation inverse lorsqu'on désire disposer à nouveau de l'électricité.

Les possibilités techniques sont très vastes et concernent pratiquement toutes les formes d'énergie : mécanique, chimique ou thermique.

Un classement des techniques de stockage peut se faire, selon leur nature d'applications, en 2 catégories :

- Techniques de stockage à grande échelle dont les usages peuvent être utilisés par un gestionnaire de réseau. Ces techniques comprennent le stockage : sous forme d'énergie gravitaire (systèmes hydrauliques), sous forme d'énergie thermique, sous forme d'énergie de pression (air comprimé), sous forme chimique (batteries chimiques).
- Techniques de stockage à moyenne et faible échelles dont les usages peuvent également servir le réseau, mais aussi la production décentralisée pour de nombreuses applications. Ces techniques comprennent le stockage : sous forme mécanique (volants d'inertie), sous forme électrochimique (accumulateurs et super condensateurs), sous forme magnétique, ou sous forme d'air comprimé ou d'hydrogène (piles à combustible) [12].

Mais en tout il existe plusieurs techniques, les techniques principales sont :

### **I.10.1. Stockage sous forme d'énergie électrochimique**

Le stockage d'énergie dans une bobine supraconductrice est l'un de deux systèmes de stockage direct de l'électricité, sous la forme d'un courant électrique continu circulant dans une bobine. Ce courant augmente pendant la charge et décroît pendant la décharge et doit être converti pour être exploitable sous forme de tension continue ou alternative.

### **I.10.2. Stockage sous forme d'énergie thermique**

Il existe dans le sous-sol de nombreux gisements géothermiques, dans lesquels se trouve stockée naturellement une grande quantité d'énergie calorifique.

Le stockage d'électricité sous forme thermique s'apparente à ces installations et il est préférable de distinguer, par analogie, deux types de stockage de chaleur suivant qu'ils font appel à la chaleur sensible ou à la chaleur latente.

### I.10.3. Stockage sous forme de chaleur latente

Le stockage thermique par chaleur latente de fusion met en œuvre le changement d'état liquide-solide d'un matériau à température constante.

Le principe est le suivant : pendant l'accumulation, on porte un corps de l'état solide à l'état liquide et, pendant la restitution, on le ramène à l'état solide. Les transferts de chaleur entre l'accumulateur thermique et le milieu extérieur s'effectuent par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur. La soude est un bon fluide de stockage qui présente de grandes qualités malgré son aspect très corrosif. La soude a une température de fusion élevée, un coefficient de conductivité thermique satisfaisant, une grande stabilité à chaud et une pression de vapeur très faible. Entre 120 °C et 360 °C, elle présente une capacité spécifique (massique ou volumique) de stockage thermique de 744 MJ/t ou 1332MJ/m<sup>3</sup>.

### I.10.4. Stockage sous forme de chaleur sensible

C'est le procédé le plus simple : on chauffe un corps (sodium, sel, eau sous pression, etc.) qui ne subit pas de changement d'état pendant la phase d'accumulation ; la chaleur est ensuite récupérée pour produire de la vapeur d'eau qui entraîne un groupe turbo- alternateur.

### I.10.5. Stockage sous forme d'énergie cinétique

Stocker de l'énergie à l'aide d'un mobile en mouvement n'est pas une idée récente, elle a été utilisée depuis longtemps, en particulier, pour régler la vitesse de rotation des transmissions de puissance.

Le principe de base est simple. Un corps solide de moment d'inertie  $I$  (Kg.m<sup>2</sup>), tournant à la vitesse angulaire  $\omega$  autour d'un axe passant par son centre de gravité.

### I.10.6. Stockage sous forme d'énergie gravitaire

Les systèmes hydrauliques gravitaires sont des centrales d'accumulation par pompage-turbinage (pumped hydro), technologie actuellement largement dominante dans les grandes puissances (quelques dizaines de GWh ou centaines de MW).

Si l'on veut stocker de l'énergie électrique, il faut utiliser des stations de transfert d'énergie par pompage (STEP) qui permettent de pomper et turbiner cycliquement la même eau entre un bassin supérieur et un bassin inférieur.

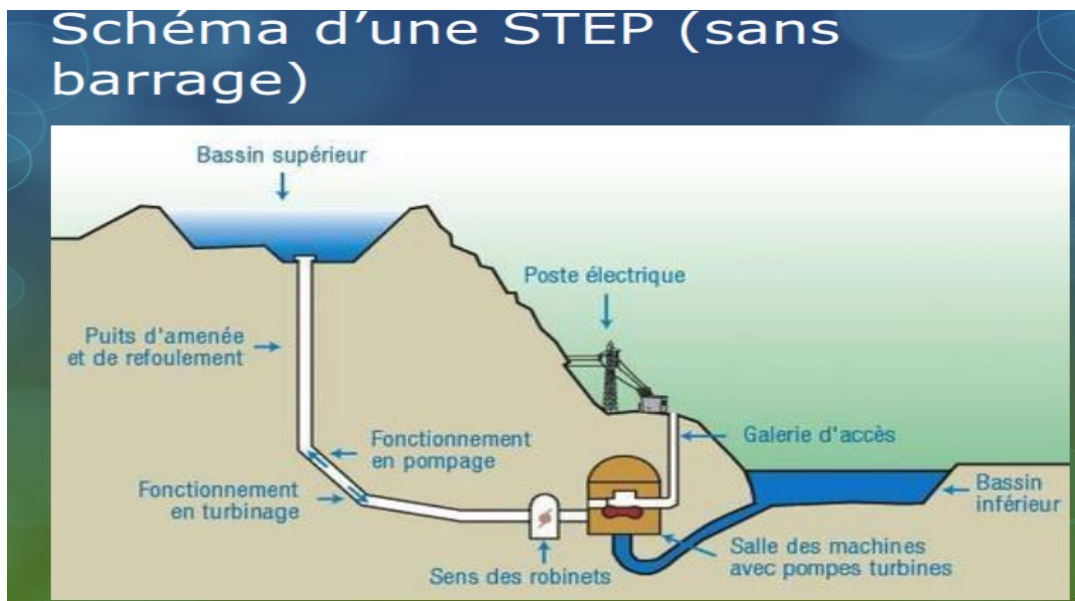


Fig. I.9: Schéma d'une station de pompage.

### I.10.7. Stockage sous forme chimique

Le stockage sous forme chimique se fait à l'aide des accumulateurs. Ces systèmes remplissent la double fonction de stockage et de déstockage de l'électricité en alternant les phases de charge et de décharge. Ils présentent la propriété de pouvoir transformer de l'énergie chimique générée par des Réactions électrochimiques en énergie électrique et réciproquement, sans émission de polluants, sans nuisances sonores et avec des conditions de maintenance réduites.

Autres techniques :

- Stockage sous forme d'énergie des pressions
- Stockage d'électricité couplé avec un stockage de gaz naturel
- Stockage d'électricité avec un stockage de gaz liquéfié
- Stockage dans des super condensateurs
- Stockage sous forme d'hydrogène

### I.11. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné une brève description de l'éolienne, ses différentes structures de fonctionnement, avantages et inconvénients. Nous avons cité quelques techniques de stockage.

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons la modélisation de différentes parties du système conversion.



# CHAPITRE II

## *Modélisation du système éolien*

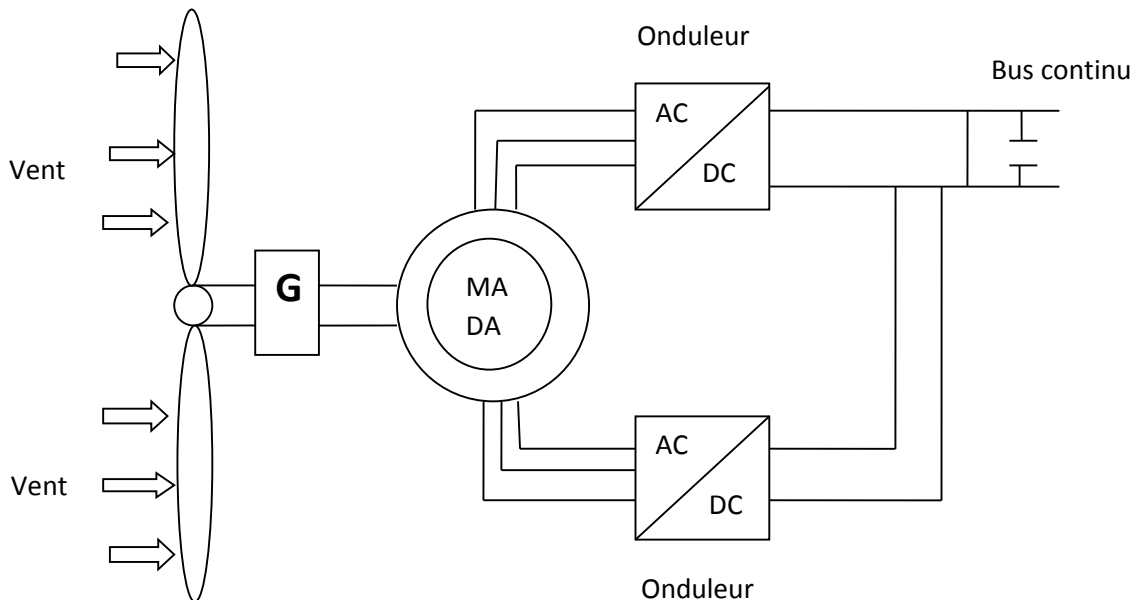
### II.1. Introduction

Les progrès de simulation et du génie des logiciels permettent de réaliser des modélisations performantes et de guider les développements par une qualification des phénomènes. La modélisation du système physique donné consiste à établir son modèle mathématique. Cette dernière est une étape indispensable, qui doit précéder toute phase d'optimisation ou de simulation. En outre, elle est d'un apport précieux en permettant de prévoir des comportements du système plus variés que ceux de l'observation expérimentale. Dans le but d'amélioration des résultats on a reparti l'étude en deux grandes parties essentielles :

- ✓ Consacrée pour l'étude et la modélisation de différents dispositifs incluent dans la chaîne de conversion éolienne dans l'unité puissance afin d'atteindre la simplification des modèles mathématiques de ses dispositifs en vue de leur commande.
- ✓ Définir la stratégie de commande de stockage. A la fin, les résultats de simulation seront présentés et interprétés.

### II.2. Modélisation des éléments de l'éolienne

La figure ci-dessous représente les différentes parties du système éolien étudié



**Fig.II.1** : Représentation schématique des éléments du système éolien.

### II.3. Modélisation de la partie mécanique

#### II.3.1. Modélisation de la vitesse de vent

La vitesse du vent est la grandeur d'entrée du système de conversion d'énergie éolienne. L'énergie cinétique contenue dans le vent est transformée en partie en énergie mécanique par la turbine, puis en énergie électrique par le générateur.

C'est donc une variable importante à modéliser, la précision des simulations dépendra de la qualité de son modèle. La vitesse du vent est généralement représentée par une fonction scalaire qui évolue dans le temps [10].

$$V_v = f(t) \dots \dots \dots \text{(II.1)}$$

#### II.3.2. Modélisation de la turbine

Un système éolien transforme l'énergie de la masse d'air en mouvement et délivre une puissance mécanique caractéristique par la vitesse de rotation et le couple mécanique.

La modélisation de la turbine consiste à exprimer la puissance extractible en fonction de la vitesse incidente du vent et des conditions de fonctionnement, sa vitesse de rotation en particulier. Cela permettra de connaître le couple appliqué sur l'arbre de l'éolienne.

L'énergie cinétique  $E_c$  d'une masse d'air  $m$  qui se déplace avec la vitesse  $V_{vent}$  (m/s) , est [10].

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V_v^2 \dots \dots \dots \text{(II.2)}$$

La puissance maximale disponible d'un site pour une vitesse du vent donnée est proportionnelle au produit de la surface ( $S = \pi \cdot R^2$ ) balayée par les pâles et le cube de la vitesse du vent. Elle est donnée par la relation suivante [10].

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_v^3 \dots \dots \dots \text{(II.3)}$$

Avec :

$\rho$ : est la densité d'air ( $\text{Kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) ;

$S$ : Est la surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pôle ( $\text{m}^2$ ) ;

$V_v$ : est la vitesse du vent ( $\text{m} / \text{s}$ ).

Selon la loi de Betz, cette puissance ne pourra jamais être extraite dans sa totalité. La puissance maximale pouvant être recueillie par une éolienne est égale à la limite de Betz [10].

## CHAPITRE II : Modélisation du système éolien

---

$$P_{\max} = \frac{16}{27} \cdot P_v = 0,59 \cdot P_v \dots\dots\dots(\text{II.4})$$

La formule de Betz dans ce cas montre que l'énergie maximale susceptible d'être recueillie par un aérogénérateur ne peut pas dépasser en aucun cas 59% de l'énergie cinétique de la masse d'air qui le traverse par seconde. de cette façon le coefficient de puissance maximal théorique est défini par [10].

$$C_{p \text{ opt}} = \frac{P_{\max}}{P_v} = \frac{2 \cdot P_{\max}}{\rho \cdot S \cdot V_v^3} = 0,59 \dots\dots\dots(\text{II.5})$$

Ce rendement, appelé coefficient de puissance  $C_p$  de l'éolienne, est propre à chaque voilure. Ce dernier lie la puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine à la vitesse du vent par [10].

$$C_p = \frac{2 \cdot P_{aér}}{\rho \cdot S \cdot V_v^3} \dots\dots\dots(\text{II.6})$$

La puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit alors : [10].

$$P_{aér} = C_p \cdot P_{vent} = C_p(\lambda, \beta) \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot V_{vent}^3}{2} \dots\dots\dots(\text{II.7})$$

Pour décrire la vitesse de fonctionnement d'une éolienne, une grandeur spécifique est utilisée la vitesse spécifique  $\lambda$ , qui est le rapport de la vitesse de l'extrémité des pâles de l'éolienne et la vitesse de vent [10].

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_t}{V_v} \dots\dots\dots(\text{II.8})$$

Avec :

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

**R**: Le rayon de la turbine (**m**) ;

Connaissant la vitesse de la turbine, le couple aérodynamique est donc directement déterminé par : [10].

$$C_{aér} = \frac{P_{aér}}{\Omega_t} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot V_v^3}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_t} \dots\dots\dots(\text{II.9})$$

### II.3.3. Modélisation de l'arbre mécanique

La transmission de puissance est composée de l'inertie de rotor de la turbine et de la génératrice, telle que [10].

$$J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega = C_{em} - C_t \dots \dots \dots (II.10)$$

Le couple visqueux dû aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux. [10].

$$C_{vis} = f\Omega \dots \dots \dots (II.11)$$

Avec :

$J$  : Inertie totale de l'arbre de transmission comprenant l'inertie de la génératrice et de la turbine.

$f$  : Coefficient de frottement dynamique

### II.3.4. Modélisation du multiplicateur de vitesse

Le multiplicateur de vitesse adapte la vitesse de rotation de la turbine, disponible sur l'arbre lent à la vitesse de la MADA. Le modèle mathématique de ce multiplicateur est donné par les équations suivantes [10].

$$C_g = \frac{C_t}{G} \dots \dots \dots (II.12)$$

$$\Omega_t = \frac{\Omega_g}{G} \dots \dots \dots (II.13)$$

$c_g, \Omega_g$ : Le couple et la vitesse d'entraînement de la MADA respectivement ;

$C_t, \Omega_t$ : Le couple de la vitesse, développée par la turbine éolienne respectivement ;

G: Le gain de multiplicateur de vitesse.

#### II.3.4.1. Point de fonctionnement à puissance maximale

La caractéristique  $C_p(\lambda)$  qui est de forme parabolique admet un maximum  $C_{p_{max}}$  pour  $\lambda_{opt}$ . La vitesse de la génératrice est asservie à une référence issue d'un algorithme permettant l'extraction maximale de la puissance, lui-même nécessitant la mesure ou l'estimation de la vitesse du vent. Ce principe est connu sous la terminologie Maximum Power Point Tracking (M.P.P.T). Pour une vitesse de vent  $V$  donné correspond une vitesse de rotation qui donne  $\lambda_{opt}$  et par conséquent, pour que le système fonctionne en puissance maximale, la loi de commande pour la référence du couple électromagnétique est [10].



$$C_{em} = K \cdot \Omega^2 \dots\dots\dots (II.14)$$

Avec :

$$K = \frac{C_{p_{max}} \rho}{\lambda_{opt}^3} \frac{\pi R^5}{2 G^3} \dots\dots\dots (II.15)$$

### II.4. Modélisation de la partie électrique

#### II.4.1. Modélisation de la MADA

Trois enroulements couplés en étoile alors la réaction d'un champ magnétique glissant dans l'entrefer la machine la vitesse de glissement de ce champ par rapport au stator est: Machine asynchrone triphasé est formée d'un stator fixe et d'un rotor cylindrique mobile le stator à [11]

$$\Omega = \frac{\omega_s}{p} \dots\dots\dots (II.16)$$

$\omega_s$  : représente la pulsation du réseau d'alimentation triphasé statorique

$p$  : est le nombre de pair de pôles du champ magnétique apparaissent au stator.

Le rotor de la machine supporte un bobinage triphasé avec même nombre de pôles que celui du stator couplé en étoile. Ce type de rotor est dit bobiné. Le rotor tourne par rapport au stator à la vitesse [11].

$$\Omega_{mec} = \frac{d\theta}{dt} \dots\dots\dots (II.17)$$

$\theta$  : L'angle entre le repère statorique et le repère rotorique.

##### II.4.1.1. Mise en équation

La modélisation de la machine asynchrone appuie sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices, à savoir :

- L'entrefer entre le rotor et le stator constant ;
- L'effet d'encoches ainsi l'effet de peau sont négligeables ;
- Circuit magnétique non saturé ;
- Les pertes ferromagnétiques sont négligées ;
- Les grandeurs homopolaires nulles ;

De ce fait, tous les coefficients d'inductances propres sont constants et les coefficients d'inductance mutuelle ne dépendent que de la position des enroulements [11].

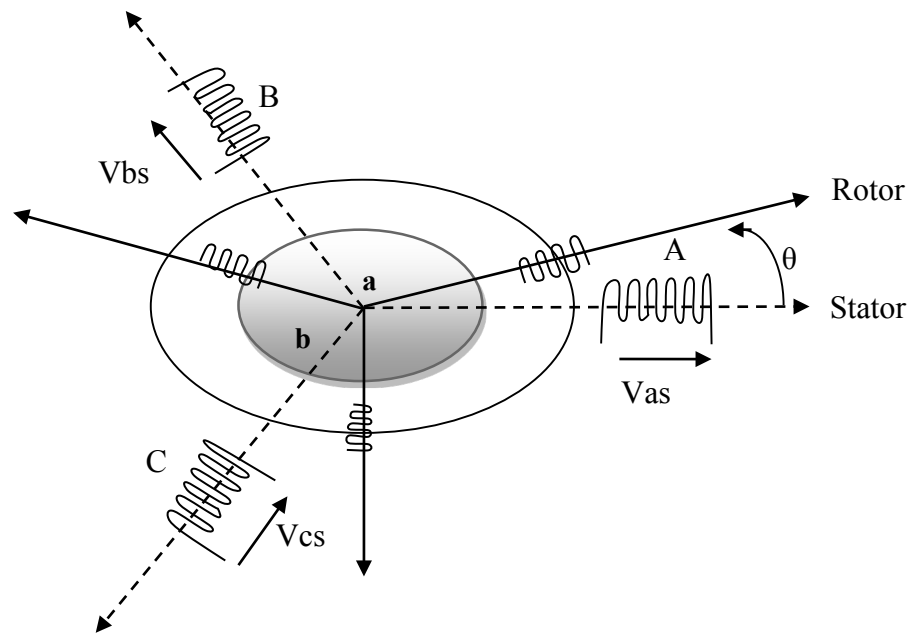


Fig.II.2 : Représentation d'une MADA

En appliquant la loi de Kirchhoff

$$\begin{aligned}
 V_{sa} &= R_s i_{sa} + \frac{d\phi_{sa}}{dt} \\
 V_{sb} &= R_s i_{sb} + \frac{d\phi_{sb}}{dt} \\
 V_{sc} &= R_s i_{sc} + \frac{d\phi_{sc}}{dt} \\
 V_{ra} &= R_r i_{ra} + \frac{d\phi_{ra}}{dt} \\
 V_{rb} &= R_r i_{rb} + \frac{d\phi_{rb}}{dt} \\
 V_{rc} &= R_r i_{rc} + \frac{d\phi_{rc}}{dt}
 \end{aligned} \tag{II.18}$$

L'écriture de l'équation sous forme matriciel

$$\begin{pmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \\ V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \\ i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \\ \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix} \tag{II.19}$$

$V_{sa}V_{sb}V_{sc}V_{ra}V_{rb}V_{rc}$ : Représente les tensions par phase au stator et au rotor de la machine ;

$i_{sa}i_{sb}i_{sc}i_{ra}i_{rb}i_{rc}$ : Représente les courants au stator et au rotor de la machine ;

$\phi_{sa}\phi_{sb}\phi_{sc}\phi_{ra}\phi_{rb}\phi_{rc}$ : Représente les flux propres circulant au stator et au rotor de la machina ;

## CHAPITRE II : Modélisation du système éolien

$R_r$ : est la résistance des enroulements statorique ;

$R_s$ : est la résistance des enroulements rotorique ;

L'équation matricielle reliant les flux et les courants sont donnés ainsi :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \\ \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s + l_{fs} & M_s & M_s & M_{sr1} & M_{sr2} & M_{sr3} \\ M_s & l_s + l_{fs} & M_s & M_{sr2} & M_{sr1} & M_{sr3} \\ M_s & M_s & l_s + l_{fs} & M_{sr3} & M_{sr3} & M_{sr3} \\ M_{sr1} & M_{sr3} & M_{sr2} & l_r + l_{fr} & M_r & M_r \\ M_{sr2} & M_{sr1} & M_{sr3} & M_r & l_r + l_{fr} & M_r \\ M_{sr3} & M_{sr2} & M_{sr1} & M_r & M_r & l_r + l_{fr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \\ i_{ra} \\ i_{rc} \\ i_{rb} \end{bmatrix} \quad (\text{II.20})$$

Avec

$l_s$ : Inductance propre des enroulements statorique ;

$l_r$ : Inductance de l'enroulement rotorique ;

$l_{fs}$ : Inductance de fuite des enroulements statorique ;

$l_{fr}$ : Inductance des fuites des enroulements rotorique ;

$M_s$ : Inductance mutuelle entre des enroulements statorique ;

$M_r$ : Inductance mutuelle entre des enroulements rotorique ;

$M_{sr(123)}$ : Inductance mutuelle entre les enroulements statorique et rotorique ;

La matrice  $L[\theta]$  fait apparaitre quatre sous-matrices inductances :

$$\begin{bmatrix} \varphi_s \\ \varphi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [l_s] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [l_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} \dots\dots\dots (\text{II.21})$$

La matrice inductance mutuelle stator-rotor :

$$[M_{sr}][M_{rs}]^t = M_{max} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \dots\dots\dots (\text{II.22})$$

$M_{max}$ : La valeur maximale des inductances mutuelles entre les phases du stat3or et les phases du rotor.

### II.4. 1.2. Modélisation de la MADA dans le repère de Park

L'application de la transformation de Park aux équations électriques nous permet d'aboutir aux équations suivantes [11].

$$[A]^{-1}[V_{abc}] = [R][A]^{-1}[i_{abc}] + \frac{d}{dt} [[A]^{-1}[\phi_{abc}]] \dots\dots\dots (\text{II.23})$$

Tel que :

$$[A]\left[\frac{d}{dt}[A]^{-1}\right] = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \frac{d\theta}{dt} \dots\dots\dots (II.24)$$

Avec :

$$[A] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (II.25)$$

Pour un system équilibré les composants homopolaires sont nuls, de ce fait on conclut les équations électriques dans le repère dq [11].

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \frac{d\phi_s}{dt} \phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} + \frac{d\phi_s}{dt} \phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - \frac{d\phi_r}{dt} \phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} + \frac{d\phi_r}{dt} \phi_{rd} \end{cases} \dots\dots\dots (II.26)$$

La transformé de Laplace des équations électriques de la machine, dans le repère dq relié au champ tournant d'entrefer sont exprimées d'équations suivant [11].

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + S\phi_{sd} - \omega_s \phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + S\phi_{sq} + \omega_s \phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + S\phi_{rd} - \omega_r \phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + S\phi_{rq} + \omega_r \phi_{rd} \end{cases} \dots\dots\dots (II.27)$$

### II.4.1.3. Application aux équations magnétiques

$$\begin{bmatrix} \phi_{sdqo} \\ \phi_{rdqo} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sdqo} \\ i_{rdqo} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (II.28)$$

La mise sous forme matricielle de système nous donne :

$$\begin{bmatrix} \phi_{sd} \\ \phi_{sq} \\ \phi_{so} \\ \phi_{rd} \\ \phi_{rq} \\ \phi_{ro} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s - M & 0 & 0 & \frac{3}{2}M & 0 & 0 \\ 0 & l_s - M & 0 & 0 & \frac{3}{2}M & 0 \\ 0 & 0 & L_s + 2M & 0 & 0 & 0 \\ \frac{2}{3} & 0 & 0 & l_r - M & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}M & 0 & 0 & l_r - M & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & l_r + 2M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{so} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \\ i_{ro} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (II.29)$$

Tel que :

## CHAPITRE II : Modélisation du système éolien

$L_s = l_s - M_s$  Inductance cyclique statorique ;

$L_r = l_r - M_r$  Inductance cyclique rotorique ;

$M = \frac{2}{3} M_{sr}$  Inductance cyclique mutuelle entre le stator et le rotor ;

$L_{os} = l_s + 2M_s$  Inductance homopolaire du système statorique ;

$L_{or} = l_r + 2M_r$  Inductance homopolaire du système.

Si on élimine les composants homopolaires du système d'équation peuvent se mettre sous forme [11].

$$\begin{cases} \Phi_{sd} = L_s i_{sd} + M i_{rd} \\ \Phi_{sq} = L_s i_{sq} + M i_{rq} \\ \Phi_{rd} = L_r i_{rd} + M i_{sd} \\ \Phi_{rq} = L_r i_{rq} + M i_{sq} \end{cases} \dots\dots\dots (II.30)$$

D'où on peut tirer les expressions des courants :

$$\begin{cases} i_{sd} = \frac{\Phi_{sd}}{L_s} - \frac{M}{L_s} i_{rd} \\ i_{sq} = \frac{\Phi_{sq}}{L_s} - \frac{M}{L_s} i_{rq} \\ i_{rd} = \frac{\Phi_{rd}}{L_r} - \frac{M}{L_r} i_{sd} \\ i_{rq} = \frac{\Phi_{rq}}{L_r} - \frac{M}{L_r} i_{sq} \end{cases} \dots\dots\dots (II.31)$$

### II.4.1.4. Application à l'équation mécanique

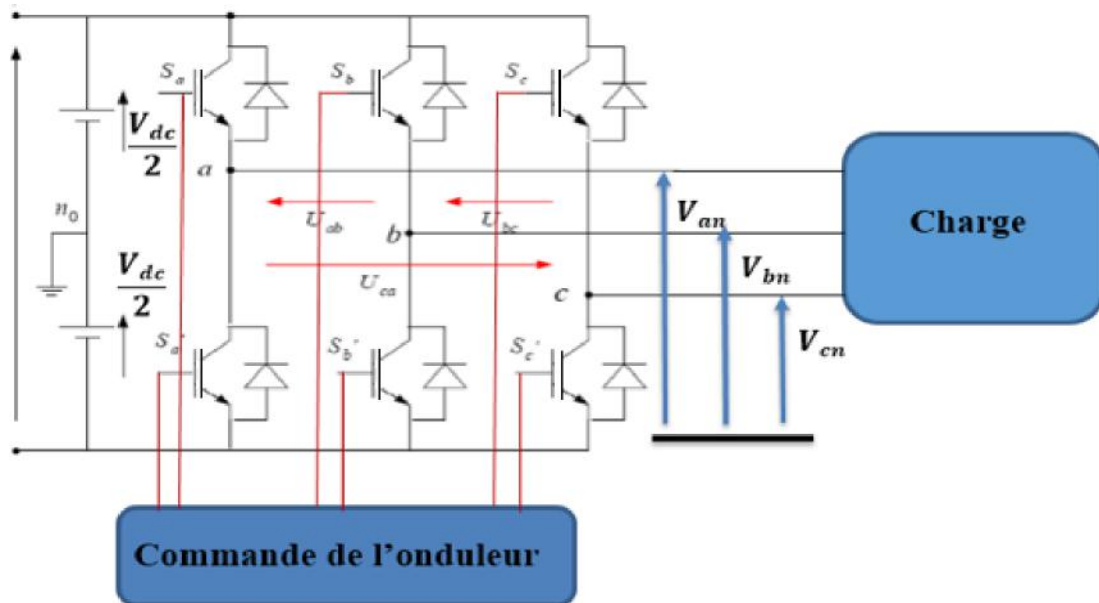
Le couple électromagnétique peut être dérivé de l'expression de la Co-énergie ou obtenu l'aide d'un bilan de puissance [11].

$$C_{em} = p(\Phi_{sd} i_{sq} - \Phi_{sq} i_{sd}) \dots\dots\dots (II.32)$$

## II.5. Modélisation de convertisseur statique coté charge (onduleur)

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continu-alternatif et est alimenté par une source de tension continue.

Dans la chaîne de conversion éolienne, l'onduleur un signal plus proche d'une sinusoïde [12].



**Fig.II.3** : Schéma du convertisseur statique coté charge (Onduleur) [12].

L'onduleur est commandé à partir des grandeurs logiques  $S_i = (i = a, b, c)$ . On appelle  $T_i$  et  $T'_i$  les transistors (supposés des interrupteurs idéaux), on a

- si  $S_i = +1$  alors  $T_i$  est fermé et  $T'_i$  est ouvert,
- si  $S_i = -1$  alors  $T_i$  est ouvert et  $T'_i$  est fermé.

Dans ces conditions, on peut écrire les tensions  $V_{in_0}$  en fonction des signaux de commande  $S_i = (i = a, b, c)$  et en tenant compte du point fictif  $n_0$  représenté la

$$\begin{bmatrix} V_{an_0} \\ V_{bn_0} \\ V_{cn_0} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{2} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \dots\dots\dots (\text{II.33})$$

Soit ( $n$ ), le point neutre du côté alternatif (MASP), alors la tension composée  $U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}$  sont définies par les relations suivantes [12].

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{an} - V_{bn} \\ V_{bc} = V_{bn} - V_{cn} \\ V_{ca} = V_{cn} - V_{an} \end{cases} \dots\dots\dots (\text{II.34})$$

En considérant un système triphasé équilibré ( $V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0$ ), on aura :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3}(V_{ab} - V_{ca}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3}(V_{bc} - V_{ab}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3}(V_{ca} - V_{bc}) \end{cases} \dots\dots\dots (\text{II.35})$$

Ou encore :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3}(2V_{an_0} - V_{bn_0} - V_{cn_0}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3}(-V_{an_0} + 2V_{bn_0} - V_{cn_0}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3}(-V_{an_0} - V_{bn_0} + 2V_{cn_0}) \end{cases} \dots\dots\dots(\text{II.36})$$

Alors :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{an_0} \\ V_{bn_0} \\ V_{cn_0} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(\text{II.37})$$

En remplaçant 1 dans 2, on obtient les équations instantanées des tensions simples en fonction des grandeurs de commande  $S_i$  ( $i = a, b, c$ ) et on aboutit au modèle mathématique du convertisseur [1].

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{6} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \dots\dots\dots(\text{II.38})$$

### II.6. Modélisation du bus continu

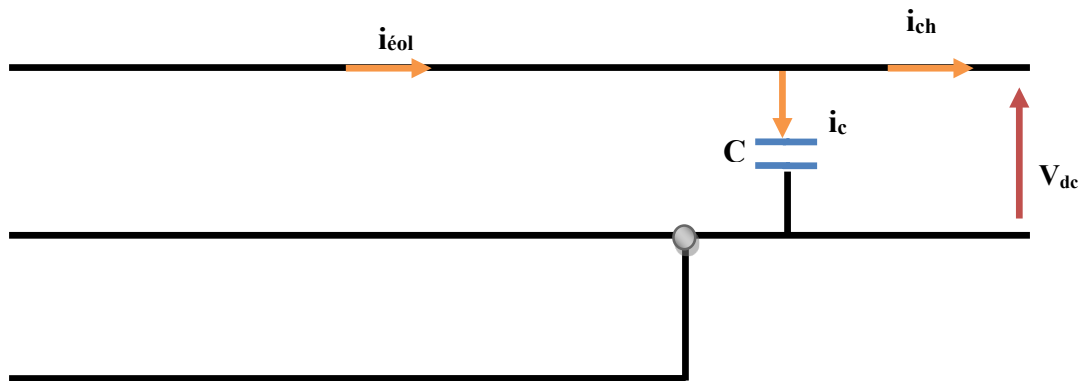


Fig. II.4: Schéma du bus continue [10].

$$i_{ch} = i_{éol} + i_c \pm i_{batt} \dots\dots\dots(\text{II.39})$$

$$i_c = C \frac{dv_{dc}}{dt} \dots\dots\dots(\text{II.40})$$

$$\frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} i_c \dots\dots\dots(\text{II.41})$$

Avec :

$i_{eol}$ : Courant fournie par le système éolien [A].

$i_c$ : Courant qui traverse la capacité [A].

$i_{batt}$  : Courant de la batterie [A].

### II.7. Modélisation d'une charge R-L

Un circuit R-L contient une résistance R et une bobine L et une FEME :

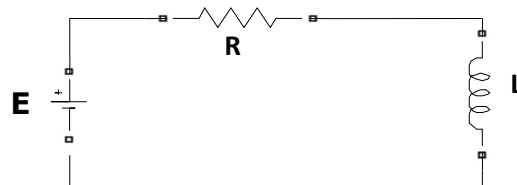


Fig. II.5: Modèle d'une charge RL.

$$E(t) = U_R(t) + U_L(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} \dots\dots\dots (II.42)$$

Transformation de Laplace :

$$E(p) = RI(p) + LpI(p) \dots\dots\dots (II.43)$$

$$\frac{E(p)}{I(p)} = \frac{1}{LS + R} \dots\dots\dots (II.44)$$

### II.8. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons modélisé les différentes parties de la chaîne de conversion éolienne constituée d'une turbine à vent liée à une machine asynchrone à double alimentation dans le repère de Park avec un système de stockage.



# CHAPITRE III

*Simulation du Système*

*Global*

### III.1. Introduction

Après avoir présenté l'état de l'art de la conversion de l'énergie et modélisé les différentes parties de notre système, nous allons procéder à la commande et la simulation dans matlab /simulink du système de conversion car nous allons étudier la commande de certaines parties.

La dernière partie de ce chapitre montre les résultats de simulation du système présente si dessous.

### III.2. Commande de la turbine sans régulation de vitesse

Ce mode de contrôle repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent devant les constantes de temps électriques du système éolien, ce qui implique que le couple d'accélération de la turbine peut être considéré comme nul.

L'équation mécanique en régime permanent est donnée par :

$$C_t = (f\Omega_t + C_{em})G \dots \dots \dots (III.1)$$

Pour un rendement optimal, l'expression du couple éolienne s'écrit :

$$T_{topt} = \frac{1}{2} \rho R^3 S_t \frac{C_p(\lambda_{opt})}{\lambda_{opt}} \Omega_t^2 = K_{opt} \Omega_t^2 \dots \dots \dots (III.2)$$

On constate que le couple éolien qui correspond au fonctionnement optimal par rapport à la vitesse du vent est proportionnel au carré de la vitesse de rotation de la turbine. Donc pour maintenir l'éolienne sur la courbe du rendement optimal, le couple électromagnétique de la génératrice doit satisfaire l'équation suivante [11].

$$GC_{em} = K_{opt} \Omega_t^2 - f\Omega_t \dots \dots \dots (III.3)$$

### III.3. Commande vectorielle de la MADA

Elle est utilisée pour que la machina à double alimentation ait les même performance qu'une machine a courant continue à excitation séparée, où il y a découplage naturel du couple et du flux magnétique. Pour cela il faut choisir un système d'axe (d,q) et une loi de commande qui assure ce découplage.

La commande vectorielle de la machine à double alimentation consiste à orienter l'un des flux de la machina suivant l'axe d ou q. Dans notre cas on choisit l'orientation de repère (d,q) suivant le vecteur flux statorique directe [11].

$$\phi_{sd} = \phi_s \dots \dots \dots (III.4)$$

$$\phi_{sq} = 0 \dots \dots \dots (III.5)$$

La magnétisation de la MADA et assurée par le courant de l'axe direct d, plusieurs choix peuvent être faits, dans ce travail nous avons choisi de la repartir à égalité, dans les courant statorique et rotorique de l'axe directe ont la même expression [11].

$$i^*_{sd} = i^*_{rd} = \frac{\phi^*_s}{M+L_s} \dots \dots \dots (III.7)$$

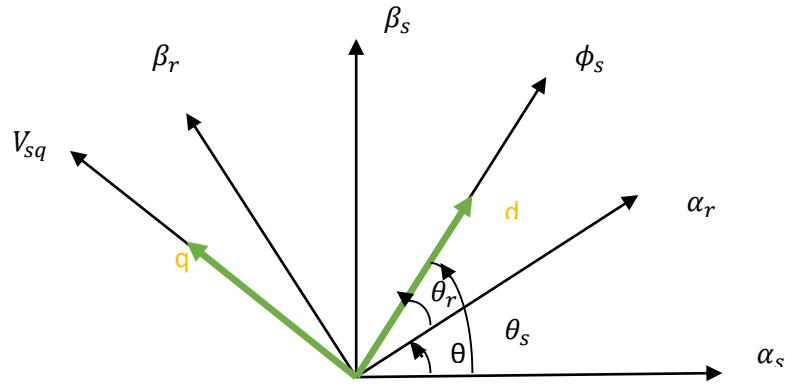


Fig.III.A Vecteur flux dans le système d'axe dq[11].

Avec ce choix d'orientation du flux, les références des courants en quadrature peuvent être déterminées directement à partir de l'expression de couple électromagnétique et de la relation de proportionnalité qui existe entre les deux courants [11].

$$i_{sq}^* = \frac{T_{em}^*}{p\phi_s^*}, i_{rq}^* = \frac{-L_s}{M} i_{sq}^* \dots \dots \dots (III.6)$$

La magnétisation de la MADA et assurée par le courant de l'axe direct d, plusieurs choix peuvent être faits, dans ce travail nous avons choisi de la répartir à égalité, dans les courant statorique et rotorique de l'axe directe ont la même expression [11].

$$i_{sd}^* = i_{rd}^* = \frac{\phi_s^*}{M+L_s} \dots \dots \dots (III.7)$$

La répartition des puissances entre active entre le stator et le rotor est une exigence dans la stratégie de contrôle à adopter, en effet dans notre travail on a choisi de faire fonctionner la MADA avec un glissement égale à -1, donc en négligeant les termes résistifs de la machine [11].

$$\frac{P_s}{P_r} = \frac{\omega_s}{\omega_r} = 1 \Rightarrow \omega_s = \omega_r \dots \dots \dots (III.8)$$

Et d'après la loi d'autopilotage :

$$\Omega_r = \omega_s - \omega_r = 2\omega_s = -2\omega_r \dots \dots \dots (III.9)$$

La relation précédente montre que la loi de répartition des puissance actives permet de faire fonctionner le MADA avec une vitesse de rotation mécanique égale à deux fois la valeur absolue des pulsations des courants statoriques ou rotoriques[11].

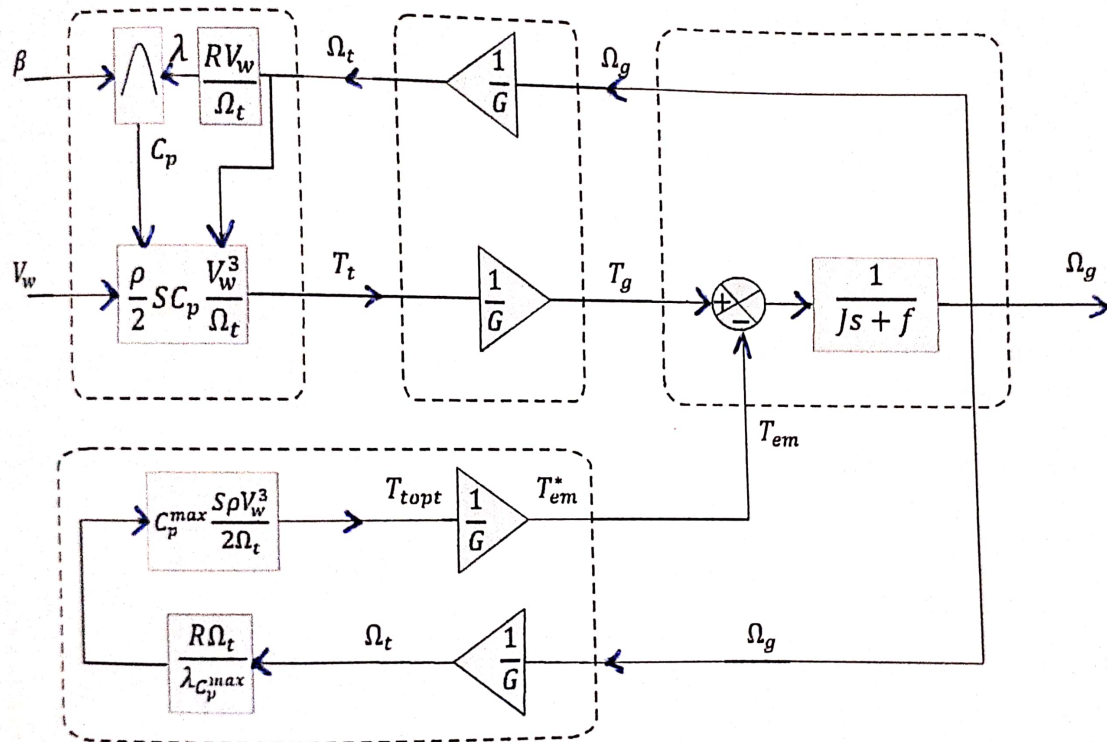


Fig.III.B : Schéma bloc fonctionnel de la turbine éolienne et de la commande MPPT sans régulation de vitesse [11].

### III.4. Commande des onduleurs LMI sinus-triangulaire

La modulation de largeur d'impulsion sinus triangle est réalisée par comparaison d'une onde modulaire basse fréquence (tension de fréquence) à une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire. [11].

En régime permanent les tensions qu'on veut appliquer à la charge sont un système triphasé équilibré de tension sinusoïdales :

$$V_{ref1} = u_0 \sin(\omega_r t) \dots \dots \dots (III.10)$$

$$V_{ref2} = u_0 \sin(\omega_r t - \frac{2\pi}{3}) \dots \dots \dots (III.11)$$

$$V_{ref3} = u_0 \sin(\omega_r t - \frac{4\pi}{3}) \dots \dots \dots (III.12)$$

$$m = \frac{V_{ref}}{V_p} = 0.7 \dots \dots \dots (III.13)$$

$$r = \frac{f_p}{f} = 21 \dots \dots \dots (III.14)$$

m: rapport de transformation

r : taux de modulation

III.5. Simulation du système

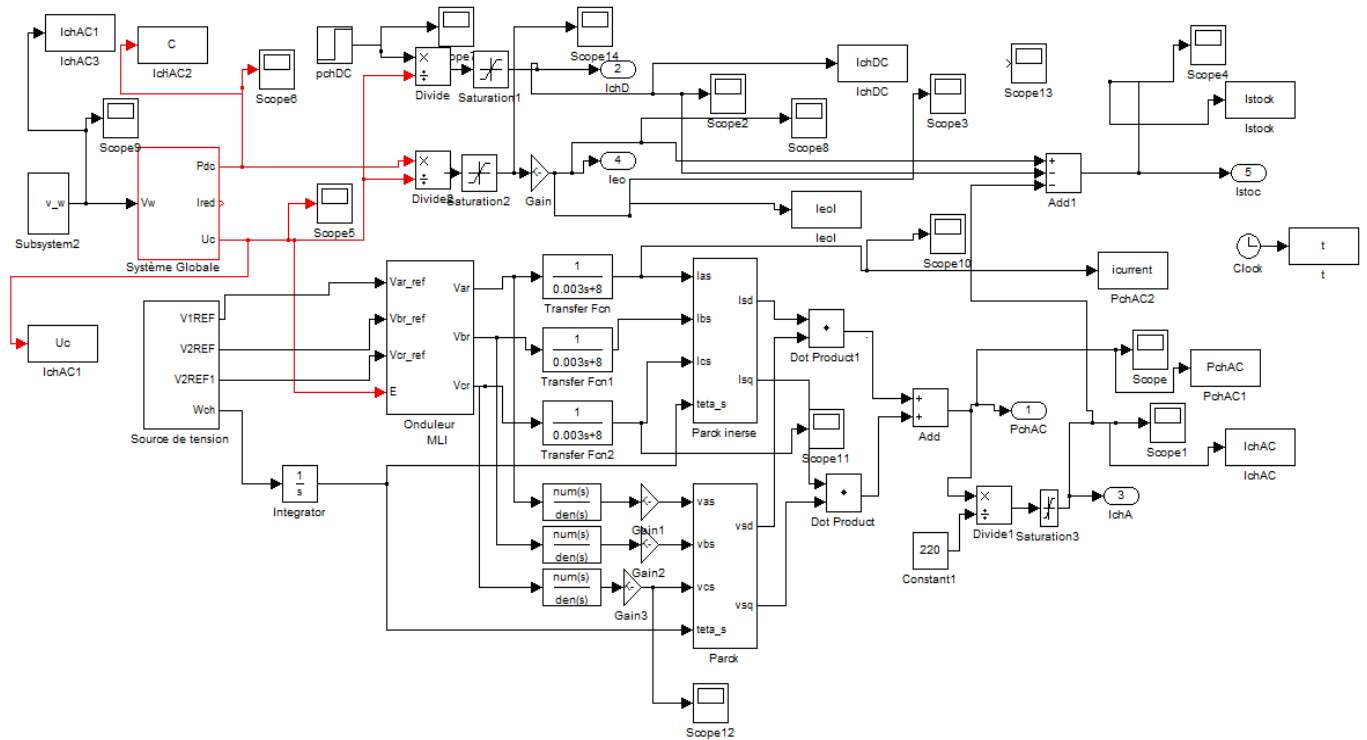


Fig.III.C : Schéma global du système.

iAprès la simulation de notre système, nous avons obtenu ces allures :

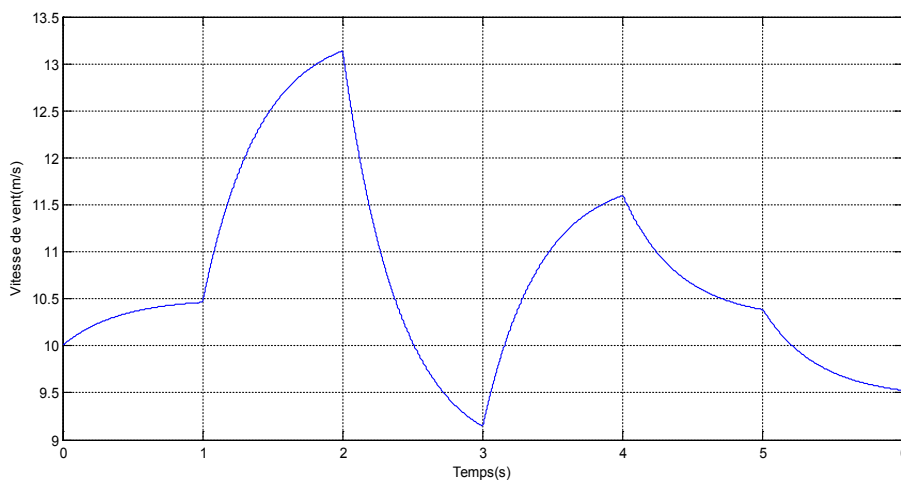


Fig.III.1 : Allure de la vitesse de vent

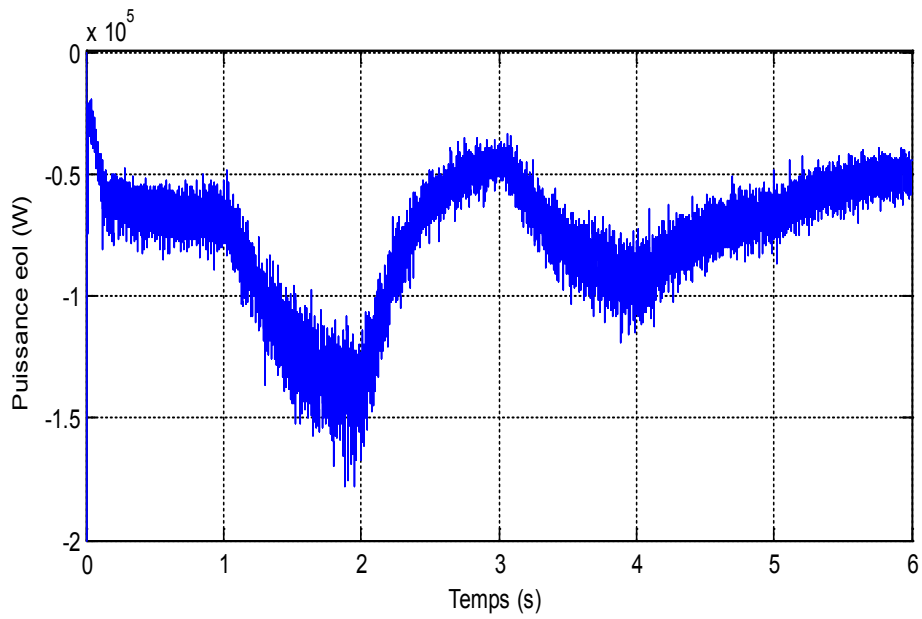


Fig.III.2 : Allure de la puissance éolienne produite.

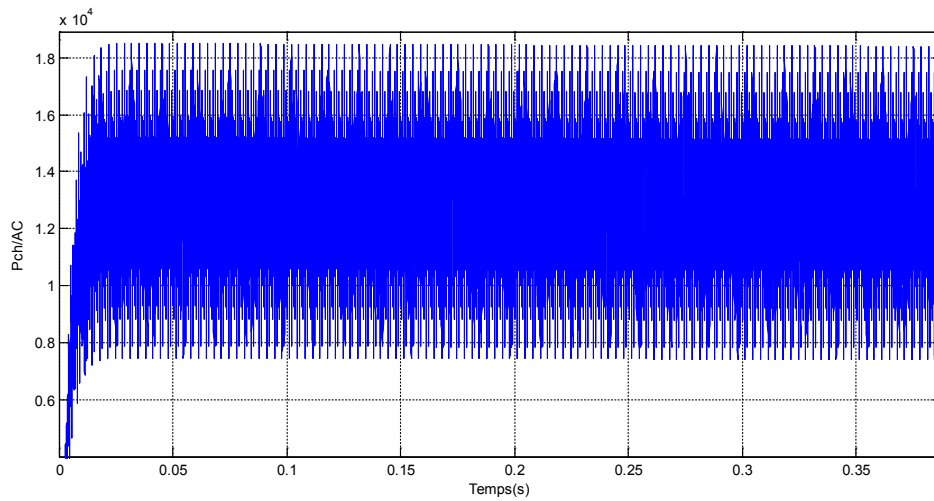


Fig.III.3 : Allure de la puissance de charge à courant alternatif.

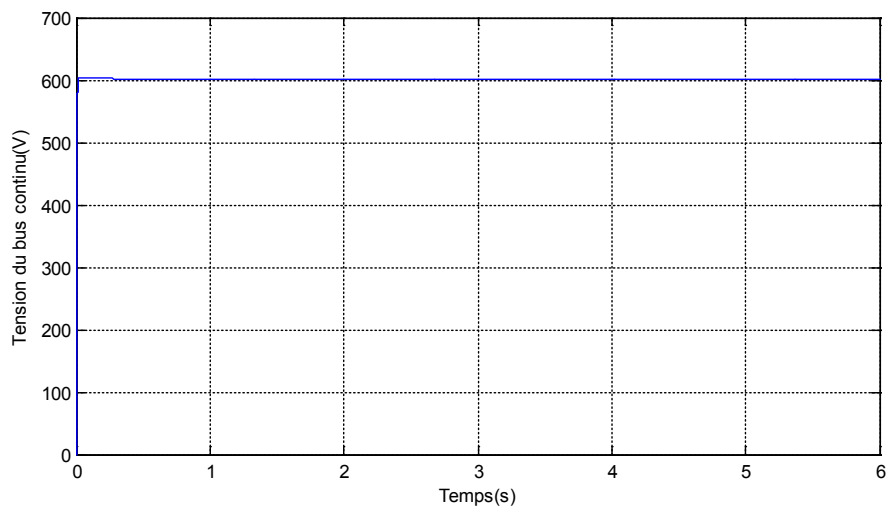


Fig.III.4 : Allure de la tension de bus continu.

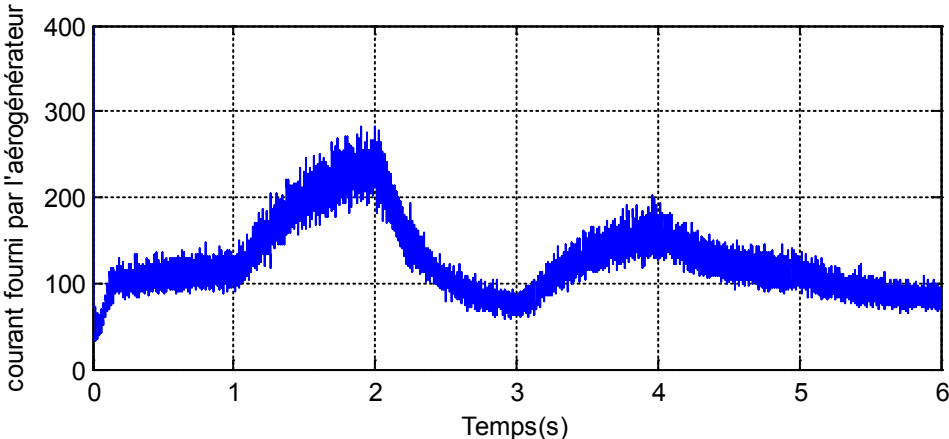


Fig.III.5 : Allure du courant fournie par l'aérogénérateur.

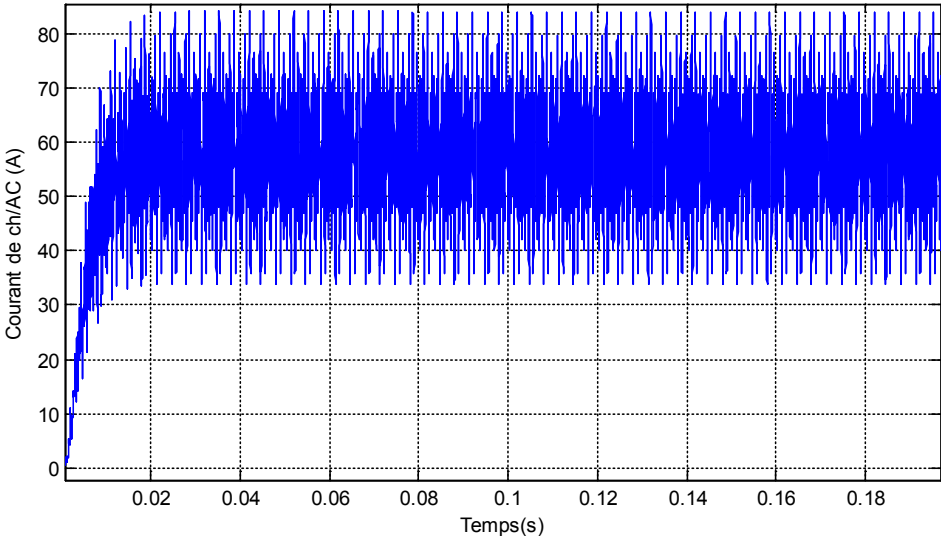


Fig.III.6 : Allure de courant de charge à courant alternatif.

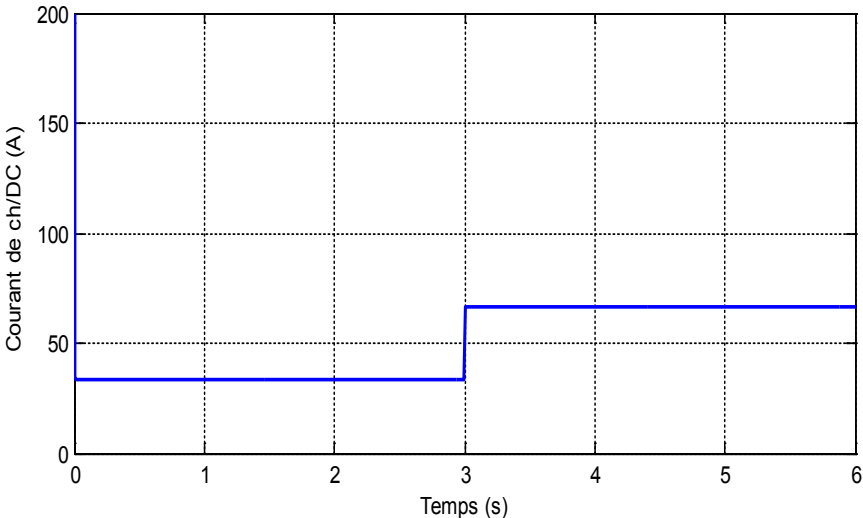
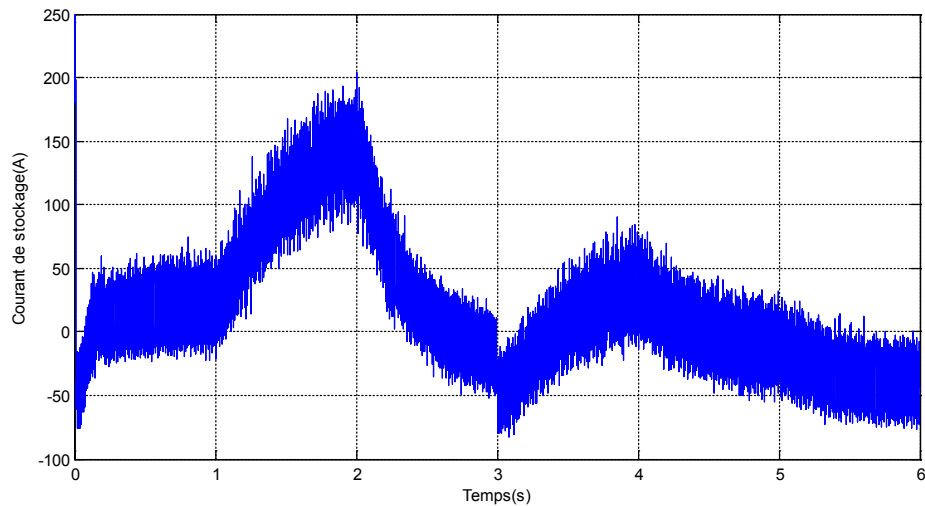
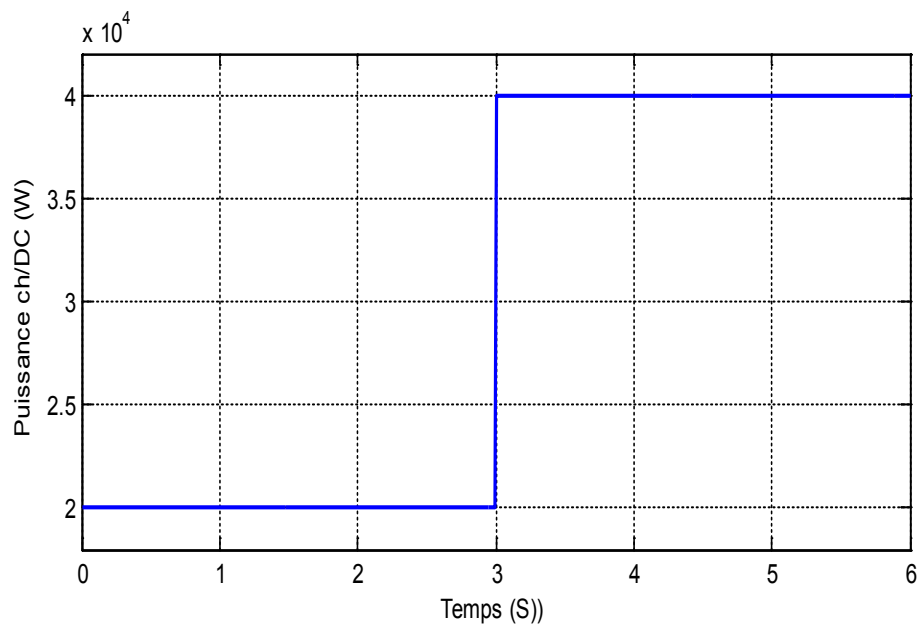


Fig.III.7 : Allure de courant de charge à courant continu.



**Fig.III.8** : Allure de courant de stockage.



**Fig.III.9** : Allure de la puissance de charge courant continu.

### III.6. Interprétation des résultats :

Notre système a été simulé sous le logiciel Matlab/Simulink afin de valider les modèles et les stratégies de commande pour visualiser les différentes grandeurs caractéristiques du système global. Il est ainsi reparti en plusieurs parties.

La fig.III.1 : représente la vitesse du vent imposé au système.

La **Fig.III.2** : représente la puissance de l'éolienne produite qui dépend à son tour de la vitesse du vent, nous remarquons qu'elle est négatif.

La **Fig.III.3** : représente la puissance des trois phases de la charge à courant alternatif



La tension du bus continue est représentée dans **Fig.III.4** : On voit bien que la tension du bus continue suit parfaitement la référence imposée qui est égale à 600volts. Il convient de noter que la tension du bus continue par rapport aux variations de la charge est efficace.

La **Fig.III.5** est le courant fourni par l'aérogénérateur. Nous remarquons qu'il se compose de deux parties la première est l'augmentation de la fourniture du courant de l'instant 0s à 2s et pour atteindre le point maximal et ensuite diminué au point minimal de 2s à 3s. La deuxième partie à partir de 3s le cycle de la première partie se refait.

Le courant de charge à courant alternatif est représenté dans la **Fig.III.6** qui est à son tour le courant consommé par les trois phases d'une amplitude de 35A. Chaque phase consomme le même courant car c'est une charge triphasée équilibrée.

Les figures **III.7** : Représente l'allure de courant de charge à courant continu, nous observons que le courant consommé par la charge est de 35A, à l'instant 3S nous augmentons la charge jusqu'à avoir un courant de 67A.

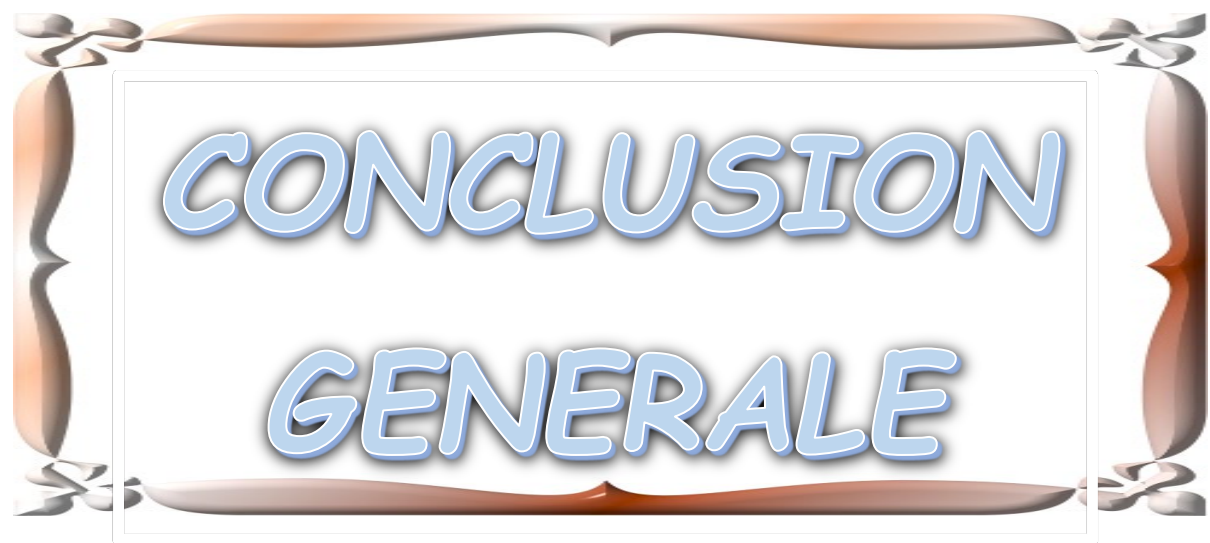
**Fig.III.8** : Représente le courant de stockage qui se compose de deux parties. Dans la première partie nous remarquons une augmentation de courant de stockage de 0s à 2s ce qui signifie le chargement de la batterie et de 2s à 3s nous remarquons une diminution ce qui signifie la décharge. Dans la deuxième partie, à l'instant 3s nous augmentons la charge en courant continu ce qui mène à refaire le même cycle que la première partie.

**Fig. III.9** représente la tension de la charge à courant continu qui est stable de 0s à 3s à une puissance de  $2 \cdot 10^4$  puis une augmentation brusque à l'instant 3s pour atteindre la puissance maximale de  $4 \cdot 10^4$ .

### III.7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la commande et la simulation de système de conversion éolienne.

Notre système global a été simulé sous Matlab/Simulink, pour une vitesse du vent aléatoire, les résultats de simulation nous ont permis d'obtenir l'influence de la vitesse du vent sur le courant généré par l'éolienne et la puissance qui devient plus importante avec l'augmentation de cette vitesse.



**CONCLUSION**  
**GENERALE**

### Conclusion Générale

Nous avons étudié dans ce mémoire une éolienne autonome basée sur une machine asynchrone à double alimentation associé à un système de stockage.

Le premier chapitre a pour objectif de présenter l'énergie éolienne, ses différents types à savoir les éoliennes à axe horizontal et à axe vertical, les avantages et les inconvénients et une description du mode de stockage.

Dans le deuxième chapitre, nous avons modélisé les différents éléments constituant une chaîne de conversion d'énergie éolienne, tel que : la turbine, la machine asynchrone à double alimentation, le convertisseur statique

Et nous avons conclu avec la présentation de la commande de la turbine sans régulation de vitesse, la commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation et une simulation sous Matlab/Simulink dans le chapitre trois.

L'association des différents modèles mathématiques et leurs stratégies de commande sous Matlab /Simulink nous ont permis de valider le fonctionnement du système global étudié.

## Annexes

### Paramètres du système éolien :

$$\text{Pour } : p_n = 75\text{kW} ;$$

$$u_{sn} = 380\text{V} ;$$

$$u_{rn} = 380\text{V} ;$$

$$R_s = 0.03552\Omega ;$$

$$R_r = 0.02092\Omega ;$$

$$L_s = 0.01545\text{H} ;$$

$$L_r = 0.01545\text{H} ;$$

$$M = 0.0151\text{H} ;$$

$$J = 0.25 \text{ Kg. m}^2 ;$$

$$F = 0.024\text{N .m.s /rd} ;$$

$$P = 2 ;$$

$$G_t = 26 ;$$

### Paramètres de la turbine :

$$P_n = 150\text{KW}$$

$$R_t = 9.1\text{m}$$

$$J_t = 2600 \text{ Kg. m}^2$$

$$f_r = 0.000024\text{N.m.s/rd}$$

$$C_{pmax} = 0.44$$

$$\lambda_{opt} = 8.5$$

$$\rho_{air} = 1.225 \text{ Kg. m}^3$$

### Paramètre de la charge a courant alternatif :

$$R=1$$

$$L=0.03$$

## Références bibliographiques

- [1] : M. Hamza, k.Belkacem.Etude d'une petite éolienne en fonctionnement autonome(2020).
- [2] :FONDATION D'ENTREPRISE ALCEN POUR LA CONNAISSANCE DES ÉNERGIES. Eolienne. 2020/2021
- [3] :Wikipédia. Éolienne. 11 mars 2021 .
- [4] :EDF France. Qu'est ce que l'énergie éolienne.
- [5] :Smafri. Principe de fonctionnement d'une éolienne. 2020
- [6] :Groupe MADAULE. Les différentes type d'éolienne. 2007
- [7] :CONNAISSANCE DES ENERGIES. Le poin sue le développement du parc éolien mondiale. 2011
- [8] : ©Dr Ouahiba GUERRI. Energie éolienne en Algérie : Un bref aperçu.
- [9] : L.Mouhammed Tahar. Commande flou de la machine synchrone à aimant permanent utilisée dans un système éolien. 2012
- [10] : C.FEROUDJ .A .BENSADI. Gestion d'énergie d'un système hybride à énergies renouvelables en fonctionnement autonome avec stockage (2019).
- [11] : R.BABORI. Amélioration des performances des convertisseurs électromécaniques bases sur les machines asynchrones doublement alimentés. Thèse de doctorat de l'université de Bejaia (2016).
- [12] : Master 2 ER\_UEF 2312 : Stockage de l'énergie et pile à combustible - Cours Mr ALKAMA université de Bejaia.
- [13] : N.ADJIMI .W.BELAIDI. Modélisation et commande d'un onduleur MLI (2009).