

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
Ministère de l'Enseignement Supérieur Et de La Recherche  
Scientifique



**Université de Ghardaïa**

N° d'ordre :  
N° de série:

Faculté des Sciences et Technologie  
Département des Sciences et Technologie

**Projet de fin d'étude présenté en vue de l'obtention du diplôme de**

**LICENCE**

**Domaine : Science et Technologie**

**Filière : Génie électrique**

**Spécialité : Maintenance en instrumentation industrielle**

**THEME:**

**SIMULATION D'UN GÉNÉRATEUR ASYNCHRONE  
TRIPHASE DOUBLE ALIMENTATION ENTRAÎNÉ PAR  
TURBINE ÉOLIENNE**

**PAR :**

**Omar BAZINE  
Mohammed BAAMARA  
Abdelmadjid DAGHOR**

**Jury:**

**M<sup>F</sup>: Tahar DJELLOULI**

Maitre Assistant A Univ. Ghardaïa

**Encadreur**

**M<sup>F</sup>: Khaled TOUAFEK**

Maitre Assistant A Univ. Ghardaïa

**Examineur**

**ANNEE UNIVERSITAIRE: 2013/2014**

## **DEDICACE**

**A ma mère , qui ma comblée de tendresse pour voir réussir**

**A mon père , qui fourni énormément d'efforts pou me  
donner l'espoir .**

**A mes sœurs : Aicha et Dalila.**

**A mes frères :Youness,Azize,Mousa,Abdellah.**

**Aux chenpans de la maison :Aissa et Mustapha.**

**Sans oublier Nacira et Salima.**

**A mon trinôme Madjid et Mohammed et à toutes mes  
comarades de promotion .**

**Omar**

## **DEDICACE**

- **A celui qui fourni énormément d'efforts pour me donner l'espoir**
- **A ma mère qui m'a comblée de tendresse pour me voir réussir**
- **A mes compagnons de trisesse et de joie : Bouchra , Mabrouka , Mama ,Zohra Messaoud , yacine et said**
- **Aux chenapans de la maison : Moussa , Achref , slimane , aissa , hadj mebark , ibrahim , maria , bouchra , mona , malek**
- **A mon trinôme omar et madjid et toutes mes amies et camarades de cette promotion .**

**Je dédie ce mémoire de fin d'étude**

**Mohammed**

## **DEDICACE**

**A ma mère , qui ma comblée de tendresse pour voir réussir**

**A mon père , qui fourni énormément d'efforts pou me  
donner l'espoir .**

**A mes sœurs :Aicha, Manel.**

**A mes frères :Rachid.**

**Aux chenpans de la maison , Rahim.**

**Sans oublier : Sabrina**

**A mon trinôme Omar et Mohammed et à toutes mes  
camarades de promotion.**

**Madjid**

## **REMERCIEMENTS**

**NOS REMERCIEMENTS SONT PR ÉSENT ÉS A :**

- **MONSIEUR DJELLOULI TAHAR POUR SON  
ENCADREMENT , SA COMPREHENSION, SA  
DISPONIBILITE ET SES CONSEILS AVISES**
- **TOUS CEUX QUI NOUS ONT AIDES A REALISER  
CETTE RECHERCHE .**
- **TOUTS LES ENSEIGNANTS GENIE ÉLECTRIQUE POR  
LEUR COLLABORATION.**

**OMAR , MADJID ET MOHAMMED**

## ملخص:

يقدم هذا العمل على دراسة واستخدام مولد متزامن في إنتاج الطاقة الهوائية. للقيام بذلك، أنشئ نموذج من التوربينات الهوائية، و تم مولد متزامن في النظام الخطي. موضوع هذه الدراسة يتلخص في نوعين معرفة مولد متزامن قفص السنجاب ومولد متزامن مع السلطة المزدوجة باستخدام أجهزة إلكترونيات الطاقة. اختتم هذه الدراسة نتائج المحاكاة مقارنة بتلك التجربة، للتحقق من صحة نماذج.

## Résumé :

Ce travail présente l'étude et l'utilisation de la génératrice asynchrone dans la production de l'énergie éolienne. Pour ce faire, un modèle de la turbine éolienne a été établi, puis de la génératrice asynchrone en régime linéaire. Deux types de génératrice ont fait l'objet de cette étude à savoir la génératrice asynchrone à cage d'écureuil et la génératrice asynchrone à double alimentation faisant appel à des dispositifs d'électronique de puissance .

Cette étude a été conclue par des résultats de simulation comparés à ceux de l'expérience, pour une validation des modèles.

## Abstract:

This work presents the study and the use of the asynchronous generator in the wind power production. With this intention, a model of the wind turbine was established, then asynchronous generator in linear. Two types of generator were the subject of this study to knowing the asynchronous squirrel-cage and doubly-fed induction generator using devices of power electronics.

This study was concluded by compared results of simulation with those of experiment, for a validation of the models.



# Liste des figures

## Liste des photos

Photo I-1 : Le schéma de la roue de Barlow

Photo I-2: Nikola Tesla

Photo I-3. photo du stator d'une machine asynchrone

## Liste des figures

Figure I-1: Rotor à pôles lisses et rotor à pôles saillants

Figure I-2 : Vue éclatée d'un moteur asynchrone triphasé à rotor en cage d'écureuil

Figure I-3 : Vue éclatée d'un moteur asynchrone triphasé à rotor bobiné

Figure I-4: Déplacement du champ magnétique

Figure I-5 : Machine synchrone dans le repère de Park

Figure I-6 : Structure de la MADA à rotor bobiné

Figure I-7 : MADA avec contrôle du glissement par dissipation de l'énergie rotorique

Figure I-8 : Effet de la variation de la résistance rotorique sur le couple électromagnétique

Figure II-1 : Représentation de la machine asynchrone

Figure II-2 :  $abc-\alpha\beta$

Figure II-3: Représentation de la machine dans le repère diphasé

Figure II-4 : Schéma équivalent en régime dynamique de la machine asynchrone dans un référentiel arbitraire : -a- Suivant l'axe d ; -b- Suivant l'axe q

Figure II-8 : schéma bloc de la MADA

Figure III-1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent

Figure III -2: Turbines à axe vertical

Figure III-3 : technologie éolienne à axe horizontale.

Figure III-4: Systèmes de génération d'énergie électrique à partir de sources d'énergie variable.

Figure III-5: Éléments constituant une éolienne [29]

Figure III -6: Coefficient de puissance en fonction du ratio de vitesse ( $\lambda$ ) et de l'angle de calage ( $\beta$ )

Figure III -7: Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine ( $\lambda$ )

Figure III -8: Structure du système de conversion éolien

Figure III -9: Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donnée

Figure III -10: Variation de la vitesse du vent (m/s)

Figure III -11: Variation de la vitesse mécanique (rad/s)

Figure III -10: schéma bloc du modèle de la turbine éolienne.

Figure III -11: Variation de la vitesse du vent (m/s)

Figure III -12: Variation de la vitesse mécanique (rad/s)

Figure III.13 : Schéma de simulation développé sous Matlab-Simulink du système de l'éolienne composé la machine asynchrone

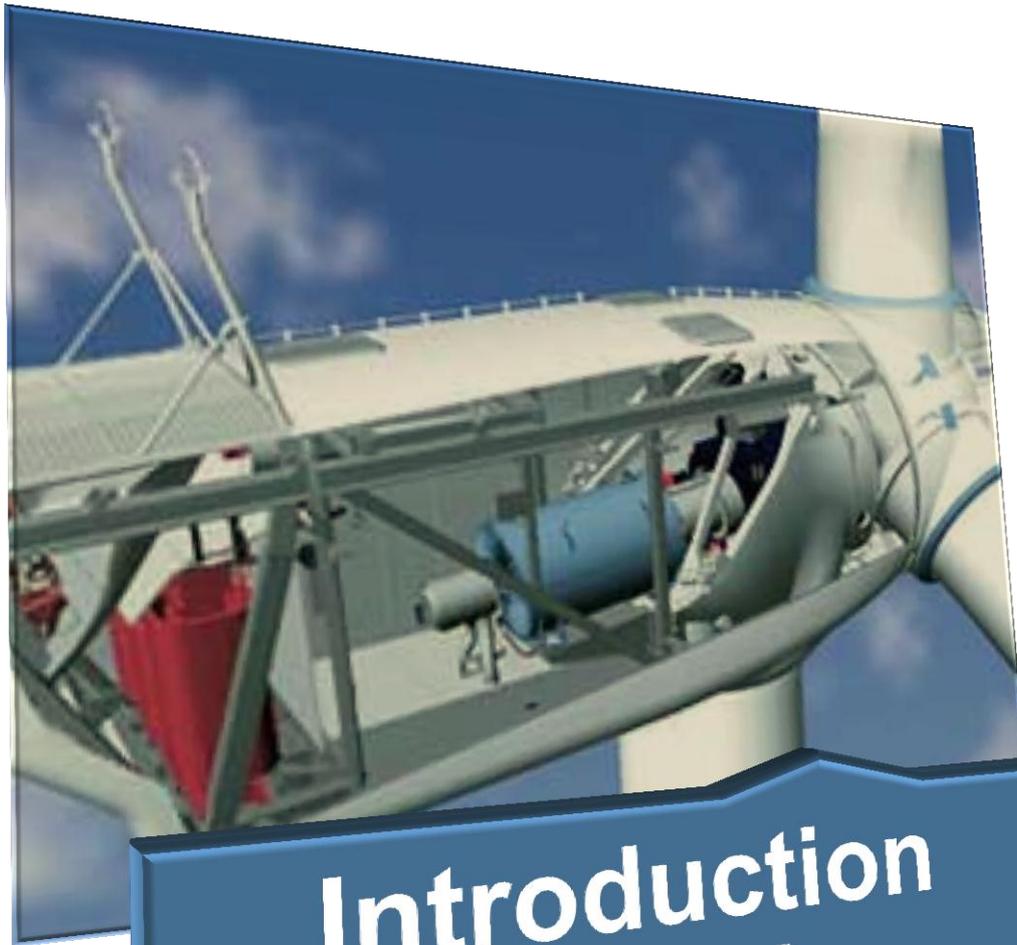
Figure III.14: La vitesse de rotation en fonction de temps.

Figure III.15: Schéma de couple électromagnétique  $C_{em}$  en fonction de temps.

Figure III.16: Schéma des courants rotoriques

<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I : MACHINE ASYNCHRONE À DOUBLE ALIMENTATION (MADA)</b>	<b>3</b>
<b>I.1 Introduction</b>	<b>4</b>
<b>I.2 Historique Des Machines Electrique</b>	<b>4</b>
<b>I.3 Les Défèrent Type Des Machines Electrique</b>	<b>6</b>
<b>I.3.1 Machine à courant continu</b>	<b>6</b>
<b>I.3.2 Machine à courant alternatif</b>	<b>6</b>
<b>I.3.2.1 Principe de fonctionnement des machines à courant alternat</b>	<b>6</b>
<b>I.3.3 Machine synchrone</b>	<b>7</b>
<b>I.3.3.1 Définition</b>	<b>7</b>
<b>I.3.3.2 Régime de fonctionnement synchrone</b>	<b>8</b>
<b>I.3.4 Machine Asynchrone</b>	<b>8</b>
<b>I.3.4.1 Stator (ou La carcasse)</b>	<b>9</b>
<b>I.3.4.2 Rotor (ou L'induit)</b>	<b>9</b>
<b>1. Type Rotor bobiné</b>	<b>10</b>
<b>2. Type Le Rotor en cage d'écureuil</b>	<b>10</b>
<b>I.3.4.3 la machine asynchrone monophasé</b>	<b>10</b>
<b>I.3.4.4 la machine asynchrone triphasé</b>	<b>10</b>
<b>1. les machines asynchrones triphasés à rotor en cage d'écureuil</b>	<b>11</b>
<b>2. les machines asynchrones triphasés à rotor bobiné</b>	<b>12</b>
<b>I.3.4.5 Principaux domaines d'utilisation de la machine asynchrone</b>	<b>13</b>
<b>I.3.4.6 Principe de fonctionnement</b>	<b>13</b>
<b>I.4 Machine Asynchrone à Double Alimentation (type rotor bobiné)</b>	<b>16</b>
<b>I.4.1.Principe de fonctionnement</b>	<b>16</b>
<b>I.4.2 Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée</b>	<b>17</b>
<b>I.5 Générateur Asynchrone à Double Alimentation (GADA)</b>	<b>18</b>
<b>I.6 Conclusion</b>	<b>18</b>
<b>CHAPITRE II : MODELISATION DE LA MADA</b>	<b>19</b>
<b>II.1. Introduction</b>	<b>20</b>
<b>II.2.Principe de fonctionnement</b>	<b>20</b>
<b>II.3. Modélisation de la génératrice en fonctionnement linéaire</b>	<b>21</b>
<b>II.3.1. Hypothèses</b>	<b>21</b>
<b>II.3.2. Modèle mathématique de la machine asynchrone linéaire</b>	<b>21</b>
<b>II.3.3.Transformation triphasé – diphasé</b>	<b>23</b>
<b>II.3.4.Transformation de Park (cas général )</b>	<b>25</b>
<b>II.3.5. Modèle diphasé de la machine asynchrone en fonctionnement linéaire</b>	<b>27</b>

II.3.6.Choix du repère dq	28
II.3.7. Choix du référentiel	29
II.3.8. Equations de Puissance et de Couple	30
<b>II.5 Simulation de la MADA</b>	<b>31</b>
<b>II.6 Conclusion</b>	<b>34</b>
<b>CHAPITER III : La turbine éolienne</b>	<b>35</b>
<b>I.généralité sur les systèmes éolienne</b>	<b>36</b>
<b>I.1.INTRODUCTION</b>	<b>36</b>
<b>I.2. Définition</b>	<b>36</b>
<b>I.3. Le vent</b>	<b>37</b>
<b>I.4. Types des turbines éoliennes</b>	<b>37</b>
<b>I.4.1. Éolienne à axe vertical</b>	<b>37</b>
<b>I.4.1.a. Avantages</b>	<b>38</b>
<b>I.4.1.b. Inconvénient</b>	<b>38</b>
<b>I.4.2. Éoliennes à axe horizontal</b>	<b>38</b>
<b>I.4.2.a. Avantages</b>	<b>39</b>
<b>I.4.2.b.Inconvénient</b>	<b>39</b>
<b>I.5. Éolienne à vitesse fixe ou à vitesse variable</b>	<b>39</b>
<b>I.6.Principaux composants d'une éolienne</b>	<b>40</b>
<b>I.6.1La tour</b>	<b>40</b>
<b>I.6.2.La nacelle</b>	<b>41</b>
<b>I.6.3. Le rotor</b>	<b>41</b>
<b>I.6.4.Multiplicateur de vitesse</b>	<b>42</b>
<b>I.6.5.Le système contrôle commande de l'éolienne</b>	<b>42</b>
<b>I.6.6 Le système de refroidissement</b>	<b>43</b>
<b>II.La modélisation</b>	<b>44</b>
<b>III. Simulation du système de l'éolienne à base de machine asynchrone     doublealimentation sous Matlab-Simulink</b>	<b>48</b>
<b>Conclusion</b>	<b>51</b>
<b>Conclusion générale</b>	<b>54</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>56</b>



# Introduction générale

## **Introduction générale :**

La production électrique éolienne est en plein développement industriel pour remplacer les énergies polluantes de l'air et lutter contre l'effet de serre (cette ressource ne rejette aucune pollution lorsqu'elle produit de l'énergie électrique).

L'énergie éolienne a connu une forte croissance, cela conduit les chercheurs en Génie Électrique à mener des investigations de façon à augmenter l'efficacité de la conversion électromécanique d'une part et à améliorer la qualité de l'énergie fournie d'une autre part.

De nos jours, la machine asynchrone double alimentation (MADA) est la machine à vitesse variable la plus couramment utilisée dans des unités de production éolienne supérieure à 1MW. Pour une même puissance de production, celle-ci permet de réduire la puissance des convertisseurs de puissance tout en générant une puissance de sortie importante par rapport aux autres technologies des machines [A].

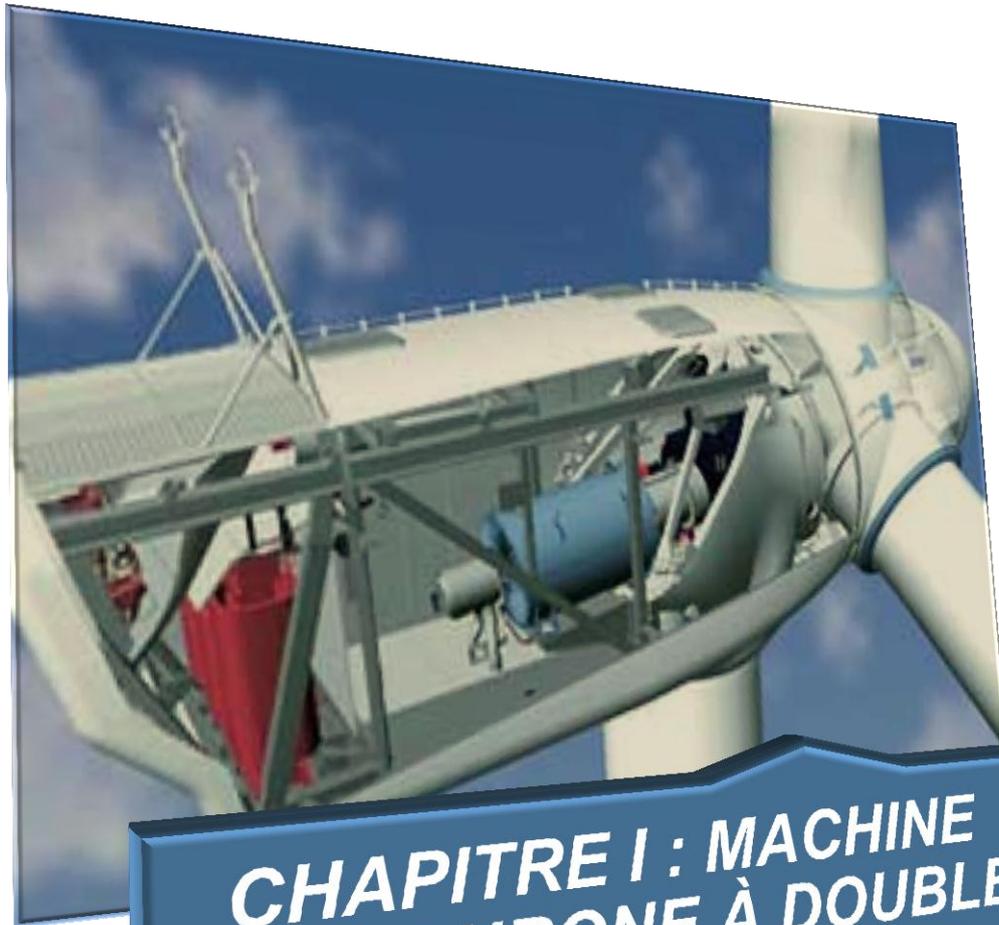
Dans ce cadre, le présent travail décrit une étude sur le générateur asynchrone double alimentation (GADA) entraîné par une turbine éolienne, et il s'articule principalement autour de trois chapitres

Dans le premier chapitre nous allons présenter un état de l'art sur les différents types des machines électriques qui peuvent être utilisées pour la génération d'énergie électrique. Nous allons montrer les caractéristiques de chaque système, ainsi l'intérêt que présente la machine asynchrone à double alimentation par rapport à d'autres machines utilisées dans les systèmes de conversion éoliens.

le deuxième chapitre va être concerné par la modélisation de la MADA en faisant appel à la transformation de Park pour réduire les équations électriques et simplifier le modèle , Les résultats de simulation par Matlab/Simulink seront présentés.

Dans le troisième chapitre nous allons étudier et modéliser la partie de la turbine éolienne qui est une partie importante dans la conversion d'énergie du vent. nous allons aussi présenter la partie de simulation du système de l'éolienne à base d'une machine asynchrone double alimentation sous Matlab/Simulink aussi

Enfin, ce modeste travail se termine par une conclusion générale



**CHAPITRE I : MACHINE  
ASYNCHRONE À DOUBLE  
ALIMENTATION (MADA)**

## I.1 Introduction :

Il existe sur le marché plusieurs types des machines électriques qui peuvent jouer le rôle de génératrice dans un système aérogénérateur qui demande des caractéristiques très spécifiques. On décrit dans cette étude, les principales caractéristiques technologiques et concepts liés aux aérogénérateurs. Les deux types des machines électriques les plus utilisées dans l'industrie éolienne sont les machines synchrones et asynchrones.

Ce chapitre est consacré à la présentation plus spécifique les machines asynchrones triphasés , et leurs principaux composants .

Ces machines s'imposent en effet dans un grand nombre d'applications en raison des avantages qu'ils présentent : normalisés, ils sont robustes, simples d'entretien, faciles à mettre en oeuvre et de faible coût.

## I.2 Historique des machines électrique :

En 1821, après la découverte du phénomène du lien entre électricité et magnétisme, l'électromagnétisme, par le chimiste danois Ørsted, le physicien anglais Michael Faraday construit deux appareils pour produire ce qu'il appela une « rotation électromagnétique » : le mouvement circulaire continu d'une force magnétique autour d'un fil, en fait la démonstration du premier moteur électrique.

En 1822, Peter Barlow construit ce qui peut être considéré comme le premier moteur électrique de l'histoire : la « roue de Barlow » qui est un simple disque métallique découpé en étoile et dont les extrémités plongent dans un godet contenant du mercure qui assure le passage du courant. Elle ne produit cependant qu'une force juste capable de la faire tourner, ne lui permettant pas d'application pratique.

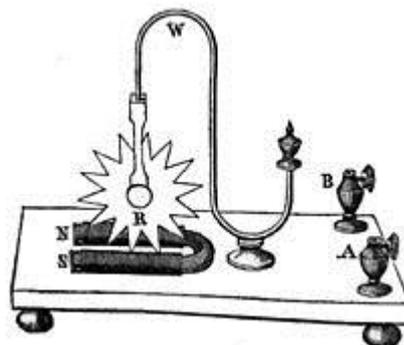


Photo I-1 : Le schéma de la roue de Barlow.

Le premier commutateur utilisable expérimentalement a été inventé en 1832 par William Sturgeon. Le premier moteur à courant continu fabriqué avec l'intention d'être commercialisé a été inventé par

Thomas Davenport en 1834 puis breveté en 1837. Ces moteurs n'ont pas connu de développement industriel à cause du coût des batteries à l'époque.

On doit la vérification pratique de la réversibilité des machines électriques au physicien italien Antonio Pacinotti en 1864

En 1869, l'inventeur belge Zénobe Gramme rend possible la réalisation des génératrices à courant continu en imaginant le collecteur. Il améliore les premières versions archaïques d'alternateurs (1867) et devient célèbre en retrouvant le principe de l'induit en anneau de Pacinotti. En 1871, il présentera à l'Académie des sciences de Paris la première génératrice industrielle de courant continu, que l'on appela machine de Gramme.

En 1873, Hippolyte Fontaine, partenaire de Zénobe Gramme réalise la première application industrielle de la transmission électrique des forces. Tout en démontrant à l'occasion de l'exposition de Vienne, la réversibilité de la machine de Gramme, il présente une expérience associant dynamo et moteur à courant continu, séparés par 2 km de fils électriques. Avant cette expérience décisive, l'énergie mécanique des cours d'eau devait être utilisée sur place, car intransportable sur de longues distances.

Le premier brevet no 391968 du moteur électrique actuel, à courant alternatif, est déposé par le physicien d'origine serbe Nikola Tesla en 1887.

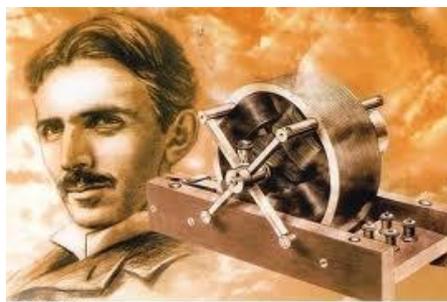


Photo I-2: Nikola Tesla.

La paternité de la machine asynchrone est controversée entre trois inventeurs : en 1887, le physicien Nikola Tesla dépose un brevet sur la machine asynchrone, puis en mai de l'année suivante cinq autres brevets. Pendant la même période Galileo Ferraris publie des traités sur les machines tournantes, avec une expérimentation en 1885, puis une théorie sur le moteur

asynchrone en avril 1888. En 1889, Michail Ossipowitsch Doliwo-Dobrowolski, électricien allemand d'origine russe, invente le premier moteur asynchrone à courant triphasé à cage d'écureuil qui sera construit industriellement à partir de 1891.

### **I.3 Les Différentes Type Des Machines Electrique :**

#### **I.3.1 Machine à courant continu :**

Un appareil à courant continu est un appareil électrique.

Les moteurs courant continu sont des convertisseurs de puissance :

Soit ils convertissent l'énergie électrique absorbée en énergie mécanique lorsqu'ils sont capables de fournir une puissance mécanique suffisante pour démarrer puis entraîner une charge en mouvement. On dit alors qu'ils ont un fonctionnement en moteur.

Soit ils convertissent l'énergie mécanique reçue en énergie électrique lorsqu'ils subissent l'action d'une charge entraînant. On dit alors qu'ils ont un fonctionnement en générateur.

En mode « moteur », l'énergie électrique est convertie en énergie mécanique.

En mode « générateur » ou « dynamo », l'énergie mécanique est convertie en une énergie électrique capable de se comporter comme un frein.

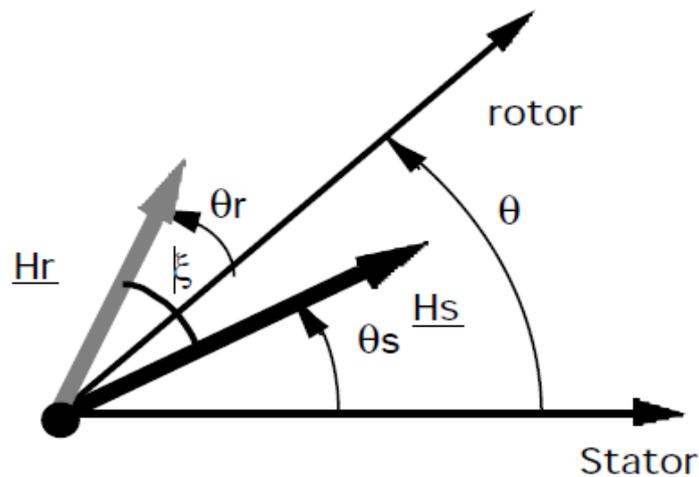
#### **I.3.2 Machine à courant alternatif :**

##### **I.3.2.1 Principe de fonctionnement des machines à courant alternatif :**

Dans les machines électriques à pôles lisses, le couple électromagnétique est dû à l'interaction de deux champs magnétiques.

Dans le cas des machines à courant alternatif de type synchrone et asynchrone, il s'agit de l'interaction de deux champs tournants, le champ tournant créé par le(s) courant(s) qui circule(nt) dans l(es) enroulement(s) du rotor et le champ tournant produit par les courants sinusoïdaux qui parcourent les enroulements du stator.

La figure 1 précise les positions des vecteurs  $H_s$  et  $H_r$  représentant respectivement les champs tournants statorique et rotorique.



### I.3.3 Machine synchrone :

#### I.3.3.1 Définition :

Toute machine électrique dont la vitesse de rotation du rotor est égale à la vitesse de rotation du champ tournant est appelée machine synchrone. Pour l'obtention d'un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique doit être généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. Cela dit, qu'en mode permanent la position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ceci impose une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique.

Deux modes de fonctionnement sont à distinguer pour les machines synchrones. En mode génératrice, elle produit un courant électrique dont la fréquence est déterminée par la vitesse de rotation du rotor. En mode moteur elle consomme un courant électrique pour faire tourner le rotor à une vitesse déterminé par la fréquence du courant.

Les grandeurs des machines varient de quelques Watts pour les petits moteurs à plusieurs centaines de mégawatts pour les alternateurs de grande puissance. Par ailleurs, la structure de ces machines reste très semblable. Deux parties sont à distinguer, le stator est constitué d'enroulements triphasés qui par interaction avec le champ magnétique rotorique crée un couple électromécanique, le rotor quant à lui est responsable de générer le champ d'induction. Il existe trois sortes de rotor, les rotors bobinés à pôles lisses, les rotors bobinés à pôles saillants (Figure I-1), et finalement les rotors à aimant.

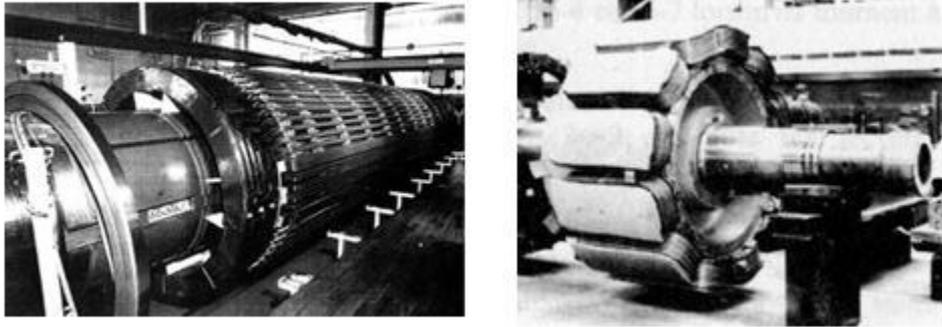


Figure I-1: Rotor à pôles lisses et rotor à pôles saillants

### I.3.3.2 Régime de fonctionnement synchrone :

Pour ce régime, la fréquence du glissement est donnée indépendamment de la vitesse angulaire. Alors à chaque signal de commande correspondent une fréquence déterminée  $f_r$  et une vitesse de fonctionnement  $w_r$  qui ne dépend pas de la charge .en faisant varier la fréquence  $f_r$ , on peut varier la vitesse .En régime synchrone, le moteur à double alimentation fonctionne comme une machine synchrone .Dans ce régime, on peut réguler la vitesse. Cependant il est difficile de maintenir la stabilité du régime pour des variations rapides de vitesse, de charge brusque, etc...

### I.3.4 Machine Asynchrone :

La machine asynchrone est la plus utilisée en industrie car elle présente de nombreux avantages tels que sa puissance massique, sa robustesse, sa facilité de mise en œuvre, son faible coût, etc... Elle est composée de trois éléments essentiels à savoir le stator, le rotor et les organes mécaniques (les paliers), [1].

De nombreuses défaillances peuvent apparaître sur les machines asynchrones. Elles peuvent être électriques, mécaniques ou magnétiques. Leurs causes, très variées, sont classées en trois groupes :

- les initiateurs de défauts : surchauffe du moteur, usures des éléments mécaniques (roulements à billes), rupture de fixations, problème d'isolation électrique, surtension transitoire, etc.
- les contributeurs aux défauts : surcharge fréquente, température ambiante élevée, ventilation défaillante, humidité, fortes vibrations, vieillissement, etc.
- les défauts sous jacents et erreurs humaines : défauts de fabrication, composants défectueux, protections inadaptées, absence de maintenance, ...etc,[2].

#### **I.3.4.1 Stator (ou La carcasse):**

Il est constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique. Ce circuit magnétique est constitué d'un empilement de tôles dans lesquelles sont découpées des encoches parallèles à l'axe de la machine (photo I-). Le bobinage statorique peut se décomposer en deux parties : les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines. Les conducteurs d'encoches permettent de créer dans l'entrefer, le champ magnétique à l'origine de la conversion électromagnétique. Les têtes de bobines.

Elle sert à trois choses:

- à supporter les différentes parties de la machine.
- à refermer le champ magnétique.
- à supporter les enroulements statoriques triphasés qui permettront de créer un champ tournant.

Le feuilletage du stator permet de réduire très fortement les pertes par courant de Foucault, donc l'échauffement.

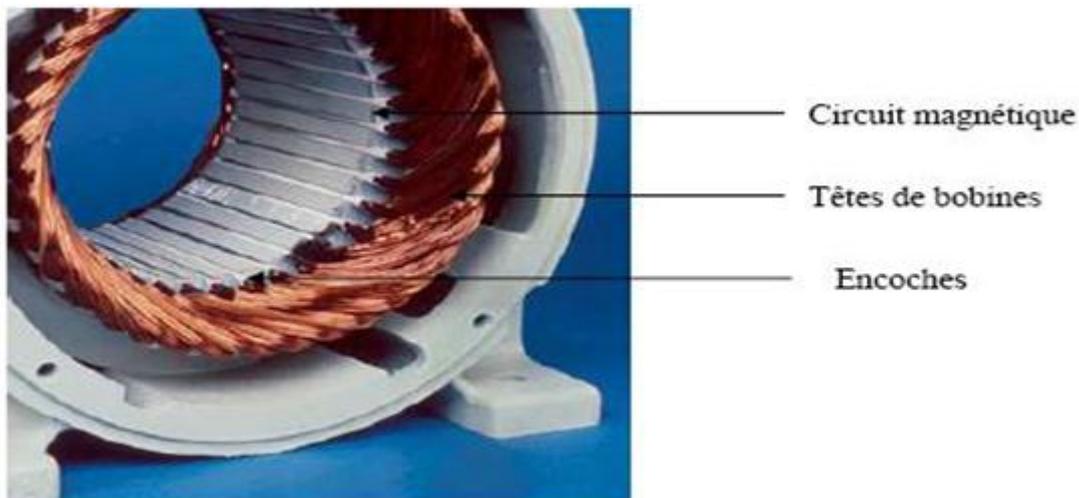


Photo I-3: Photo du stator d'une machine asynchrone

#### **I.3.4.2 Rotor (ou L'induit)**

Le rotor tourne dans l'inducteur de la machine asynchrone. Il se compose de l'axe, du noyau et des enroulements rotoriques. Sa structure est un noyau d'acier feuilleté pour réduire les pertes par courants de Foucault.

- Deux types de rotor existent pour une machine asynchrone:

### **1 Type Rotor bobiné**

Le rotor comporte un enroulement bobiné à l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques en tôle empilés sur l'arbre de la machine. Cet enroulement est obligatoirement polyphasé, même si le moteur est monophasé, et, en pratique, toujours triphasé à couplage en étoile. Les encoches, découpées dans les tôles sont légèrement inclinées par rapport à l'axe de la machine de façon à réduire les variations de réluctance liées à la position angulaire rotor/stator et certaines pertes dues aux harmoniques.

Les extrémités des enroulements rotoriques sont sorties et reliées à des bagues montées sur l'arbre, sur lesquelles frottent des balais en carbone. On peut ainsi mettre en série avec le circuit rotorique des éléments de circuit complémentaires (résistances, électronique de puissance...) qui permettent des réglages de la caractéristique couple/vitesse. Ce type de moteur est utilisé essentiellement dans des applications où les démarrages sont difficiles et/ou nombreux ; en effet les pertes rotor pendant la phase de démarrage valant approximativement  $\frac{1}{2} J\omega^2$  ne sont pas toujours supportées par les cages.

### **2 Type Le Rotor en cage d'écureuil**

Le circuit du rotor est constitué de barres conductrices régulièrement réparties entre deux couronnes métalliques formant les extrémités, le tout rappelant la forme d'une cage d'écureuil. Bien entendu, cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique analogue à celui du moteur à rotor bobiné.

Les barres sont faites en cuivre, en bronze ou en aluminium, suivant les caractéristiques mécaniques et électriques recherchées par le constructeur. Dans certaines constructions, notamment pour des moteurs à basse tension (par exemple 230/400 V), la cage est réalisée par coulée et centrifugation d'aluminium.

On démontre que, si le nombre de barres est suffisamment grand (soit en pratique,  $N_b \geq 8xp$ ), la cage se transforme automatiquement en un circuit polyphasé de polarité adéquate. Ce type de moteur, beaucoup plus aisé à construire que le moteur à rotor bobiné est par conséquent d'un prix de revient inférieur et a une robustesse intrinsèquement plus grande. Il n'est donc pas étonnant qu'il constitue la plus grande partie du parc des moteurs asynchrones actuellement en service.

Son inconvénient majeur est qu'il a, au démarrage, de mauvaises performances (courant élevé et faible couple).

### **I.3.4.3 la machine asynchrone monophasé :**

La machine asynchrone monophasé, bien que moins utilisé dans l'industrie que son homologue triphasé, représente néanmoins une part d'applications non négligeable dans les petites puissances et dans les applications du bâtiment qui utilisent le réseau monophasé 230 V. A puissance égale, il est plus volumineux qu'un moteur triphasé.

Par ailleurs, son rendement et son cosinus  $\phi$  sont beaucoup plus faibles que dans le cas du triphasé et ils varient considérablement en fonction d'une part de la puissance, d'autre part du constructeur.

Les machines monophasés jusqu'à une dizaine de kW sont d'utilisation courante aux Etats Unis.

### **I.3.4.4 la machine asynchrone triphasé (le plus utilisé.)**

La machine asynchrone triphasé est largement utilisé dans l'industrie, sa simplicité de construction en fait un matériel très fiable et qui demande peu d'entretien. il est constitué d'une partie fixe, le stator qui comporte le bobinage, et d'une partie rotative, le rotor qui est bobiné en cage d'écureuil. les circuits magnétique du rotor et du stator sont constitués d'un empilage de fines tôles métalliques pour éviter la circulation de courants de Foucault.

#### **1. machines asynchrones triphasés à rotor en cage d'écureuil :**

Les machines asynchrones triphasés à rotor en cage d'écureuil sont constitués d'une partie fixe appelée stator et d'une partie tournante appelée rotor.

Le circuit magnétique du stator supporte les bobinages qui vont servir à créer le champ magnétique tournant. Le rotor comporte lui aussi un circuit magnétique ainsi qu'un circuit électrique en court-circuit. Les courants induits au sein du circuit électrique du rotor par le champ magnétique sont à l'origine du couple moteur qui est transmis à l'arbre. Le stator sert aussi à la fixation mécanique du machine et à son raccordement électrique grâce à une boîte à bornes.

Les machines asynchrones triphasées sont extrêmement robustes et peu coûteuses, ce qui explique leur utilisation très répandue dans l'industrie.

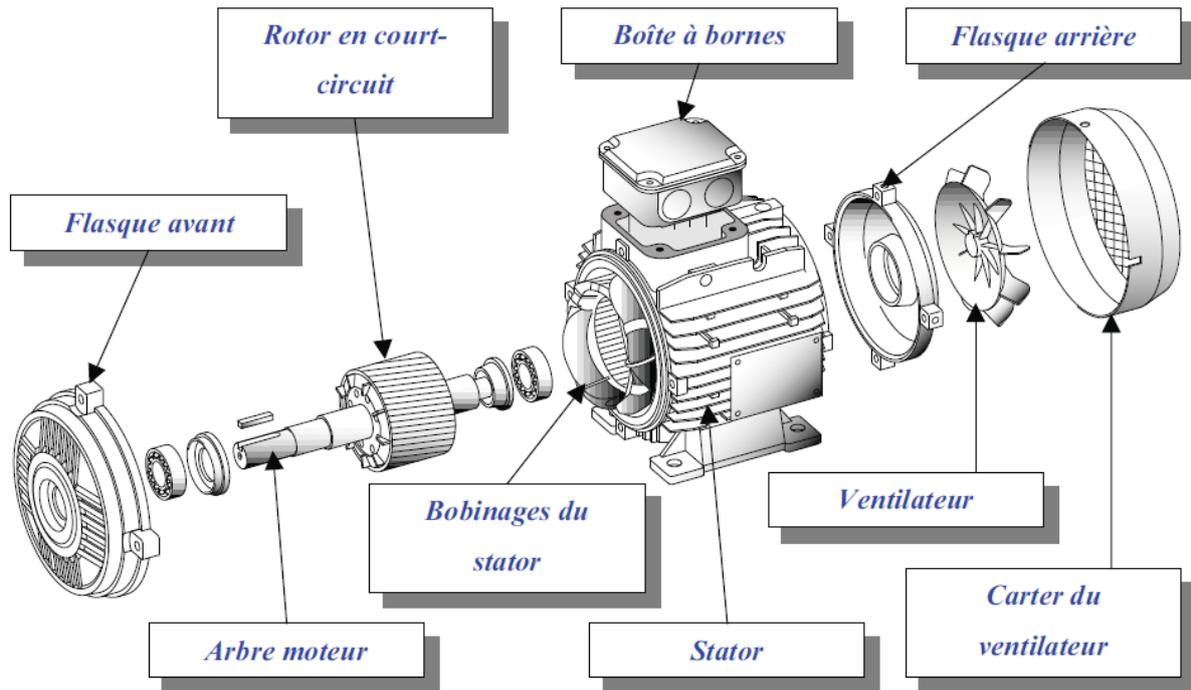


Figure I-2 : vue éclatée d'un machine asynchrone triphasé à rotor en cage d'écureuil

## 2. Machine asynchrone triphasé à rotor bobiné :

Les machines asynchrones triphasés à rotor bobiné sont de constitution identique aux modèles à rotor en court-circuit pour ce qui est du stator. Le rotor comporte des bobinages placés sur le circuit magnétique ; ils sont reliés aux bagues qui, à l'aide des «balais» permettent d'établir la liaison électrique entre la partie tournante (rotor) et la partie fixe (stator). Les bobinages du rotor sont ramenés à la boîte à bornes en vue de leur raccordement électrique.

Ces machines sont de conception plus complexe que leurs homologues à rotor en court-circuit, leur fiabilité est moins bonne en raison du «contact glissant» bagues – balais qui impose une maintenance régulière. Leur utilisation est aujourd'hui de plus en plus rare en raison des progrès de l'électronique de puissance qui fait qu'on leur préfère l'utilisation des machines asynchrones triphasés à rotor en court-circuit associés à un démarreur progressif ou un variateur de vitesse. De plus le pilotage par automates est beaucoup plus facile et souple que les démarrages statoriques et rotoriques qui seront étudiés plus tard.

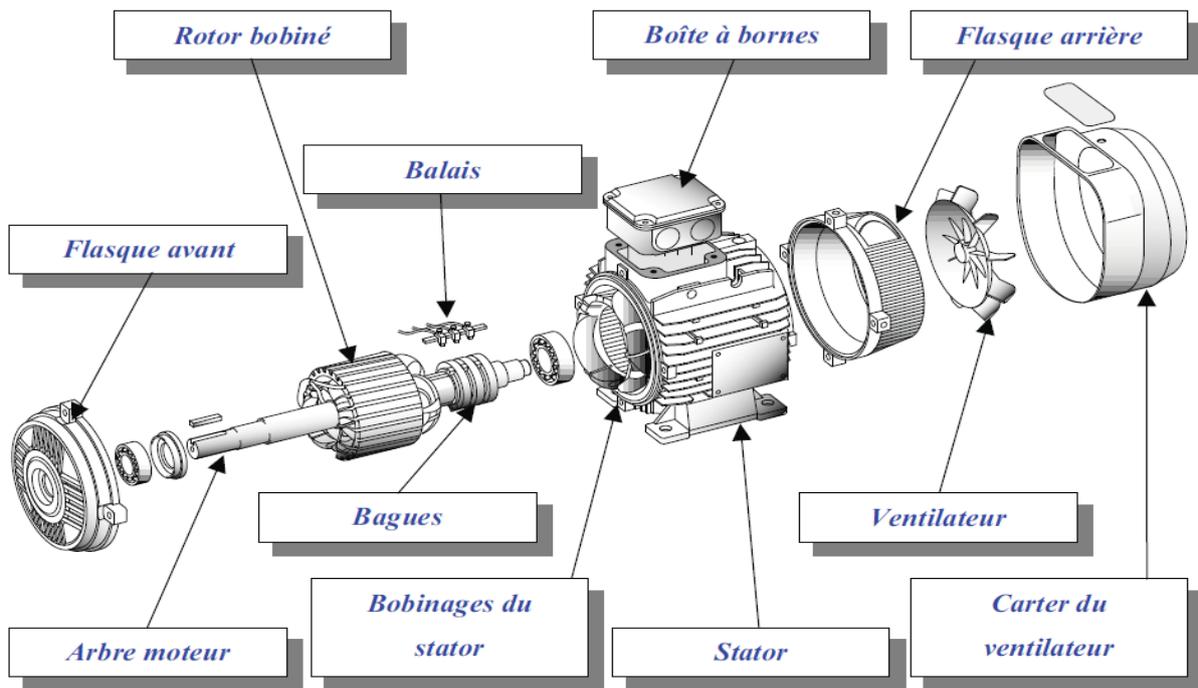


Figure I-3 : Vue éclatée d'une machine asynchrone triphasée à rotor bobiné

#### I.3.4.5 Principaux domaines d'utilisation de la machine asynchrone :

La machine asynchrone est très utilisée dans les applications industrielles, car de par sa conception, son coût est relativement moindre à celui des autres machines, sa robustesse au niveau électromagnétique est grande, et une bonne standardisation existe entre les différents fabricants. Cependant, la simplicité de conception de cette machine cache une complexité fonctionnelle assez importante.

La machine asynchrone a longtemps été fortement concurrencée par la machine synchrone dans les domaines de forte puissance, jusqu'à l'avènement de l'électronique de puissance. On la retrouve aujourd'hui dans de nombreuses applications, notamment dans le transport (métro, trains, propulsion des navires), dans l'industrie (machines-outils), dans l'électroménager. Elle était à l'origine uniquement utilisée en moteur, mais toujours grâce à l'électronique de puissance, elle est de plus en plus souvent utilisée en génératrice; c'est par exemple le cas des éoliennes.

#### I.3.4.6 Principe de fonctionnement:

Pour appréhender le fonctionnement de la machine asynchrone, on considère l'expérience du flux coupé en fonctionnement générateur que l'on modifie de la façon suivante, cette fois les

conducteurs de longueur  $l$  sont fixés entre eux et court-circuités par des barres conductrices extrêmes formant ainsi un rail [3].

En outre, le champ magnétique se déplace rapidement au dessus de cet ensemble (Figure I-4).

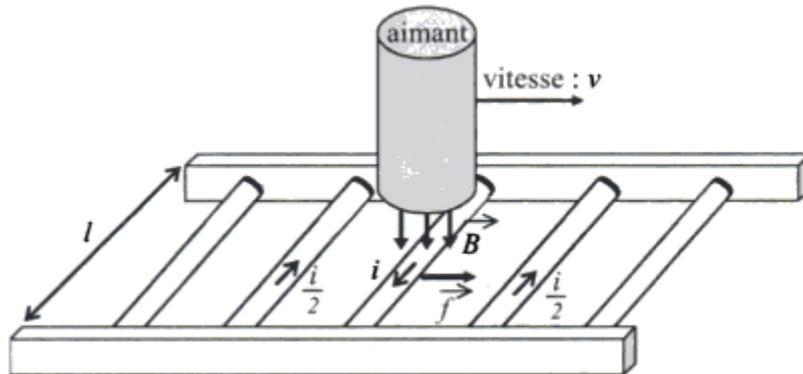


Figure I-4: Déplacement du champ magnétique

D'après la loi de Faraday, une tension est induite dans chaque conducteur coupé par le champ magnétique.

$$e = -Blv$$

Une première conséquence apparaît. Comme chaque conducteur est court-circuité, un courant  $i$  se met à circuler dans le conducteur qui est momentanément en dessous du champ magnétique (ou de l'aimant), comme ce courant traverse le champ magnétique, d'après la loi de Laplace, une force mécanique est appliquée sur ce conducteur. Cette force entraîne le conducteur dans le sens de déplacement du champ magnétique. Si ces conducteurs sont mobiles, ces derniers accélèrent et à mesure qu'ils atteignent de la vitesse, la vitesse à laquelle le champ magnétique est coupé par ces conducteurs ralentit et la tension induite diminue, de même que le courant  $i$ . Cet effet de la loi de Lenz a pour conséquence de diminuer la force de Laplace. Ainsi si les conducteurs se déplaçaient à la même vitesse que le champ magnétique, la tension induite, le courant  $i$  et la force s'annuleraient. La vitesse du rotor est donc légèrement inférieure à la vitesse du champ magnétique.

Dans une machine asynchrone à cage, le rail dans l'exemple présenté à la (Figure I-5) en dessus est recourbé pour former la cage d'écureuil et le déplacement du champ magnétique devient un champ tournant créé par trois bobines/enroulements au stator. Les bobinages au stator sont alimentés par un système triphasé de courant de même pulsation et engendrent des flux statoriques. De part le théorème de Ferraris [4], un champ magnétique tournant est créé dans l'entrefer (et se reboucle dans la carcasse du rotor et du stator). Sa vitesse encore appelée

la vitesse du synchronisme est égale à la pulsation du système triphasé équilibré de courants qui parcourent ces enroulements, pour le stator de la machine asynchrone étudiée, le champ magnétique généré par le stator tourne de un tour par période des grandeurs électriques; dans le cas où le stator serait composé d'un nombre de paire de pôle par phase quelconque ( $p$ ), la vitesse de synchronisme serait donc  $\Omega_s = \omega_s / p$ .

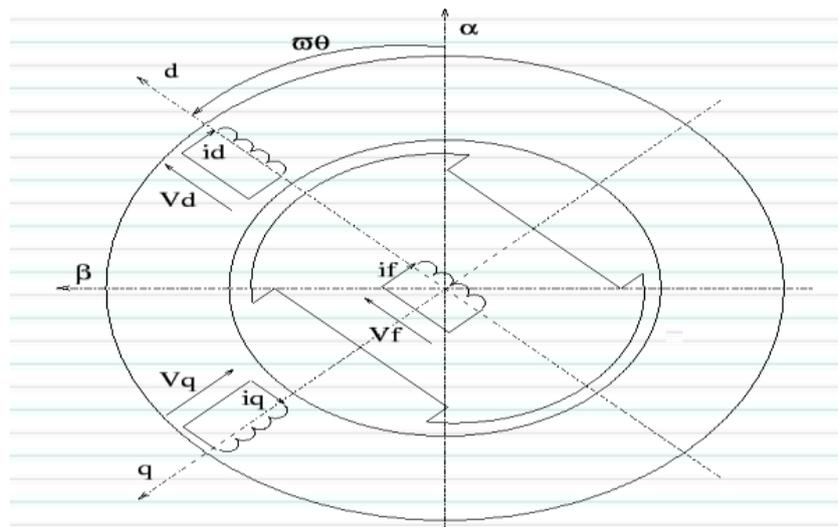


Figure I-5 : machine synchrone dans le repère de Park

Comme expliqué précédemment, la vitesse de l'arbre de la machine est inférieure à la vitesse de synchronisme en régime établi,  $\Omega \neq \Omega_s$  les conducteurs du rotor sont alors soumis à un champ magnétique variable qui tourne par rapport à eux-mêmes à la vitesse relative  $\Omega_r = \Omega_s - \Omega$ .

Il en résulte l'induction de f.é.m. dans ces conducteurs de pulsation  $\omega_r = p\Omega_r$

Les enroulements au stator étant en circuit fermé sur eux-mêmes pour les machines à cage, les f.é.m. induites vont donner naissance dans le circuit rotorique fermé à des courants rotoriques de même pulsation. Ces courants créent à leur tour un champ magnétique rotorique qui tourne par rapport au rotor à la vitesse  $\Omega_r = \omega_r / p$

Étant donné que le rotor tourne à la vitesse  $\Omega_r$ , la vitesse du champ magnétique par rapport au stator est  $\Omega + \Omega_r = \Omega_s$

Le champ magnétique généré par les enroulements du rotor et le champ magnétique généré par les enroulements du stator tournent donc à la même vitesse du synchronisme et s'associent pour créer « un champ magnétique résultant » dans l'entrefer. Ainsi, les phénomènes physiques engendrés par le circuit statorique, y compris ceux induits par le circuit rotorique vont générer des grandeurs électriques au niveau du circuit statorique à la pulsation  $\omega_s$ . Les grandeurs électriques propres au circuit rotorique seront toutes à la pulsation  $\omega_r$ .

## **I.4 Machine Asynchrone à Double Alimentation (type rotor bobiné) :**

### **I.4.1.Principe de fonctionnement :**

Les machines asynchrones à rotor bobiné permettent, par un réglage dynamique du glissement, de s'adapter aux variations de puissance fournies par la turbine, augmentant ainsi le rendement du système. Si pour les petites puissances ( $<500\text{kW}$ ), la partie mécanique peut généralement subir les variations brutales de régime de vent, ce type de contraintes devient inacceptable pour les fortes puissances. La variation de vitesse devient donc de plus en plus justifiée

à mesure qu'on augmente la puissance de l'éolienne. Parmi les critères à prendre en compte pour juger de la qualité d'un tel système, on trouve :

- ✓ L'intérêt de maintenir une fréquence stator bien synchronisée par rapport à celle du réseau, afin de ne pas compromettre la stabilité d'ensemble. On peut même imaginer qu'un système 'intelligent' augmente la marge de stabilité. Ce dernier aspect peut jouer sur la limite de puissance raccordable au réseau et permet la suppression, entre stator et réseau, de condensateurs susceptibles de provoquer des résonances.
- ✓ Le rendement de la conversion.
- ✓ Le filtrage ou la qualité des formes d'ondes injectées au réseau.
- ✓ Le prix, évidemment.

Pour expliquer son principe de fonctionnement, on néglige toutes les pertes. En prenant en compte cette hypothèse, la puissance  $P$  est fournie au stator et traverse l'entrefer : une partie de cette puissance fournie,  $(1-g)P$ , est retrouvée sous forme de puissance mécanique ; le reste  $gP$  sort par les ballais sous forme de grandeurs alternatives de fréquence  $gf$ . Ces grandeurs, de fréquence variable, sont transformées en énergie ayant la même fréquence que le réseau électrique, auquel elle est renvoyée par l'intermédiaire du deuxième convertisseur. Ce réseau reçoit donc  $(1+g)P$ . Les bobinages du rotor sont donc accessibles grâce à un balai et de collecteurs (Figure I-6). Une fois connecté au réseau un flux magnétique tournant à vitesse

fixe apparaît au stator. Ce flux dépend de la réluctance du circuit magnétique, du nombre de spires dans le bobinage et donc du courant statorique [9].

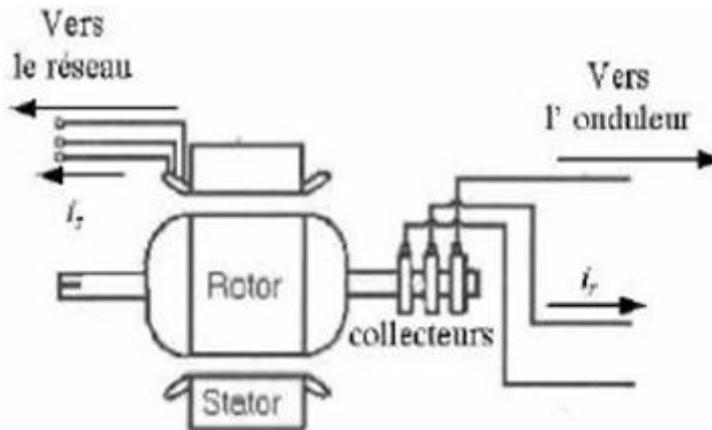


Figure I-6 :Structure de la MADA à rotor bobiné

#### I.4.2 Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée :

Cette configuration à vitesse variable est représentée sur la (figure I-7), le stator est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un redresseur. Une charge résistive est alors placée en sortie du redresseur par l'intermédiaire d'un hacheur à IGBT ou GTO [5, 6, 7, 8]. Le contrôle de l'IGBT permet de faire varier l'énergie dissipée par le bobinage rotorique et de fonctionner à vitesse variable en restant dans la partie stable de la caractéristique couple/vitesse de la machine asynchrone. Le glissement est ainsi modifié en fonction de la vitesse de rotation du moteur.

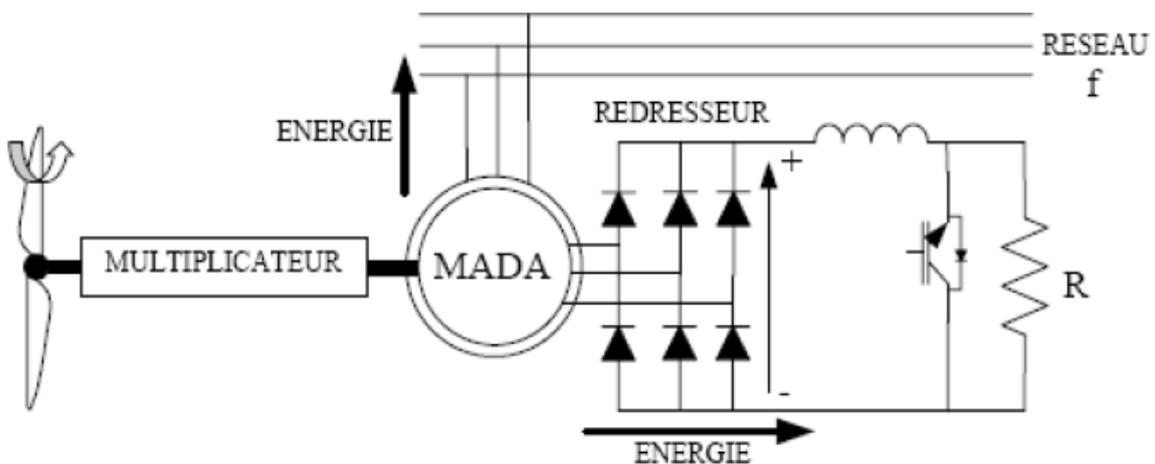


Figure I-7 : MADA avec contrôle du glissement par dissipation de l'énergie rotorique

Si le glissement devient important, la puissance extraite du rotor est élevée et elle est entièrement dissipée dans la résistance  $R$ , ce qui nuit au rendement du système. De plus cela augmente la puissance transmise dans le convertisseur ainsi que la taille de la résistance.

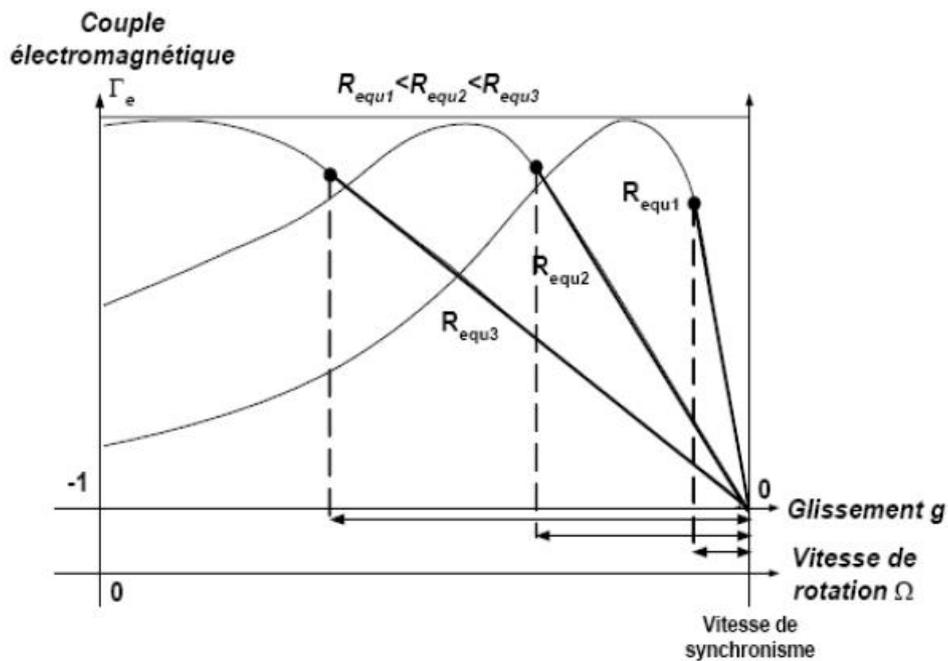


Figure I-8 : Effet de la variation de la résistance rotorique sur le couple électromagnétique

## I.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté la MADA sous toutes ses configurations et les performances qui lui permettent d'occuper un large domaine d'application, soit dans les entraînements à vitesse variables (fonctionnement moteur), ou dans les applications à vitesse variable et à fréquence constante (fonctionnement générateur).



## chapiter II : Modélisation de la machine asynchrone

## II.1. Introduction

La plupart des génératrices utilisées par les éoliennes sont des génératrices asynchrones triphasées. Celles-ci ont plusieurs avantages : elles sont robustes, leur coût est faible et ont une simplicité mécanique. Par ailleurs, leurs inconvénients se trouvent au niveau de la consommation d'énergie réactive, qu'elles tirent soit du réseau, soit elles sont compensées par une batterie de condensateurs d'où la possibilité de fonctionner autonome. Il existe deux types de machine asynchrone : la machine asynchrone à cage d'écureuil et la machine asynchrone à rotor bobiné.

Dans ce chapitre nous allons nous intéresser à la machine asynchrone à rotor bobiné, la plus utilisée dans les éoliennes tournant à une vitesse constante, en partant d'un certain nombre hypothèses simplificatrices pour la modélisation mathématique de la machine.

## II.2.Principe de fonctionnement :

Pendant la rotation, le flux magnétique généré par le stator crée des f.e.m dans le bobinage du rotor. Le rapport entre les f.e.m créées au rotor et au stator est :

$$\frac{E_r}{E_s} = \frac{N_r}{N_s} \cdot \frac{\omega_s - \omega_{mec}}{\omega_s} \quad (\text{II-1})$$

$N_r$  et  $N_s$  sont respectivement le nombre de spires des bobinages rotoriques et statoriques.

$\omega_s$  et  $\omega_{mec}$  sont respectivement les pulsations de synchronisme et mécanique de la machine.

En posant :  $g = \frac{\omega_s - \omega_{mec}}{\omega_s}$  l'équation (II-1) devient :

$$\frac{E_r}{E_s} = g \cdot \frac{N_r}{N_s} \quad (\text{II-2})$$

Les courants au stator et au rotor sont définis comme dans le cas d'un transformateur parfait :

$$\frac{N_r}{N_s} = \frac{I_r}{I_s} \quad (\text{II-3})$$

Donc le rapport entre la puissance au rotor  $S_r$  et la puissance au stator  $S_s$  devient :

$$\frac{S_r}{S_s} = \frac{E_r}{E_s} \cdot \frac{I_r}{I_s} = g \quad (\text{II-4})$$

Cette équation montre que pour une puissance constante transmise au stator, plus on transmet de la puissance par le rotor, plus on augmente le glissement. La pulsation au stator (imposée par le réseau) étant supposée constante, il est donc possible de contrôler la vitesse de la génératrice en agissant simplement sur la puissance transmise au rotor via le glissement  $g$ .

## II.3. Modélisation de la génératrice en fonctionnement linéaire

### II.3.1. Hypothèses

La machine asynchrone, avec la répartition de ses enroulements et sa géométrie, est très complexe pour se prêter à une analyse tenant compte de sa configuration exacte, il est alors nécessaire d'adopter des hypothèses simplificatrices.

On suppose les circuits magnétiques non saturés, et suffisamment feuilletés pour que les pertes fer soient négligeables. Les relations entre les flux et les courants sont d'ordres linéaires.

On considère une densité de courant uniforme dans la section des conducteurs élémentaires, l'effet de peau est donc négligé.

Le phénomène d'hystérésis et les courants de Foucault sont négligés.

Les enroulements statoriques et rotoriques sont symétriques et la f.m.m est distribuée sinusoïdalement le long de la périphérie des deux armatures.

On ne tient compte que du premier harmonique d'espace de distribution de force magnétomotrice de chaque phase du stator et du rotor. L'entrefer est d'épaisseur uniforme (constant), les inductances propres sont constantes. Les inductances mutuelles sont des fonctions sinusoïdales de l'angle entre les axes des enroulements rotoriques et statoriques.

On considère que la machine fonctionne en régime équilibré.

### II.3.2. Modèle mathématique de la machine asynchrone linéaire

Les équations générales de la machine asynchrone à rotor bobiné dans un repère triphasé s'écrivent sous forme matricielle :

$$\begin{cases} [V_{s abc}] = [R_s][I_{s abc}] + \frac{d}{dt}[\phi_{s abc}] \\ [V_{r ABC}] = [R_r][I_{r ABC}] + \frac{d}{dt}[\phi_{r ABC}] \end{cases} \quad (\text{II-5})$$

Avec  $[R_s]$  et  $[R_r]$  sont respectivement les matrices des résistances statoriques et rotoriques par phase.

$[V_{s abc}] ; [V_{r ABC}] ; [I_{s abc}] ; [I_{r ABC}]$  sont respectivement les vecteurs tensions et courants statoriques et rotoriques

$[\phi_{s abc}] ; [\phi_{r ABC}]$  sont les matrices des flux statoriques et rotoriques suivant les axes A, B, C et a,b,c. Les flux s'expriment en fonction des courants en faisant intervenir les différentes inductances :

$l_s, l_r$  : inductances propres statorique et rotorique ;

$l_m$  : inductances mutuelles entre une phase statorique et une phase rotorique ;

$M_{sr}$  : Matrice inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique.

$$\begin{cases} [\phi_{s abc}] = [L_s][I_{s abc}] + [M_s][I_{r ABC}] \\ [\phi_{r ABC}] = [M_{sr}][I_{s abc}] + [L_r][I_{r ABC}] \end{cases} \quad (\text{II-6})$$

Avec :  $[L_s]$  et  $[L_r]$  représentent respectivement les matrices inductances statorique et rotorique exprimées en fonction des inductances propres et mutuelles.

$$[V_{s abc}] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} ; [V_{r ABC}] = \begin{bmatrix} V_{rA} \\ V_{rB} \\ V_{rC} \end{bmatrix} ; [I_{s abc}] = \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} ; [I_{r ABC}] = \begin{bmatrix} I_{rA} \\ I_{rB} \\ I_{rC} \end{bmatrix}$$

$$[\phi_{s abc}] = \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} ; [\phi_{r ABC}] = \begin{bmatrix} \phi_{rA} \\ \phi_{rB} \\ \phi_{rC} \end{bmatrix} ; [L_s] = \begin{bmatrix} i_{saa} & i_{sab} & i_{sab} \\ i_{sab} & i_{saa} & i_{sab} \\ i_{sab} & i_{sab} & i_{saa} \end{bmatrix} ; [L_r] = \begin{bmatrix} i_{rAA} & i_{rAB} & i_{rAB} \\ i_{rAB} & i_{rAA} & i_{rAB} \\ i_{rAB} & i_{rAB} & i_{rAA} \end{bmatrix}$$

$$[M_{sr}] = l_r \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} ;$$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix} ; [R_r] = \begin{bmatrix} r_r & 0 & 0 \\ 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & r_r \end{bmatrix}$$

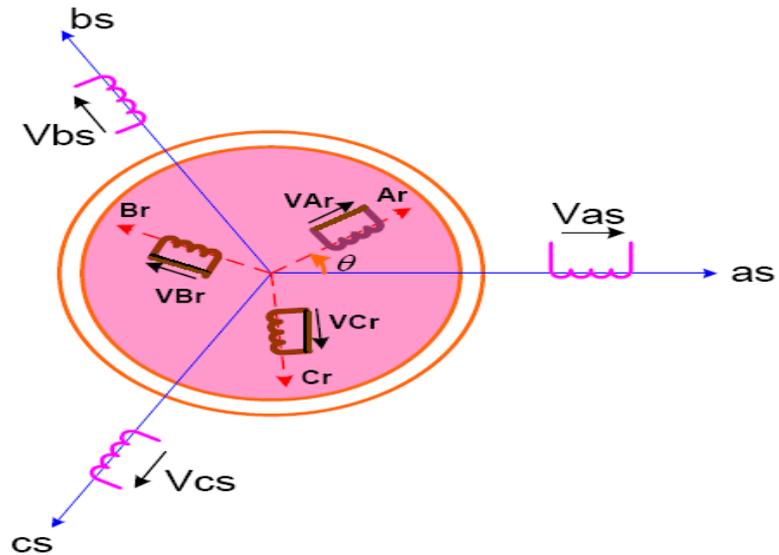


Figure II-1 : Représentation de la machine asynchrone

as, bs, cs : phases du stator ; Ar , Br ,Cr: phases du rotor.

### II.3.3. Transformation triphasé - diphasé

Le but de l'utilisation de cette transformation c'est de passer d'un système triphasé  $abc$  vers un système diphasé  $\alpha\beta$ . Il existe principalement deux transformations : Clarke et Concordia. La transformation de Clarke conserve l'amplitude des grandeurs mais pas la puissance ni le couple (on doit multiplier par un coefficient  $3/2$ ). Tandis que celle de Concordia, qui est normée, elle conserve la puissance mais pas les amplitudes.

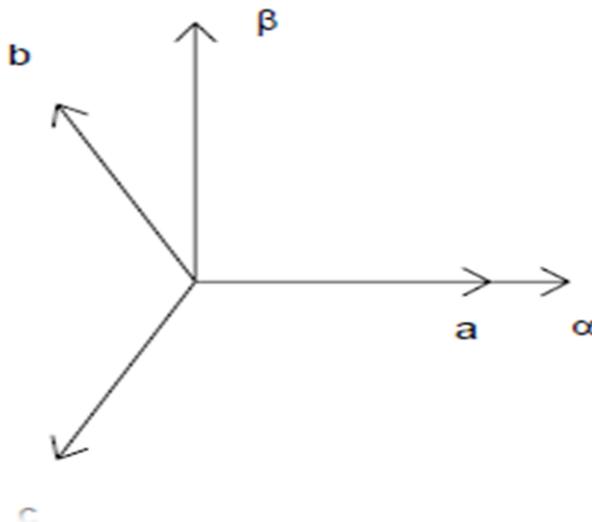


Figure II-2 :  $abc-\alpha\beta$

Transformation de Concordia	Transformation de Clarke
passer d'un système triphasé $abc$ vers un système diphasé $\alpha\beta$	
$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \xrightarrow{T_{23}} \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \text{ c - à - d } [x_{\alpha\beta}] = T_{23}[x_{abc}]$ $\text{Avec } T_{23} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \xrightarrow{C_{23}} \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \text{ c - à - d } [x_{\alpha\beta}] = C_{23}[x_{abc}]$ $\text{Avec } C_{23} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$
passer d'un système diphasé $\alpha\beta$ vers un système triphasé $abc$	
$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \xrightarrow{T_{32}} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \text{ c - à - d } [x_{abc}] = T_{32}[x_{\alpha\beta}]$ $\text{Avec } T_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \xrightarrow{C_{32}} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \text{ c - à - d } [x_{abc}] = C_{32}[x_{\alpha\beta}]$ $\text{Avec } C_{32} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$

Le choix de matrice de passage non normée (Clarke) est bien pratique en commande où l'on traite des grandeurs  $dq(I_{ds}, I_{qs})$  que l'on verra par la suite). En effet, cela permet, par exemple, d'apprécier directement le module du courant qui est absorbé par le moteur, sans avoir à passer par un coefficient multiplicateur. Mathématiquement parlant, le choix d'une matrice normée (Concordia) est souvent utilisé pour des raisons de symétrie de transformation directe et inverse. Nous allons utiliser la transformation de Concordia dans notre modélisation. Son application aux équations de la machine écrites ci-dessous donne :

$$T_{23}[V_{abc}] = [V_{\alpha\beta}] = T_{23} \left\{ R_s [I_{abc}] \frac{d}{dt} [\phi_{abc}] \right\} \quad (\text{II-7})$$

$$[V_{\alpha\beta}] = R_s T_{23} [I_{abc}] + \frac{d}{dt} T_{23} [\phi_{abc}] \quad (\text{II-8})$$

$$[V_{\alpha\beta}] = R_s [I_{\alpha\beta}] \frac{d}{dt} [\phi_{\alpha\beta}] \quad (\text{II-9})$$

On a alors réduit le système de 3 équations à un système à 2 équations.

De même pour le rotor

$$[V_{\alpha\beta r}] = R_s [I_{\alpha\beta r}] \frac{d}{dt} [\phi_{\alpha\beta r}] \quad (\text{II-10})$$

ainsi que pour l'écriture des flux en fonction des courants. L'intérêt pour les flux, c'est que les matrices 3x3 des inductances vont être réduites à des matrices 2x2. On a alors l'apparition des inductances cycliques :

$$L_s = l_s - m_s$$

$$L_r = l_r - m_r$$

alors :

$$\begin{bmatrix} \phi_{\alpha\beta s} \\ \dots \\ \phi_{\alpha\beta r} \end{bmatrix} = \left[ \begin{array}{cc|cc} L_s & 0 & M.P(\theta) & \\ 0 & L_s & \hline M.P(-\theta) & & L_r & 0 \\ & & 0 & L_r \end{array} \right] \begin{bmatrix} I_{\alpha\beta s} \\ \dots \\ I_{\alpha\beta r} \end{bmatrix}$$

$$M = \frac{3}{2} m_{sr}$$

où la matrice  $P(\theta)$  est la matrice de rotation :  $P(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$

On dispose à présent d'une modélisation de la machine asynchrone dans 2 repères séparés Les grandeurs statoriques sont exprimées dans le repère  $\alpha\beta$  stator et les grandeurs rotoriques le sont dans le repère  $\alpha\beta$  rotor. Il faut exprimer toute la modélisation dans un repère commun.

En effet, si l'on examine de plus près la matrice des inductances ,

$$\left[ \begin{array}{cc|cc} L_s & 0 & M.P(\theta) & \\ 0 & L_s & \hline M.P(-\theta) & & L_r & 0 \\ & & 0 & L_r \end{array} \right]$$

on s'aperçoit que les grandeurs statoriques sont liées aux grandeurs rotoriques à travers l'angle

On choisi alors de transformer les grandeurs statoriques et les grandeurs rotoriques vers un repère commun dit  $dq$  et ceci à l'aide de deux transformations dans le plan qui sont des rotations. Ce sont ces transformations ainsi que la transformation de Concordia ou de Clarke qui constitue la transformation de Park.

### II.3.4. Transformation de Park (cas général )

La transformation de Park est constitué d'une transformation triphasé - diphasé suivie d'une rotation. Elle permet de passer du repère  $abc$  vers le repère  $\alpha\beta$  puis vers le repère  $dq$  le repère  $\alpha\beta$  est toujours fixe par rapport au repère  $abc$  (Figure II-2), par contre le repère  $dq$  est mobile. Il forme avec le repère fixe  $\alpha\beta$  un angle qui est appelé l'angle de la transformation de Park ou angle de Park.

Revenons au choix de ces angles de transformation pour chaque ensemble de grandeurs (statoriques et rotoriques). Si l'on note par  $\theta_s$  (resp. par  $\theta_r$ ) l'angle de la transformation de Park des grandeurs statoriques (resp. rotoriques), il existe une relation qui les lie et qui simplifie les équations et par la même le modèle final.

Les repères de la transformation de Park des grandeurs statoriques et celle des grandeurs rotoriques doivent coïncider pour simplifier ces équations .

Ceci se fait en liant les angles  $\theta_s$  et  $\theta_r$  par la relation :  $\theta_s = \theta + \theta_r$

Les grandeurs statoriques sont transformés :

$$[x_{\alpha\beta s}] = P(\theta_s)[x_{dqs}]$$

et les grandeurs rotoriques également :

$$[x_{\alpha\beta r}] = P(\theta_r)[x_{dqr}]$$

Les équations aux tensions deviennent :

$$[V_{dqs}] = R_s[I_{dqs}] + \dot{\theta}_s P\left(\frac{\pi}{2}\right)[\phi_{dqs}] + \frac{d}{dt}[\phi_{dqs}] \quad (\text{II-11})$$

$$[V_{dqr}] = R_r[I_{dqr}] + \dot{\theta}_r P\left(\frac{\pi}{2}\right)[\phi_{dqr}] + \frac{d}{dt}[\phi_{dqr}] \quad (\text{II-12})$$

Où  $\dot{\theta}_s$  et  $\dot{\theta}_r$  sont les dérivées des angles des transformations de Park des grandeurs statoriques et rotoriques respectivement.

Cependant, c'est au niveau de l'écriture des flux que ça devient intéressant :

$$\begin{bmatrix} \phi_{dqs} \\ \phi_{dqr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & | & M & 0 \\ 0 & L_s & | & 0 & M \\ \hline M & 0 & | & L_r & 0 \\ 0 & M & | & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{dqs} \\ I_{dqr} \end{bmatrix}$$

En effet, les sous matrices sont maintenant diagonales et ne dépendent plus de  $\theta$  (l'angle électrique entre le stator et le rotor).

Le système matriciel peut également être écrit sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \phi_{dr} = M I_{ds} + L_r I_{dr} \\ \phi_{qr} = M I_{qs} + L_r I_{qr} \end{cases} \quad (\text{II-13})$$

et les tensions :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} - \dot{\theta}_s \phi_{qs} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \dot{\theta}_s \phi_{ds} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} - \dot{\theta}_r \phi_{qr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \dot{\theta}_r \phi_{dr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II-14})$$

Nous avons exprimé les équations de la machine mais il reste également le couple électromagnétique. Ce dernier peut être dérivé de l'expression de la co-énergie ou obtenu à l'aide d'un bilan de puissance. Il en résulte plusieurs expressions toutes égales (où p est le nombre de paires de pôles) :

$$\begin{aligned}
 C_e &= P(\phi_{ds}I_{qs} - \phi_{qs}I_{ds}) \\
 C_e &= P(\phi_{qr}I_{qr} - \phi_{qr}I_{dr}) \\
 C_e &= PM(I_{qr}I_{qr} - I_{qr}I_{dr}) \\
 C_e &= P\frac{M}{L_r}(\phi_{dr}I_{qs} - \phi_{qr}I_{ds})
 \end{aligned}$$

C'est cette dernière expression que nous allons utiliser dans la commande vectorielle qui sera présentée par la suite.

### II.3.5. Modèle diphasé de la machine asynchrone en fonctionnement linéaire

les équations des flux et des tensions par la matrice de Park qui s'exprime par :

$$[P(\alpha)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \cos(\alpha - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\alpha + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\alpha) & -\sin(\alpha - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\alpha + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

Avec  $\alpha$  : l'angle entre l'axe d et l'axe as de (la Figure II-3) pour une transformation au stator ou l'angle entre d et Ar pour une transformation au rotor. Les grandeurs (courants, tensions et flux) transformées, du système diphasé sont égales à la matrice de Park multipliée par les grandeurs du système triphasé :

$$\begin{cases} [V_{s,dq}] = [P(\theta_s)][V_{s abc}] \\ [V_{r,dq}] = [P(\theta_s - \theta)][V_{r ABC}] \end{cases} ; \begin{cases} [I_{s,dq}] = [P(\theta_s)][I_{s abc}] \\ [I_{r,dq}] = [P(\theta_s - \theta)][I_{r ABC}] \end{cases} ; \begin{cases} [\phi_{s,dq}] = [P(\theta_s)][\phi_{s abc}] \\ [\phi_{r,dq}] = [P(\theta_s - \theta)][\phi_{r ABC}] \end{cases}$$

Ainsi, en multipliant les systèmes d'équations (II-5) et (II-6) par la matrice de Park, on obtient :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} + \frac{d}{dt} \phi_{ds} - \omega_a \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \frac{d}{dt} \phi_{qs} + \omega_a \phi_{ds} \end{cases} \quad (\text{II-15})$$

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d}{dt} \phi_{dr} - (\omega_a - \omega_r) \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d}{dt} \phi_{qr} + (\omega_a - \omega_r) \phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II-16})$$

$$\begin{cases} \phi_{dq_s} = L_s \cdot I_{dq_s} + M_{sr} \cdot I_{dq_r} \\ \phi_{dq_r} = M_{sr} \cdot I_{dq_r} + L_r \cdot I_{dq_r} \end{cases} \quad (\text{II-17})$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} \omega_s = \frac{d}{dt} \theta_s \\ \omega = \frac{d}{dt} \theta \\ \theta_s = \theta + \theta_r \end{cases}$$

$\omega_a$  désigne la vitesse angulaire électrique du repère d, q. Dans le nouveau repère, la machine est représentée par (la Figure II-3) ci-dessous.

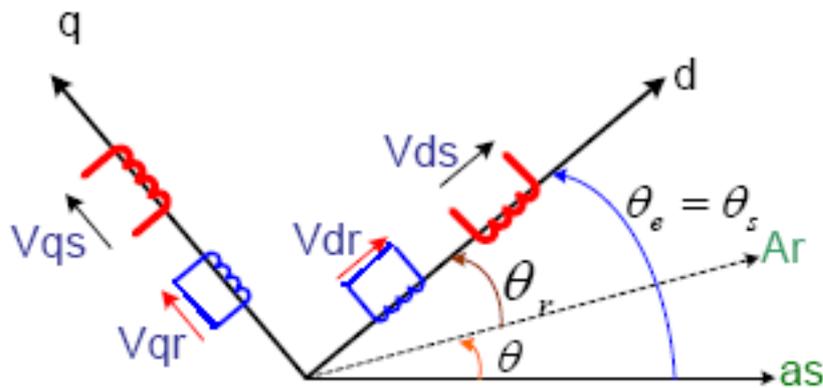


Figure II-3: Représentation de la machine dans le repère diphasé

### II.3.6.Choix du repère dq :

Jusqu'à présent, nous avons exprimé les équations et les grandeurs de la machine dans un repère  $dq$  qui fait un angle électrique  $\theta_s$  avec le stator et qui fait également un angle électrique  $\theta_r$  avec le rotor mais qui n'est pas défini par ailleurs, c'est à dire qu'il est libre.

Il existe trois choix important. On peut fixer le repère  $dq$  au stator, au rotor ou au champ tournant. Rappelons que le repère  $dq$  est le repère mobile, c'est-à-dire qu'il nous appartient de calculer les angles des transformations de Park  $\theta_s$  et  $\theta_r$  afin d'effectuer les rotations. On peut donc le lier à un référentiel mobile comme le champ tournant

Le champ tournant est le champ crée par le bobinage statorique et qui tourne, en régime permanent, à la vitesse de synchronisme [BAG 04c]. Il est symbolisé par le vecteur flux statorique. On parle de vecteur alors qu'on vérité on a tout un champ. Le vecteur permet de donner une idée visuelle de la phase et du module d'amplitude du flux.

Le flux rotorique, quand à lui, est représenté par un vecteur flux rotorique qui tourne également à la même vitesse, c'est-à-dire au synchronisme. En effet, c'est le rotor qui "glisse par rapport au champ tournant. Mais, en régime permanent, les deux flux, statorique et rotorique tournent à la même vitesse, au synchronisme.

### II.3.7. Choix du référentiel

Il est plus intéressant d'écrire les équations dans un référentiel lié soit au stator, soit au rotor, ou au champ tournant, selon les objectifs de l'application. Dans chacun de ces nouveaux référentiels, les équations de la machine deviennent plus simples que dans le référentiel quelconque. Nous représentons ci-dessous (Figure II-4) les schémas équivalents suivant les deux axes pour un référentiel quelconque de vitesse  $\omega_a$

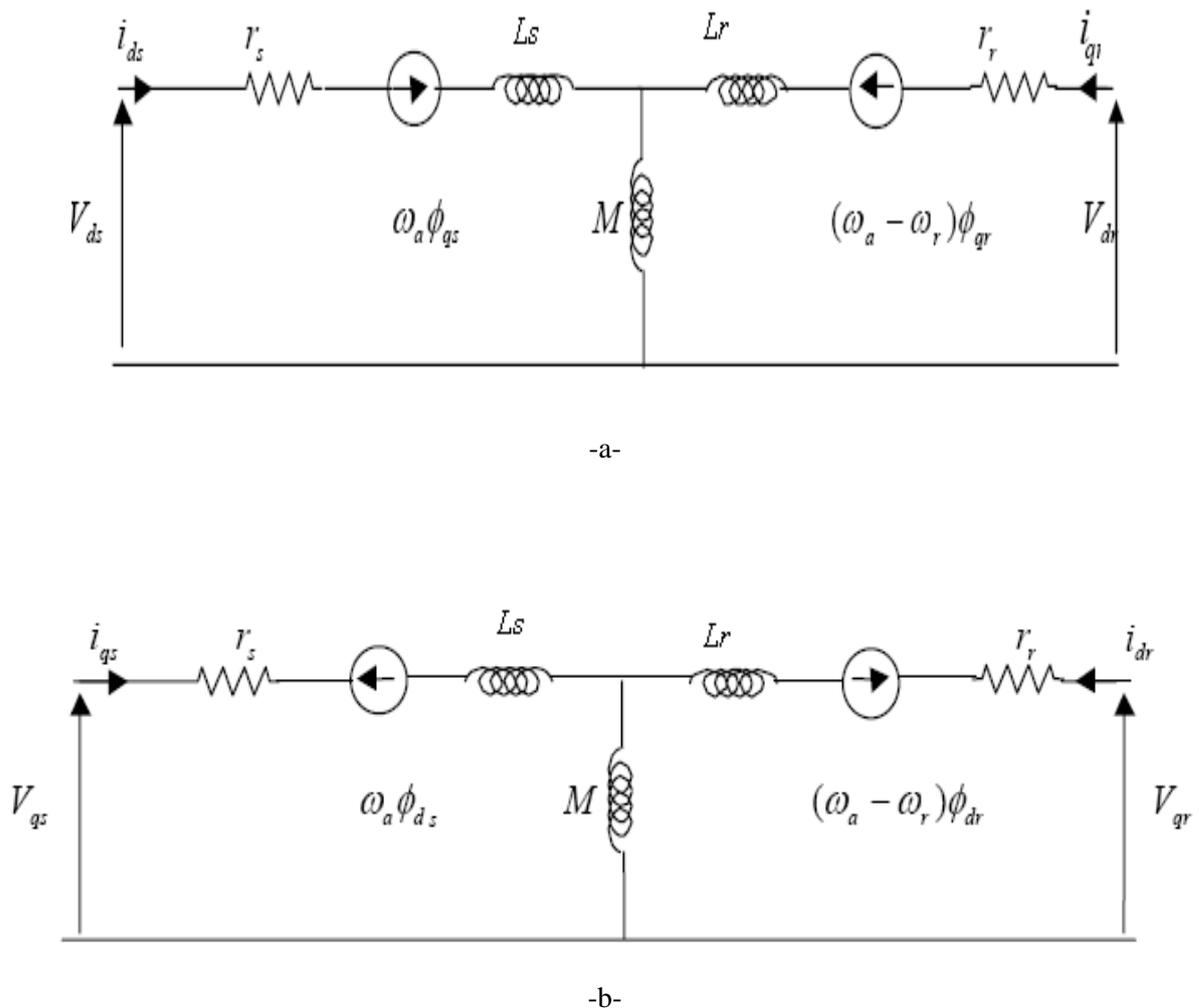


Figure II-4 : Schéma équivalent en régime dynamique de la machine asynchrone dans un référentiel arbitraire : -a- Suivant l'axe d ; -b- Suivant l'axe q.

Le choix du référentiel se fait en fonction de la valeur de  $\omega_a$

$\omega_a=0$  : correspond au référentiel stationnaire.

$\omega_a= \omega_r$  : correspond au référentiel lié au rotor.

$\omega_a= \omega_s$  : correspond au référentiel lié au champ tournant.

### II.3.8. Equations de Puissance et de Couple

Selon Park, la puissance électrique statorique instantanée de la machine s'écrit :

$$p(t) = \frac{3}{2}(V_{ds}I_{ds} + V_{qs}I_{qs}) \quad (\text{II-18})$$

Dans un référentiel lié au champ tournant, en remplaçant  $V_{ds}$  et  $V_{qs}$  par leurs valeurs, la relation précédente multipliée par  $dt$  devient :

$$dW_{es} = \frac{3}{2}r_s(I_{ds}^2 + I_{qs}^2)dt + \frac{3}{2}(d\phi_{ds}I_{ds} + d\phi_{qs}I_{qs}) + \frac{3}{2}\omega_s(\phi_{ds}I_{qs} - \phi_{qs}I_{ds})dt \quad (\text{II-19})$$

L'énergie électrique fournie au stator pendant le temps  $dt$  se décompose ainsi en trois termes :

-Le premier représente l'énergie perdue par effet Joule au stator ;

-Le second représente la variation d'énergie magnétique statorique ;

-Le troisième représente l'énergie transférée du stator au rotor à travers l'entrefer par l'intermédiaire du champ tournant.  $dW_\delta$

Avec :

$$\begin{aligned} dW_\delta &= \frac{3}{2}\omega_s(\phi_{ds}I_{qs} - \phi_{qs}I_{ds})dt \\ &= \frac{3}{2}r_r(I_{dr}^2 + I_{qr}^2)dt + \frac{3}{2}(d\phi_{dr}I_{dr} + d\phi_{qr}I_{qr}) + \frac{3}{2}\omega_r(\phi_{ds}I_{qs} - \phi_{qs}I_{ds})dt \end{aligned} \quad (\text{II-20})$$

L'énergie transmise à travers l'entrefer est donc composée de trois termes :  $dW_\delta$

-L'énergie perdue par effet Joule au rotor ;

-La variation d'énergie magnétique rotorique ;

-L'énergie transformable en énergie mécanique.  $dW_{mec}$

Le couple électromagnétique développé par le champ tournant s'obtient en divisant le troisième terme de l'équation (II-21) par  $\Omega_s dt$

$$\Gamma_{em} = \frac{3}{2}p(\phi_{ds}I_{qs} - \phi_{qs}I_{ds}) \quad (II-21)$$

Le couple mécanique s'obtient en divisant le dernier terme de (II-21) par  $\Omega_r dt$  :

$$\Gamma_{mec} = \frac{3}{2}p(\phi_{ds}I_{qs} - \phi_{qs}I_{ds}) = \frac{3}{2}p(\phi_{qr}I_{dr} - \phi_{dr}I_{qr}) = \Gamma_r + j \frac{d\Omega_r}{dt} + f\Omega_r \quad (II-22)$$

En explicitant les flux statoriques et rotoriques en fonction des inductances, on vérifie que :

$$\Gamma_{mec} = \Gamma_{em} = \frac{3}{2}pM_{sr}(I_{qs}I_{dr} - I_{ds}I_{qr})$$

Cette relation très importante met en évidence le fait que le couple résulte de l'interaction de composantes des courants statoriques et rotoriques en quadrature [10, 13].

## II.5 Simulation de la MADA

Pour réaliser la simulation de la MADA en fonctionnement génératrice, nous avons utilisé le logiciel MatLab-Simulink [21] à l'aide duquel nous avons modélisé toutes les parties du système à savoir la machine, l'onduleur. Nous avons soumis le système à des échelons de référence qui n'est rien d'autre que le modèle de la puissance de la turbine afin d'étudier le comportement de la régulation des puissances active et réactive de la machine transmises au réseau. présentent les résultats obtenus par simulation.

Nous obtenons aussi avec la simulation les différentes courbes de courants et de tensions présentées par les figures ci-dessous; les courants de sortie de l'onduleur est automatiquement adaptée

à celle du réseau par élimination des harmoniques de haut rang à l'aide un transformateur. Les courants  $I_{dr}$  et  $I_{qr}$  présentent des ondulations et des pics courant et sont filtrés avant d'être injectés dans le réseau

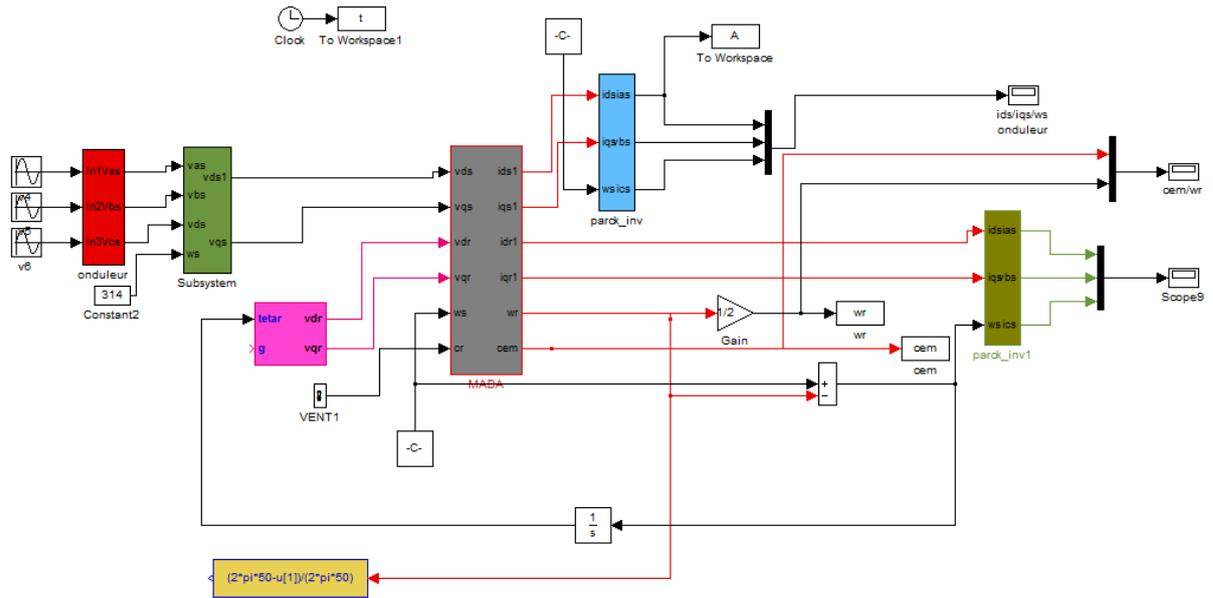


Figure II-8 : schéma bloc de la MADA

Les courbes de simulation obtenues à l'aide du modèle de la Fig.III.13 sont présentées ci-dessous :

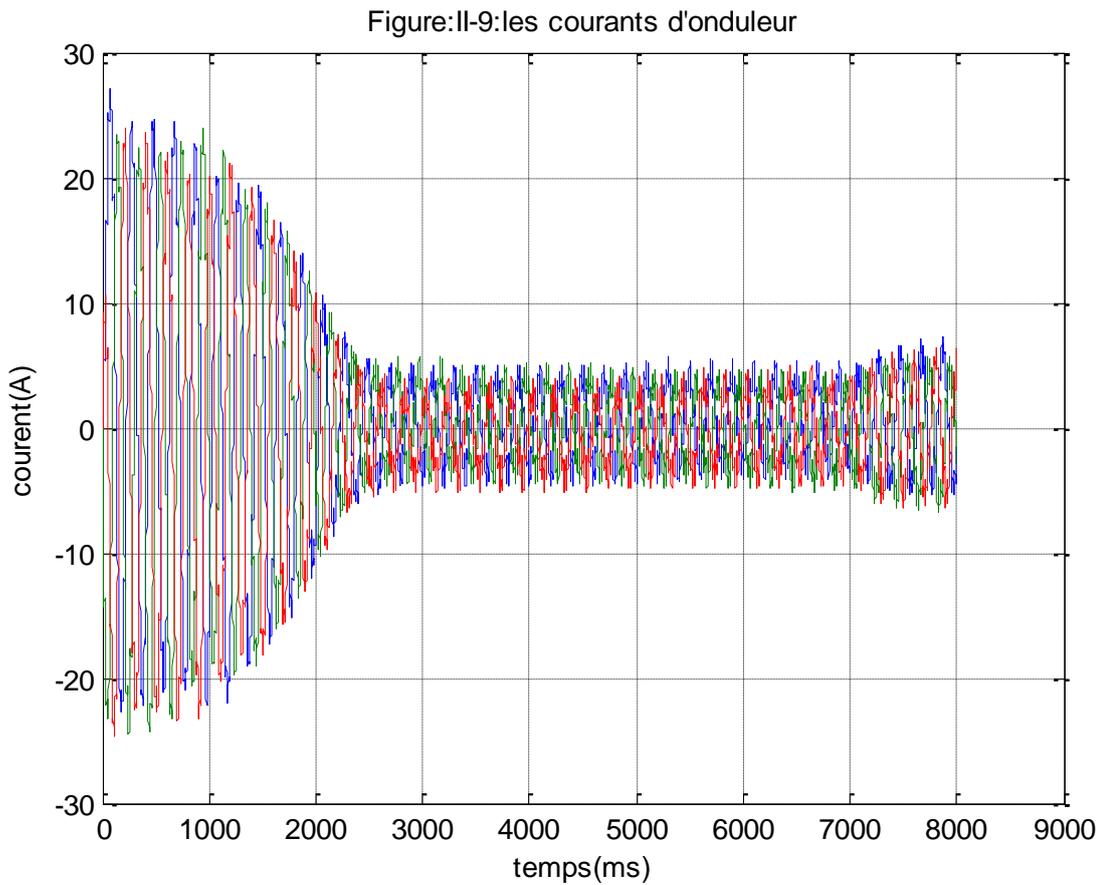


Figure:II-10:les courents de systeme.

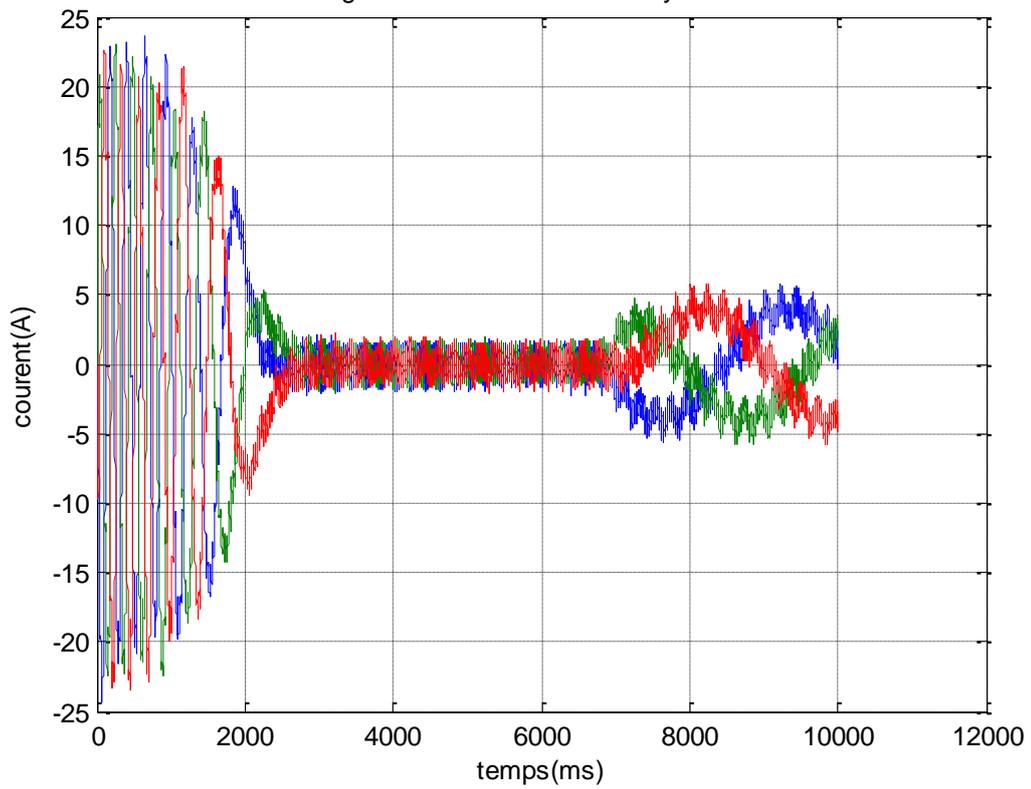
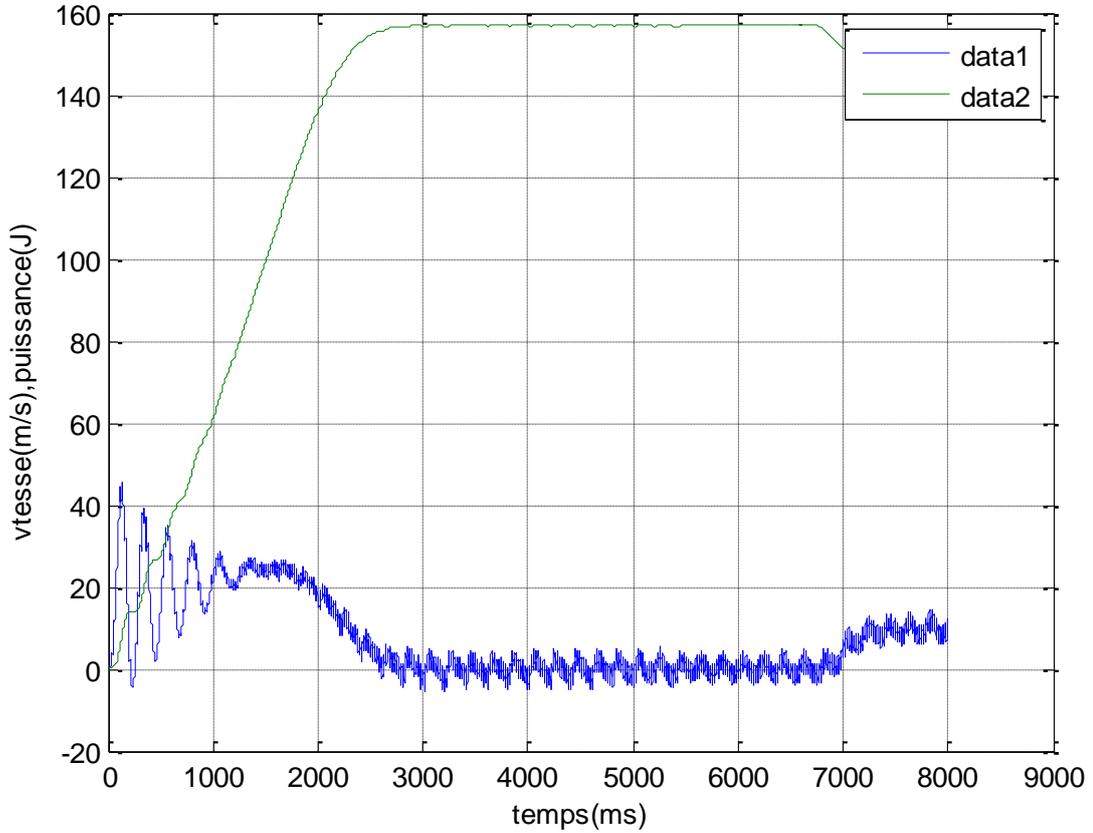


Figure:II-11:la variation de la vitesse de rotation et l'energe de puissance en fonction de temps



## II.6 Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'établir un modèle mathématique de la machine asynchrone à travers des équations simples à l'aide de la transformation de Park. Celles-ci nous faciliteront par la suite l'établissement des différents modèles que nous allons utiliser dans la simulation de l'éolienne. Celles-ci nous faciliteront par la suite l'établissement des différents modèles que nous allons utiliser dans la simulation de l'éolienne.

Nous avons présenté la procédure de prise en compte de l'effet de la saturation magnétique du circuit du flux principal de la machine en régime permanent . Dans la partie « simulation et résultats expérimentaux (plus bas) » nous allons voir que les résultats obtenus à partir du modèle saturé de la machine, sont concordants avec ceux issus de l'expérimentation. Cependant, notons que pour les très fortes intensités.

Celle-ci peut être attribuée à la saturation des circuits des flux de fuite non considérée dans la présente modélisation, mais plus on tient compte de nouveaux phénomènes plus la modélisation devient compliquée et la méthode inadaptée.

### Liste des symboles :

$N_r$  et  $N_s$  sont respectivement le nombre de spires des bobinages rotoriques et statoriques.

$\omega_s$  et  $\omega_{mec}$  sont respectivement les pulsations de synchronisme et mécanique de la machine.

Avec  $[R_s]$  et  $[R_r]$  sont respectivement les matrices des résistances statoriques et rotoriques par phase

$[V_{s abc}]$  ;  $[V_{r ABC}]$  ;  $[I_{s abc}]$  ;  $[I_{r ABC}]$  sont respectivement les vecteurs tensions et courants statoriques et rotoriques

$[\phi_{s abc}]$  ;  $[\phi_{r ABC}]$  sont les matrices des flux statoriques et rotoriques suivant les axes A, B, C et a,b,c. Les flux s'expriment en fonction des courants en faisant intervenir les différentes inductances :

$l_s, l_r$  : inductances propres statorique et rotorique ;

$l_m$  : inductances mutuelles entre une phase statorique et une phase rotorique ;

$M_{sr}$  : Matrice inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique.  $[L_s]$  et  $[L_r]$  représentent respectivement les matrices inductances statorique et rotorique

$\dot{\theta}_s$  et  $\dot{\theta}_r$  sont les dérivées des angles des transformations de Park des grandeurs statoriques



## CHAPITER III : La turbine éolienne

## **I.généralité sur les systèmes éolienne:**

### **I.1.INTRODUCTION :**

Depuis longtemps, l'homme utilise l'énergie éolienne, au début, elle a été utilisée pour faire avancer les bateaux, moulin du grain ou pomper de l'eau. Par la suite pendant plusieurs décennies l'énergie éolienne a servi à produire de l'énergie électrique, que ce soit à l'échelle individuelle avec le petit éolien ou à grande échelle avec le grand éolien, l'énergie du vent peut contribuer à diversifier la production d'énergie électrique, en outre, l'énergie éolienne est une énergie propre, renouvelable qui peut pallier aux problèmes environnementaux..

Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal) et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes.

Dans ce chapitre, nous allons étudier et modéliser la partie de la turbine éolienne qui est une partie importante dans la conversion d'énergie du vent, cette étude sera utilisée par la suite dans le système global de conversion d'énergie éolienne, nous allons aussi présenter les principaux éléments qui la composent.

Pour ce faire, cette étude portera essentiellement sur la modélisation et la Simulation assistée par MATLAB.

### **I.2. Définition :**

L'éolienne est un dispositif destiné à convertir l'énergie cinétique du vent en énergie Mécanique, elles sont généralement utilisés pour produire de l'électricité et entre dans la Catégorie des énergies renouvelables

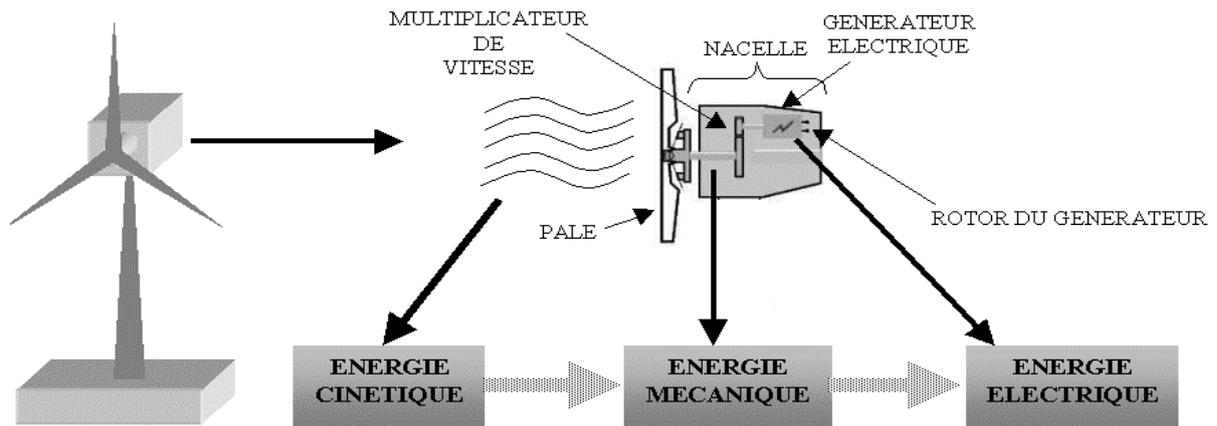


Figure III-1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent

### I.3. Le vent :

Le vent est généralement appliqué aux déplacements naturels horizontaux de l'atmosphère (mouvement d'air). Les mouvements de direction verticale sont appelés des courants. Les vents sont produits par les différences de pressions atmosphériques engendrées principalement par les gradients de température. Les variations de la distribution de la pression et des températures sont dues essentiellement à une distribution inégale de l'énergie solaire sur la surface de la terre, et aux différences des propriétés thermiques des surfaces des continents et des océans.

Quand les températures de régions voisines deviennent inégales, l'air le plus chaud tend à s'écouler par dessus l'air le plus froid (le plus lourd). La direction des vents générés de cette façon est généralement grandement modifiée par la force de Coriolis résultant de la rotation de la terre [22].

### I.4. Types des turbines éoliennes:

Il existe deux principaux types d'éoliennes qui se différencient essentiellement dans leur organe capteur d'énergie à savoir l'aéro-turbine. En effet, selon la disposition de la turbine par rapport au sol on obtient une éolienne à axe vertical ou à axe horizontal [23].

#### I.4.1. Éolienne à axe vertical:

Ils ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. De nombreuses variantes technologiques ont été testées dont seulement deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation, le rotor de Savonius et le rotor de Darrieux [23].

A nos jours, ce type d'éolienne est plutôt marginal et son utilisation est beaucoup moins répandue. Elles présentent des avantages et des inconvénients que nous pouvons citer comme suit [24] [23].

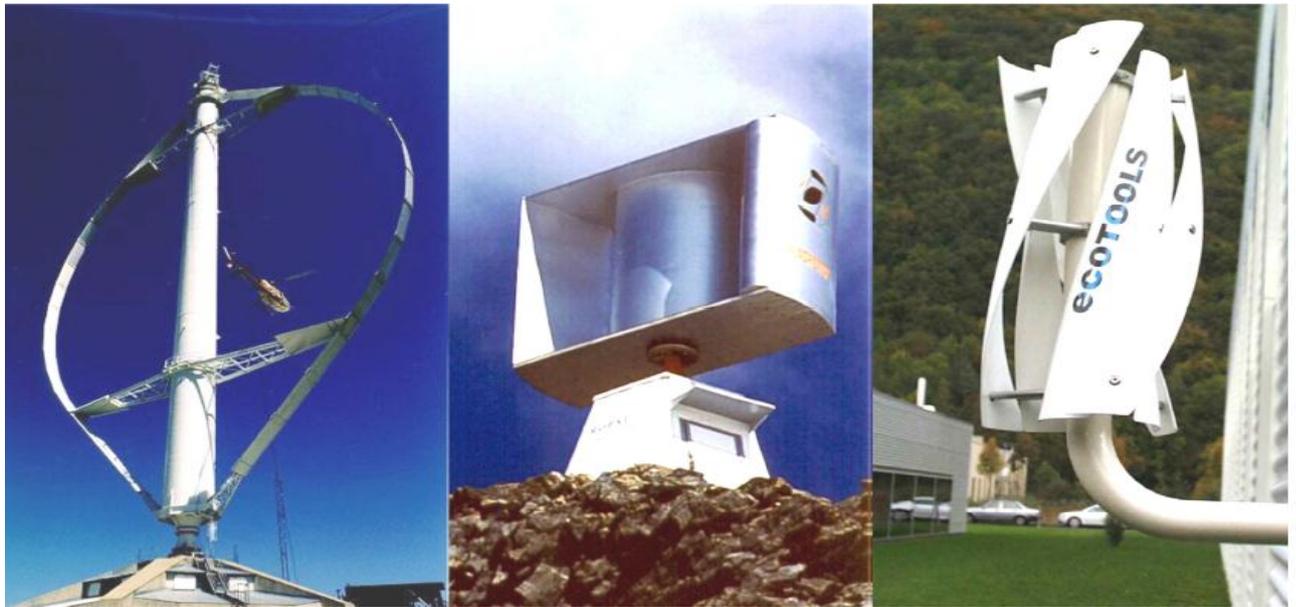


Figure III-2: Turbines à axe vertical

#### **I.4.1.a. 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.

#### **I.4.1.b. 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.

#### **I.4.2. Éoliennes à axe horizontal:**

Ce sont les éoliennes actuellement les plus répandues sans doute à cause de leurs avantages remarquables, elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales face ou sous le vent [23].



Figure III-3 : technologie éolienne à axe horizontal.

#### **I.4.2.a. 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.

#### **I.4.2.b. 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 son encore utilisé pour la production d’électricité dans les zones isolés.
- Elles sont de faible puissance destinées à des utilisations permanentes comme la charge des batteries par exemple [23]

#### **I.5. Éolienne à vitesse fixe ou à vitesse variable :**

Face au problème de la source d'énergie aléatoire, deux approches sont possibles (Figure III-4) : La Génération à Vitesse Constante (GVC, cas A), et la Génération à Vitesse Variable (GVV, cas B). Dans le premier cas (GVC) une machine génératrice classique est directement connectée au réseau, et donc la plage de vitesse possible reste limitée aux alentours de la vitesse synchrone, qui est constante et imposée par le réseau [25].

Pour pouvoir profiter de toute la source d'énergie variable dans le cas de la GVC on doit utiliser un compensateur mécanique qui adapte le rapport de vitesse entre le système physique et l'axe du générateur en fonction de la disponibilité énergétique du moment. Cette compensation ou adaptation est faite « à la base », en éliminant une partie de l'énergie disponible au prix de la diminution du rendement global du système [25]

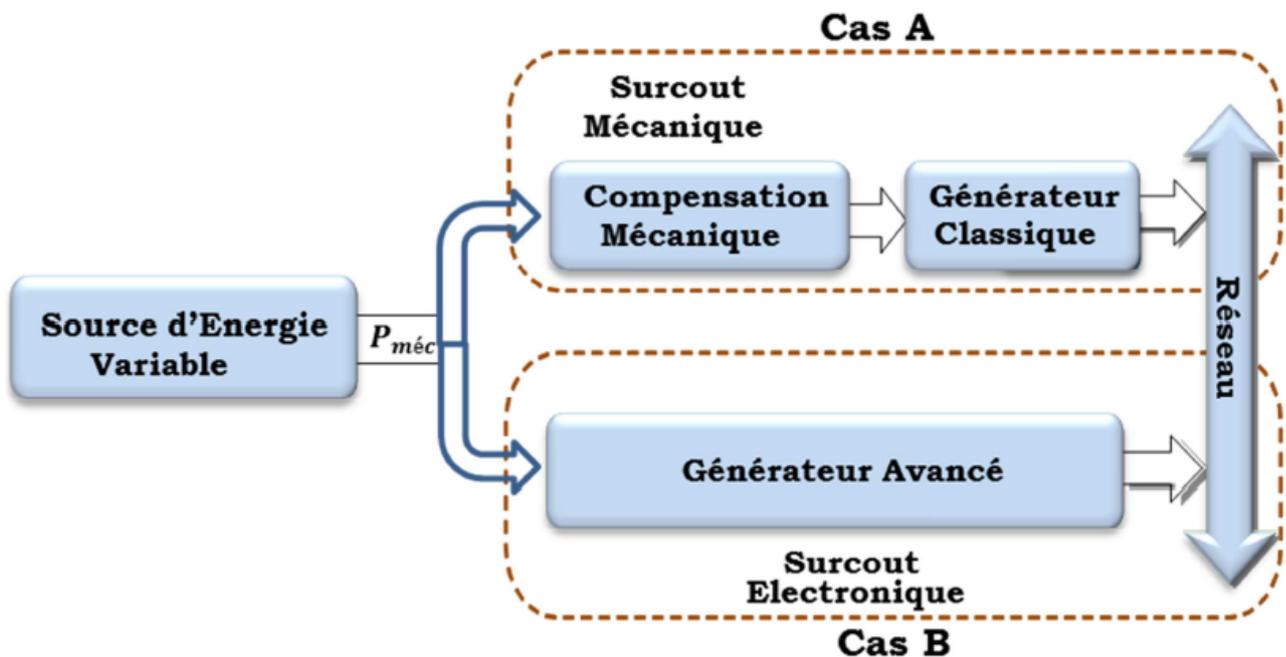


Figure III-4: Systèmes de génération d'énergie électrique à partir de sources d'énergie variable.

### I.6.Principaux composants d'une éolienne :

Une éolienne est constituée principalement de trois parties : les pales (entre 1 et 3), la Nacelle et la tour. Chacune de ces parties doit être minutieusement étudiée et modélisée de Façon à obtenir un meilleur rendement et une bonne fiabilité du système ainsi qu'un faible Coût d'investissement.

#### I.6.1La tour:

La tour est généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, elle doit être Le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière Mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité. Un compromis

Consiste généralement à prendre une tour (mât) de taille très légèrement supérieure au Diamètre du rotor de l'aérogénérateur (exemple : éolienne NORDEX N90 2,3 MW : diamètre De 90m, mât 80m) [26].

### I.6.2. La nacelle:

La nacelle se retrouve au sommet de la tour, elle regroupe tous les éléments mécaniques Permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, Roulements, multiplicateur. Le frein, le générateur, les systèmes hydrauliques ou électriques D'orientation des pales (frein aérodynamique), le système de refroidissement par air ou par Eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne. Tous ces éléments Sont représentés dans la figure suivante :

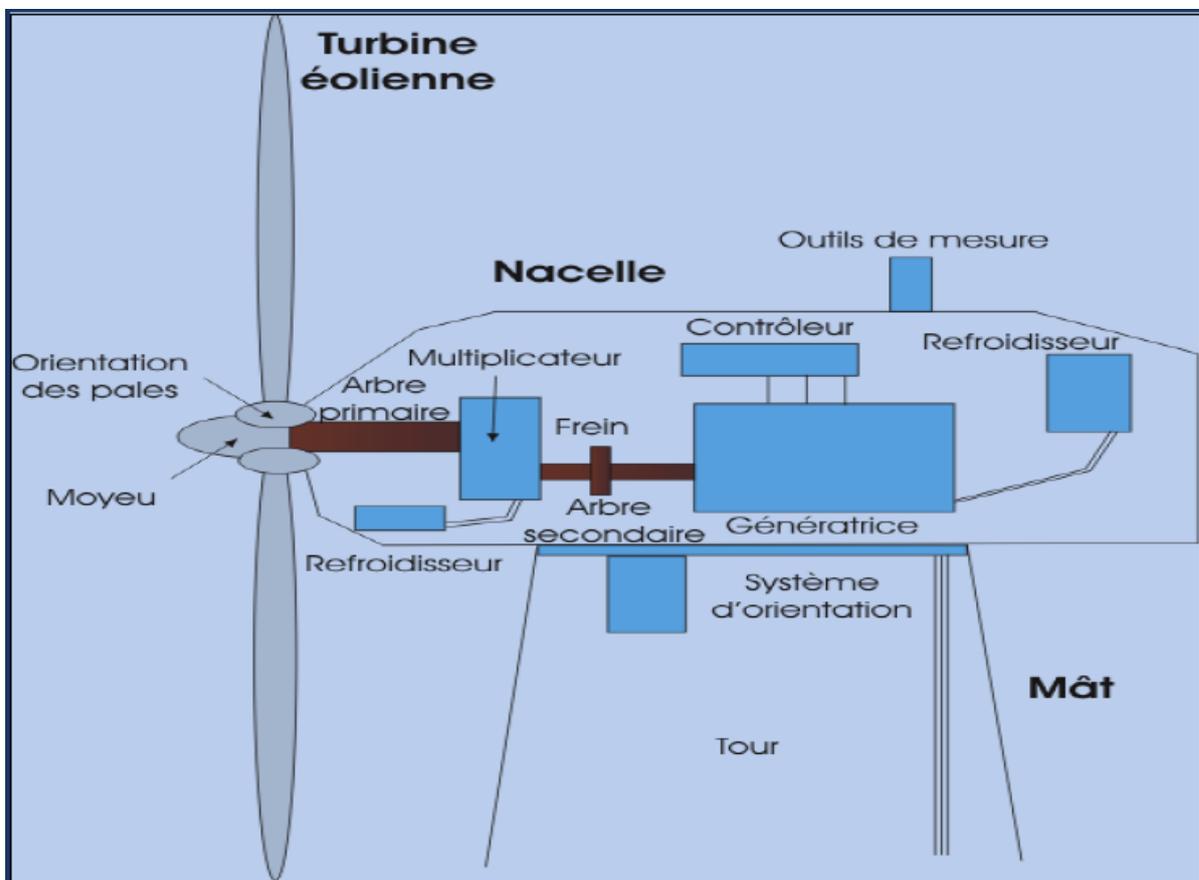


Figure III-5: Éléments constituant une éolienne [27]

### I.6.3. Le rotor :

Le Rotor est constitué par de pales montées sur le moyeu, sa fonction principale est de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, l'énergie captée par l'éolienne est en fonction de

la vitesse du vent et la surface balayée par l'hélice, cette dernière est directement liée au diamètre du rotor, plus le diamètre est grand plus la surface balayée est importante. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale (concept danois) étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit [27].

Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie (la largeur, la longueur) dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées. La plupart des pales modernes des grandes éoliennes sont fabriquées en plastique (polyester ou époxy) renforcé par des fibres de verre (en anglais, appelé aussi GRP - glass fibre Reinforce plastics). L'utilisation de fibres de carbone ou d'aramide comme matériaux de Renforcement est une autre possibilité, mais en général, une telle solution s'avérera trop chère pour les grandes éoliennes. Les matériaux composites de bois, bois-époxy ou bois-fibres époxy n'ont pas encore pénétré le marché des pales, bien qu'on explore toujours les possibilités de leur utilisation pour la fabrication des pales. Les alliages d'acier et d'aluminium posent des problèmes de poids et de fatigue du métal, respectivement. Par conséquent, ces alliages sont actuellement seulement utilisés pour les pales très petites [27], [28].

#### **I.6.4. Multiplicateur de vitesse:**

La puissance produite par la rotation du rotor d'une éolienne est transmise à la génératrice par toute une chaîne dynamique, c.-à-d. par l'arbre lent, le multiplicateur et l'arbre rapide, mais pourquoi, en fait, utiliser un multiplicateur, n'est-ce pas possible d'entraîner la génératrice directement par la puissance produite par l'arbre lent ?

Si nous utilisons une génératrice ordinaire, raccordée directement à un réseau à 50 Hz et à trois phases avec deux, quatre ou six pôles, il nous faudrait une turbine à une vitesse extrême variant entre 1.000 et 3.000 tours par minute. Avec un diamètre de rotor de 43 mètres, cela impliquera une vitesse tangentielle des pales du rotor à leur extrémité de plus de deux fois la vitesse du son – il vaut donc mieux laisser tomber cette idée tout de suite. Une autre possibilité consiste à construire une génératrice à marche lente, munie d'une multitude de pôles. Mais si vous désirez raccorder votre génératrice directement au réseau, vous aurez besoin d'une génératrice à 200 pôles (c.-à-d. à 300 aimants) pour obtenir une vitesse de rotation raisonnable de 30 tours par minute. Un autre problème est le fait que la masse du rotor de la génératrice doit être plus ou moins proportionnelle au couple (moment ou couple de torsion) que le rotor doit pouvoir supporter. De toute manière, une génératrice entraînée directement sera donc très lourde - et coûtera très chère [25], [27].

#### **I.6.5. Le système contrôle commande de l'éolienne:**

Le système de contrôle de l'éolienne est composé d'un certain nombre d'ordinateurs Qui surveillent sans cesse la condition de l'éolienne, tout en recueillant des statistiques sur son Fonctionnement.

Comme son nom l'indique, cette unité contrôle également plusieurs Interrupteurs, pompes hydrauliques et soupapes situés à l'intérieur de l'éolienne. Avec L'augmentation de la taille des éoliennes, il devient encore plus important que leur taux de Disponibilité soit très élevé, donc que leur fonctionnement soit fiable à tout moment.

Le système contrôle commande communique avec le propriétaire ou l'opérateur de L'éolienne par un lien de communication, p.ex. En transmettant des alarmes ou des demandes D'entretien par téléphone ou radio. Il rend également possible d'appeler l'éolienne afin de Recueillir des statistiques et de contrôler sa condition actuelle. Dans un parc éolien, il est Normal qu'une des éoliennes soit dotée d'un ordinateur permettant de contrôler et de recueillir Les données des autres éoliennes du parc. On peut appeler cet ordinateur par communication Téléphonique ou radio.

En général, on installe un système contrôle commande et tout en bas de la tour, et à L'intérieur de la nacelle. Sur les modèles récents, la communication entre les deux systèmes est Normalement assurée par des fibres optiques. Sur certains des nouveaux modèles, on a placé Un troisième système de contrôle dans le moyeu du rotor. Cette unité communique avec le Système de contrôle situé dans la nacelle par des communications en série au travers de câbles Couplés par des bagues et des brosses sur l'arbre lent. Il est possible de surveiller ou de régler Entre 100 et 500 paramètres différents dans une éolienne moderne. Le système contrôle commande Vérifie p.ex. La vitesse de rotation du rotor, la génératrice, la tension et l'intensité Du courant de celle-ci. En outre, on peut enregistrer les foudres et leur charge. Il est également

Possible d'obtenir des informations sur la température de l'air en dehors de l'éolienne, la Température dans les armoires électroniques, la température de l'huile du multiplicateur, la Température des enroulements de la génératrice, la température des paliers du multiplicateur, La pression hydraulique, l'angle de pas de chaque pale du rotor (en cas d'éoliennes à pas Variable ou à contrôle actif par décrochage aérodynamique), l'angle d'orientation (en comptant

Le nombre de dents sur la couronne du dispositif d'orientation), le nombre de torsions des Câbles, la direction du vent, la vitesse du vent, la force et la fréquence des vibrations dans la Nacelle et les pales du rotor, l'épaisseur des garnitures des freins, si la porte de la tour est Ouverte ou fermée (système d'alerte), etc. [27], [29].

#### **I.6.6 Le système de refroidissement:**

Sur la plupart des éoliennes, on assure ce refroidissement en enrobant la génératrice Dans un conduit et en installant dans celui-ci un grand ventilateur qui refroidit l'air. Il y a

Cependant un petit nombre de constructeurs d'éoliennes qui à la place utilisent des Génératrices refroidies par eau. Ces génératrices peuvent être construites de façon plus Compacte ce qui comporte quelques avantages au niveau du rendement électrique, mais elles Requièrent en même temps l'installation d'un radiateur dans la nacelle afin de se débarrasser de La chaleur provenant du système de refroidissement par liquide.

## II.La modélisation:

L'éolienne capte l'énergie cinétique du vent et la convertit en un couple qui fait Tourner les pales du rotor. Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et L'énergie mécanique récupérée par le rotor: la densité de l'air, la surface balayée par le Rotor et la vitesse du vent. La densité de l'air et la vitesse du vent sont des paramètres Climatologiques qui dépendent du site .

L'évolution du coefficient de puissance est une donnée spécifique à chaque Éolienne. A partir de relevés réalisés sur une éolienne, l'expression du coefficient de Puissance a été approchée, pour ce type de turbine, par l'équation suivante :

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.22 \left( \frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{\lambda_i^{-21}} \quad (\text{III-1})$$

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

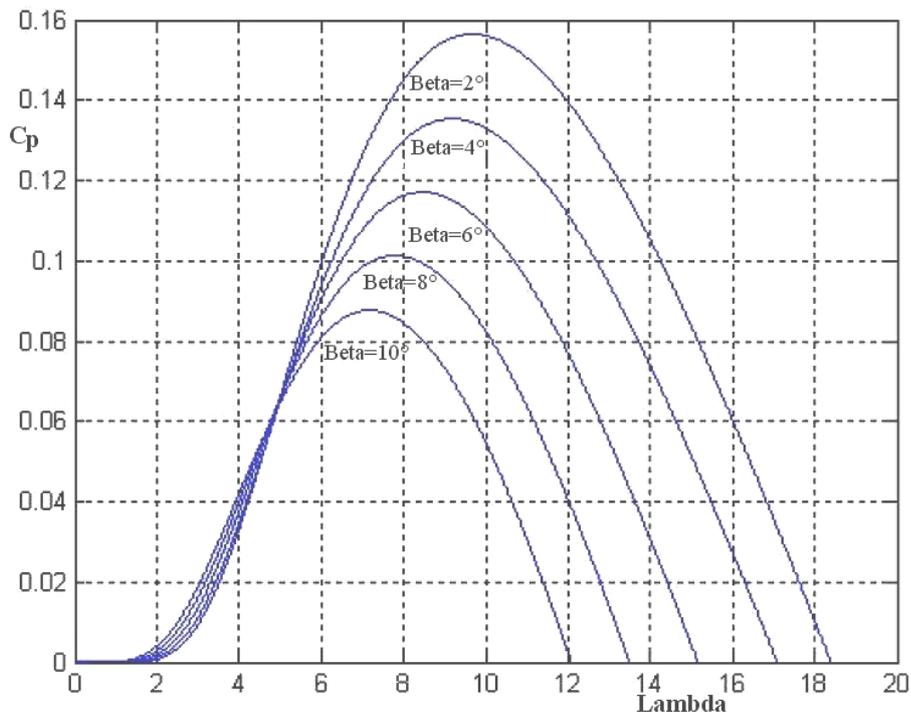


Figure III -6: Coefficient de puissance en fonction du ratio de vitesse ( $\lambda$ ) et de l'angle de calage ( $\beta$ )

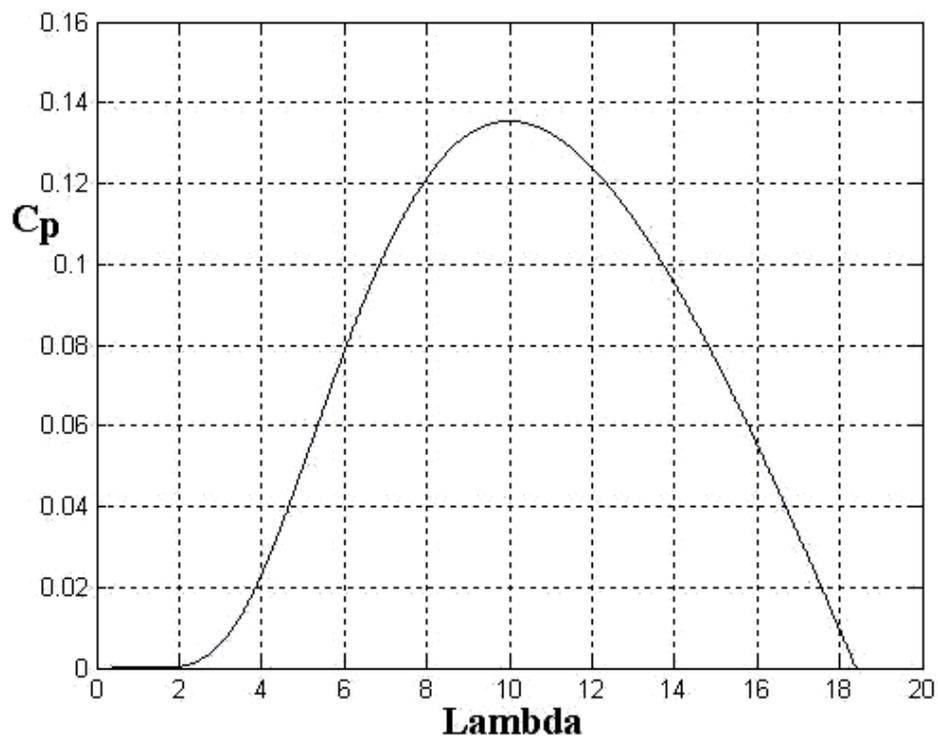


Figure III -7: Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine ( $\lambda$ )

La puissance mécanique récupérée par une turbine éolienne peut s'écrire sous la forme:

$$P_{aer} = C_p(\lambda, \beta) * \frac{\rho.S.V^3}{2} \quad (III-2)$$

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

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turbine}} = C_p * \frac{\rho.S.V^3}{2} * \frac{1}{\Omega_{turbine}} \quad (III-3)$$

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice (Figure III-8).

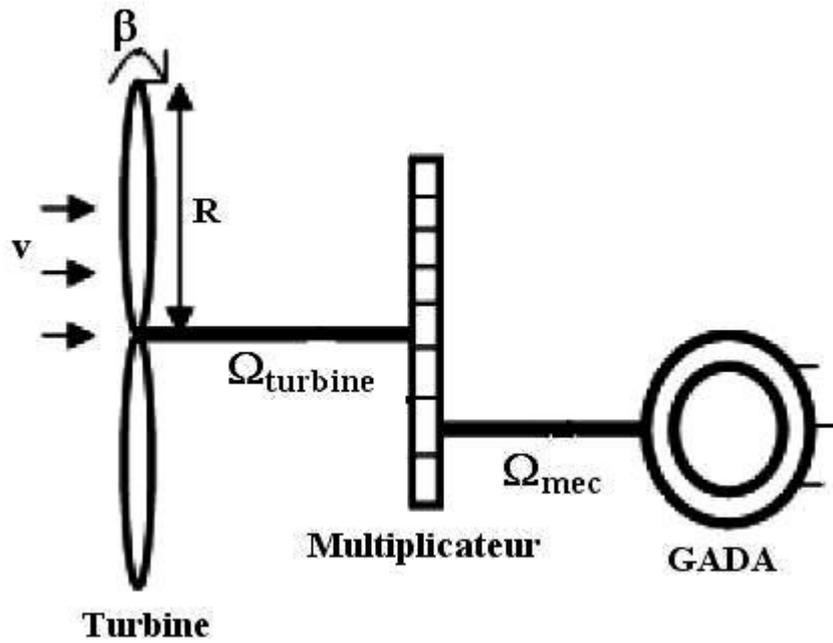


Figure III -8: Structure du système de conversion éolien

Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes:

$$C_r = \frac{C_{aer}}{G} \quad (\text{III-4})$$

$$\Omega_{\text{turbine}} = \frac{\Omega_{\text{mec}}}{G} \quad (\text{III-5})$$

Avec:  $G$  le gain du multiplicateur de vitesse

$$J = \frac{J_{\text{turbine}}}{G^2} + J_r \quad (\text{III-6})$$

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total ( $C_{\text{mec}}$ ) appliqué au rotor:

$$J * \frac{d\Omega_{\text{mec}}}{dt} = C_{\text{mec}} \quad (\text{III-7})$$

Où:  $J$  est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice. Ce couple mécanique prend en compte, le couple électromagnétique ( $C_{\text{em}}$ ) produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux ( $C_{\text{vis}}$ ), et le couple ( $C_r$ ).

$$C_{mec} = C_r - C_{em} - C_{vis} \quad (III-8)$$

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

$$C_{vis} = f * \Omega_{mec} \quad (III-9)$$

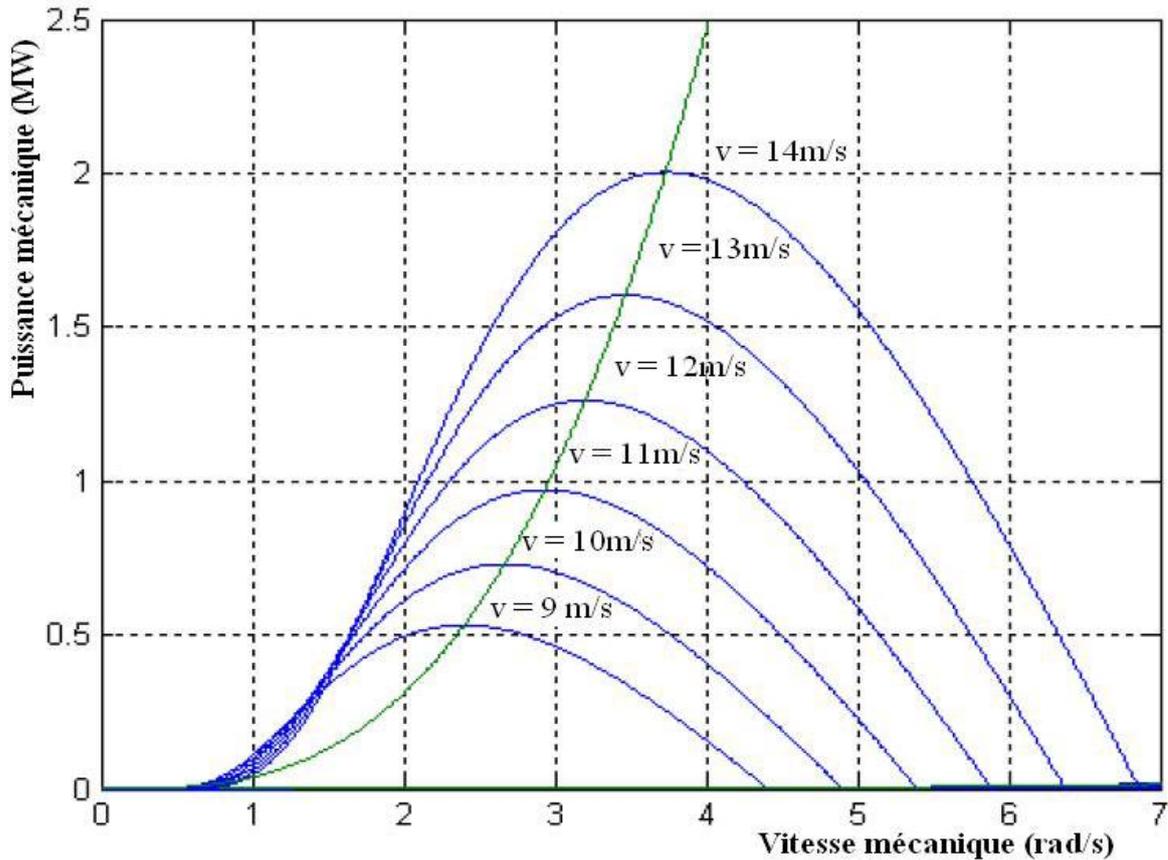


Figure III -9: Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donnée

La vitesse variable permet également d'améliorer la qualité de la puissance électrique produite, en introduisant de la souplesse dans la réaction du système face aux fluctuations brusques de la vitesse du vent.

L'inconvénient principal de ce genre de système est le surcoût introduit par l'incorporation des convertisseurs de puissance. Ce coût dépendant de la taille de ces convertisseurs, il devient relativement important pour les éoliennes de grande taille. De plus les performances des composants électroniques utilisés par ces convertisseurs tels que les transistors IGBT diminuent à partir d'une certaine puissance .

Au vu de la caractéristique suivante, il apparaît clairement que si l'éolienne et par conséquent la génératrice fonctionne à vitesse fixe, les maxima théoriques des courbes de puissance ne sont pas exploités.

### III. Simulation du système de l'éolienne à base de machine asynchrone double alimentation sous Matlab-Simulink:

Après validation du modèle de la machine asynchrone (modulisation) qui fait l'objet des modèles en mode générateur, un modèle d'éolienne à base de machine asynchrone est en effet mis au point et évalué sous Simulink, le couple exercé par le vent sur l'éolienne est également modélisé dans ce système.

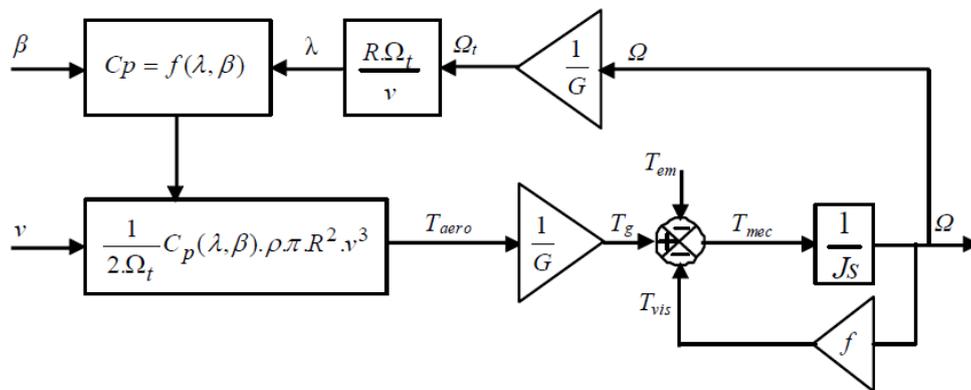


Figure III -10: schéma bloc du modèle de la turbine éolienne.

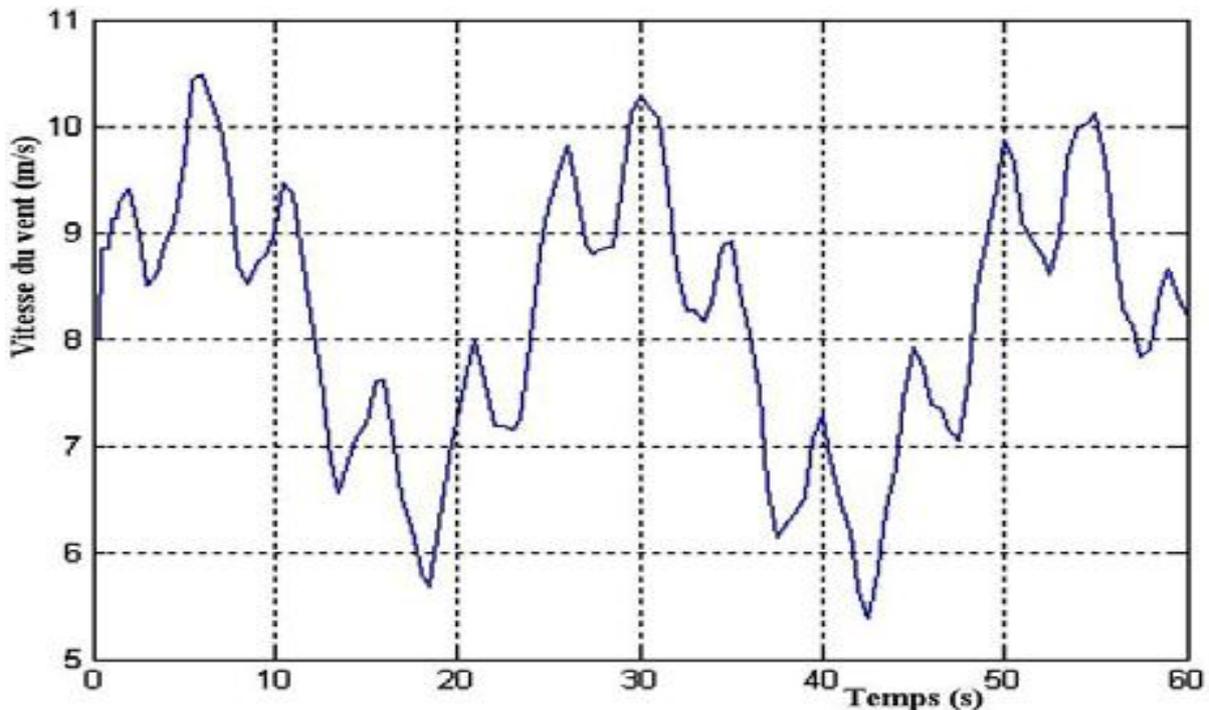


Figure III -11: Variation de la vitesse du vent (m/s)

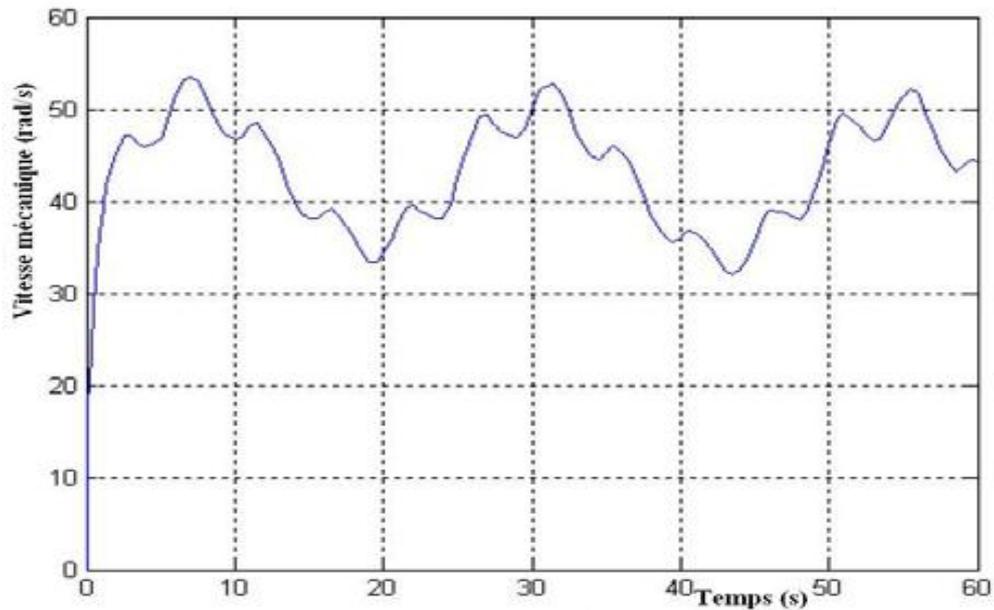


Figure III -12: Variation de la vitesse mécanique (rad/s)

A partir des équations précédentes (modulisation) ,le schéma bloc représentant le modèle de l'ensemble de la chaîne cinématique de la turbine et la machine asynchrone, tel que développé sous Matlab-Simulink est le suivant(Fig.III.13) :

Avec les paramètres suivent :

La puissance nominale:  $P_n=1.5$  Kw

La tension nominale:  $u_n=220/380$ V.

Le courant nominale :  $I_n=6.7/3.7$ A.

La vitesse de rotation nominale:  $N_n=1420$  tr/min.

La résistance rotorique :  $R_r=3.805\Omega$ .

La résistance statorique :  $R_s=4.85\Omega$ .

L'induction rotorique :  $L_r=0.274$  H.

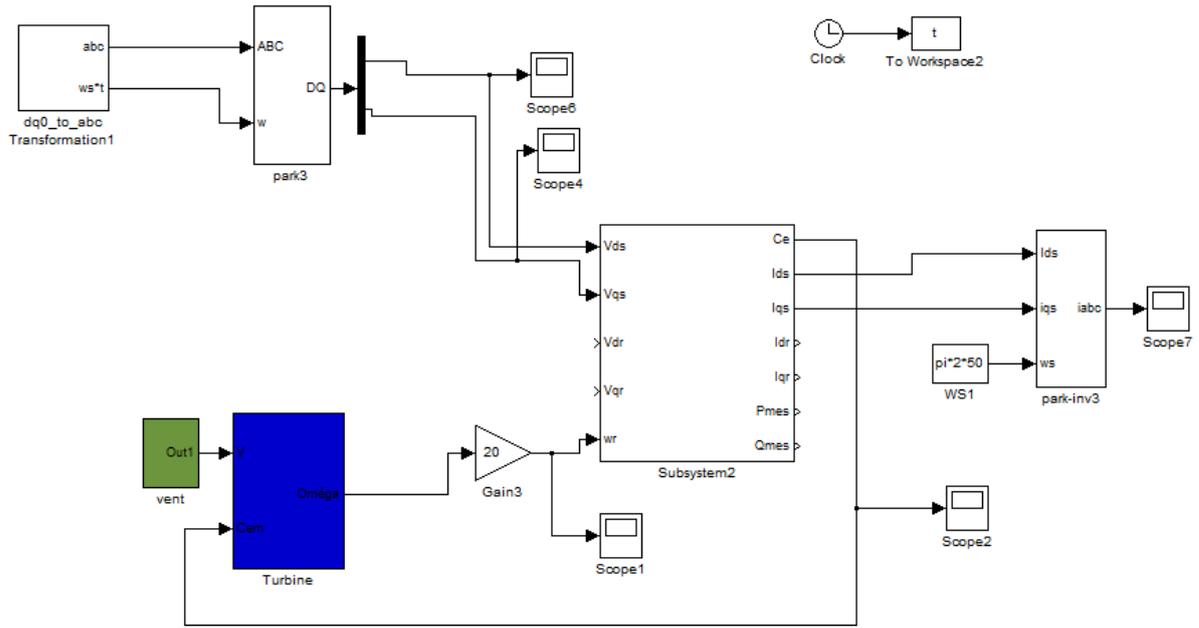
L'induction statorique :  $L_s=0.274$  H.

L'induction mutuelle :  $M=0.258$  H.

Moment d'inertie :  $J=0.031$  Kg.m<sup>2</sup>.

Coefficient de frottement :  $K\epsilon=0.001136$  Nm/rd/s.

Nombre de paires de poles:  $P=2$ .



(Fig.III.13) : Schéma de simulation développé sous Matlab-Simulink du système de l'éolienne composé la machine asynchrone .

Les courbes de simulation obtenues à l'aide du modèle de la Fig.III.13 sont présentées ci-dessous, il est préciser que nous avons du diminuer le pas de calcul pour minimiser le temps demandé par ces simulations.

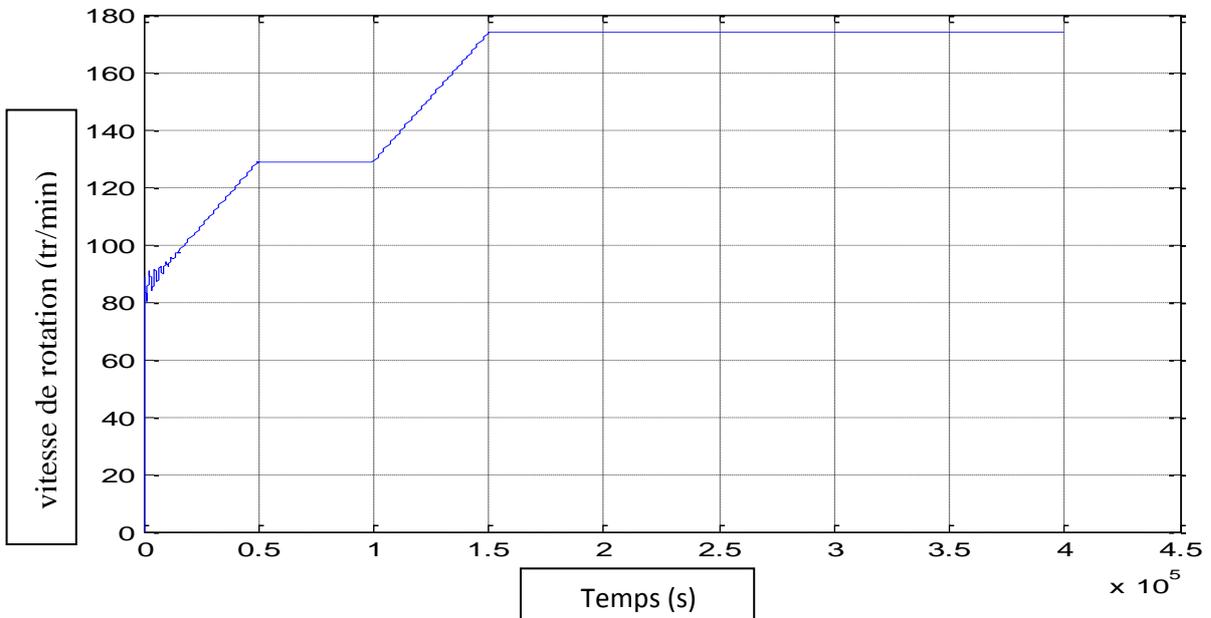


Fig.III.14:La vitesse de rotation en fonction de temps.

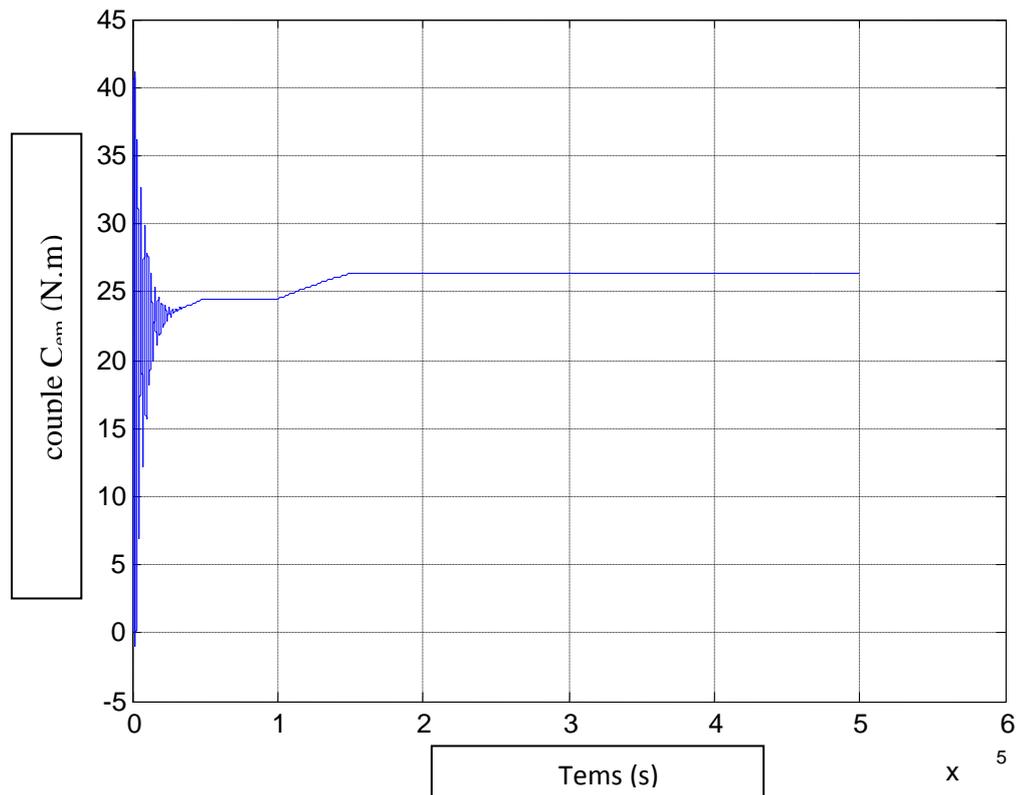


Fig.III.15:Schéma de couple électromagnétique  $C_{em}$  en fonction de temps.

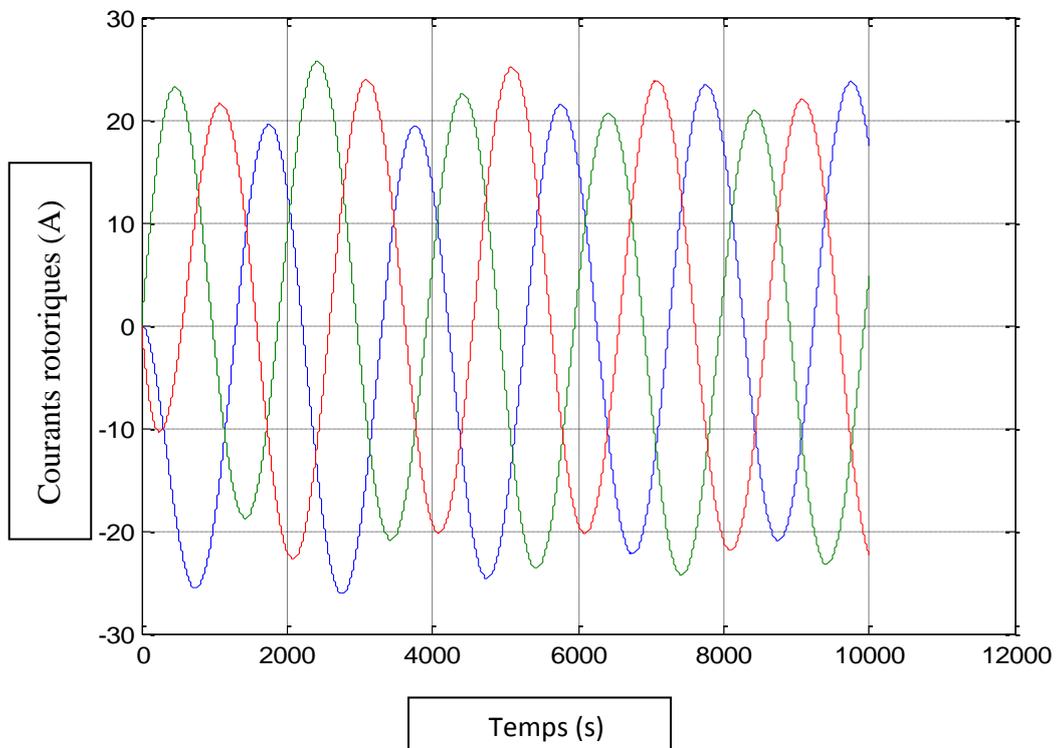


Fig.III.16:Schéma des courants rotoriques

**Interprétation des resultants:**

Nous avons appliqué à notre éolienne un profil de vent qui est présenté dans la figure (III -11).

Les courbes des caractéristiques mécaniques (coefficient de puissance  $C_p$ , couple de la turbine  $C_t$  et celle de la génératrice  $C_{em}$ ) sont présentés dans les figures (III-6,7,15). Nous avons ensuite présenté les courants du rotor dans la figure (III.16).

### **Conclusion:**

Dans ce chapitre nous avons donné une vue d'ensemble des différentes turbines éoliennes utilisées dans l'industrie moderne pour la production d'énergie électrique. Afin d'arriver à une meilleure compréhension du fonctionnement des turbines éoliennes, partant de la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique par la turbine, de façon explicite les différents éléments constitutifs de la turbine.

Enfin nous avons établi un modèle mathématique de la turbine à partir de ses équations Caractéristiques avec une simulation selon Matlabde la conversion de l'énergie mécanique de la turbine en énergie électrique, notamment les génératrices asynchrones à double alimentation.

### Liste des symboles :

S: Surface de la turbine

$\rho$ : Densité de l'air (kg/m<sup>3</sup>)

$\lambda$ : Vitesse spécifique

$C_p(\lambda, \beta)$  :Coefficient de puissance

v:Vitesse du vent (m/sec)

$P_{aer}$ :Puissance aérodynamique (W)

J: Inertie totale (kg m<sup>2</sup>)

$\Omega$ :Vitesse angulaire du rotor de l'éolienne (rad/s)

$\beta$ :L'inclinaison du capteur



**Conclusion  
générale**

## Conclusion générale

A la lumière de notre travail, nous avons pu aborder les différentes problématiques liées à l'utilisation des machines asynchrones en fonctionnement génératrice, notamment leurs adaptations dans un système éolien. Dans ce mémoire, notre étude s'est portée essentiellement sur la machine asynchrone double alimentation (MADA) entraînée par la turbine éolienne .

Nous avons abordés L'intérêt porté à la MADA ne cesse de croître pour diverses applications en tant que génératrice pour les énergies renouvelables ou en tant que moteur pour certains applications industrielles.

Le deuxième chapitre a été consacré à la modélisation de la machine asynchrone double alimentation en fonctionnement linéaire. Cette modélisation nous a permis de simuler son comportement en régime transitoire et en régime permanent de confronter les résultats à des validations expérimentales..

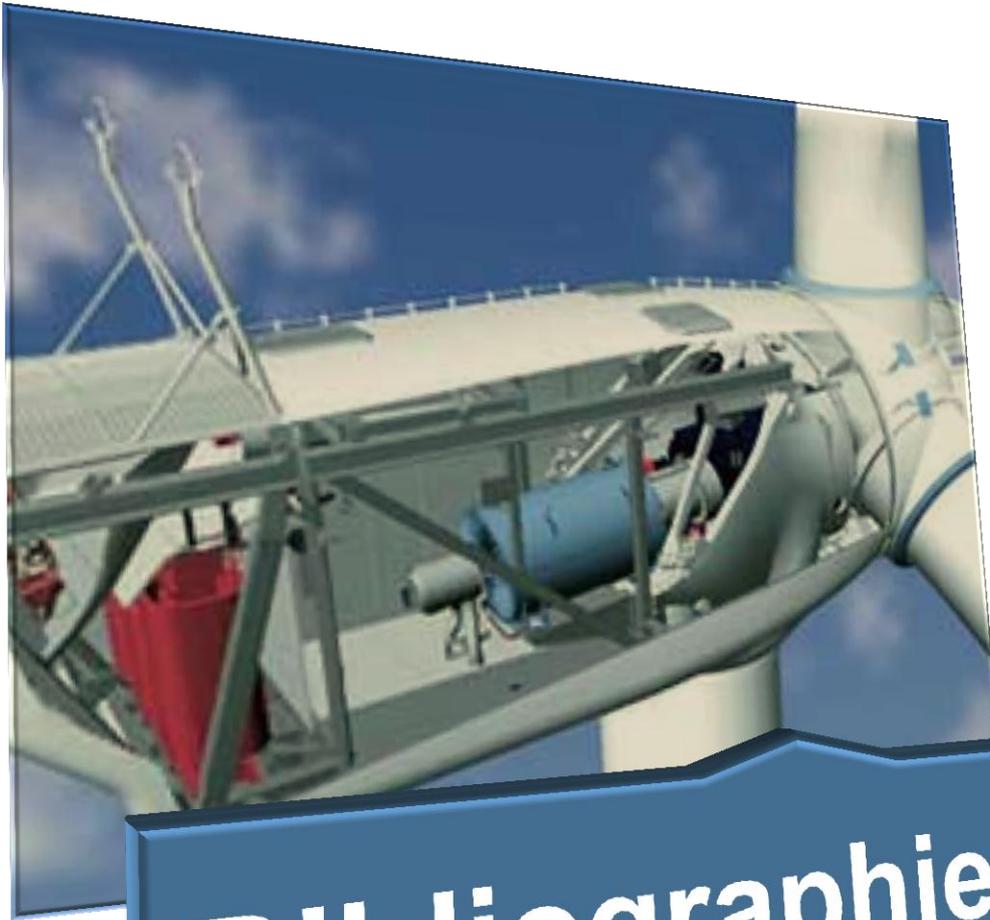
Dans la troisième partie nous avons étudié, la conception et la modélisation de la turbine éolienne car elle représente l'élément fondamental dans la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique. D'ailleurs, il vaudrait mieux parler de "centrale éolienne", c'est à dire de l'ensemble des composants qui nous permettent de produire de l'électricité, la "turbine" n'étant qu'une partie de cet ensemble.

Il est noté que l'utilisation de la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) dans les éoliennes connaît une évolution très rapide à cause de ses performances, et grâce aux progrès technologiques car elle apporte non seulement des solutions aux variations incessantes du vent, mais aussi permet un transfert optimale de la puissance au réseau.

Face à ces observations et aux résultats obtenus, des perspectives intéressantes pouvant contribuer à l'amélioration du fonctionnement du dispositif GADA – convertisseur sont envisageables :

- Etablissement d'un modèle de la MADA prenant notamment en compte de la saturation magnétique.
- Intégration éventuelle d'un système de stockage et optimisation technique et économique de la chaîne de conversion.

Tout cela demande autant d'études qui devraient apporter des solutions pour rendre encore plus facile l'insertion des éoliennes dans le réseau électrique afin de produire une énergie propre et durable.



# Bibliographie

## Bibliographie

- [1] Shridhar L., Singh Bhim, Jha C. S. (1993), A Step Towards in the Characteristic of self Excited Induction Generator, *IEEE Transaction of Energy Conversion*, Vol. 8, N. 1
- [2] Wang Li, Su Jian-Yi (1997), Effect of Lung-Shunt and Short-Shunt Connection on Voltage Variation of a Self-Excited Induction Generator, *IEEE Transaction of Energy Conversion*, Vol. 12, N. 4
- [3] BENOIT ROBYNS, BRUNO FRANÇOIS, PHILIPPE DEGOBERT, JEAN-PAUL HAUTIER (2007) *Commande vectorielle de la machine asynchrone : désensibilisation et optimisation par la logique floue*
- [4] Caron et Hautier, Caron, J. P. et Hautier, J.P. «Modélisation et commande de la machine asynchrone » 1995
- [5] Frédéric POITIERS, Etude et Commande de Génératrices Asynchrones pour l'utilisation de l'Energie Eolienne, Machine asynchrone à cage autonome ; Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau, Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, 2003
- [6] H. BÜHLER, Electronique de puissance, Traité d'électricité, d'électronique et d'électronique, vol XV, 2<sup>ème</sup> édition Georgi, 1981.
- [7] H. BÜHLER, Electronique de réglage et de Commande, Traité d'électricité, d'électronique et d'électronique, vol XVI, édition Georgi, 1979.
- [8] J. L DALMASSO, Electronique de puissance Commutation, édition Belin, 1986.
- [9] A. BOYETTE , Contrôle-Commande d'un Générateur Asynchrone à Double Alimentation avec un système de stockage pour la production Eolienne, Thèse de Doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy I, 2006.
- [10] Jean Chatelain, Machines électriques, Traité d'électricité, Vol X, Presse Polytechniques romandes, édition Georgi, 1983.
- [11] Frédéric POITIERS, Etude et Commande de Génératrices Asynchrones pour l'utilisation de l'Energie Eolienne, Machine asynchrone à cage autonome ; Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau, Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, 2003
- [12] D. Kairous, S. Mekhtoub, R. Ibtouen, O. Touhami, Modèle d'un générateur asynchrone auto-amorcé lors d'un retour réseau, *Algerian Journal of Technology*, P49-55, ENP, 2005.
- [13] Luc MUTREL, Régimes statique et dynamique des Machines Asynchrones, Technosup, édition Ellipses

- [14] H. BÜHLER, Electronique de puissance, Traité d'électricité, d'électronique et d'électronique, vol XV, 2<sup>ème</sup> édition Georgi, 1981.
- [15] H. BÜHLER, Electronique de réglage et de Commande, Traité d'électricité, d'électronique et d'électronique, vol XVI, édition Georgi, 1979.
- [16] J. L DALMASSO, Electronique de puissance Commutation, édition Belin, 1986.
- [17] Luigi Piegari', Member. IEEE, Renato Rizzo, Member, IEEE, Study of saturation phenomena on asynchronous generators used in wind farms, Electrical Engineering Department, University of Naples "Federico II", Via Claudio 21, Naples, Italy.
- [18] B. MULTON, X. ROBOAM, B. DAKYO, C. NICHITA, O. GERGAUD, H. BEN AHMED, Aérogénérateurs électriques, Techniques de l'Ingénieur, D3 960.
- [19] P. Leconte, M. Rapin, E. Szechenyi, "Eoliennes", Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie mécanique, pp. BM 4 640 1 - BM 4 640 21.
- [20] T. Khaldi, Retour réseau sur un autoamorçage accidentel de la machine asynchrone, thèse de Magister, ENP, Alger, 1999.
- [21] Matlab-Simulink, Version 7.0

**Sites internet :**

[www.retscreen.net](http://www.retscreen.net)  
[www.cler.org](http://www.cler.org)  
[www.wind-energie.de](http://www.wind-energie.de)  
[www.ewea.org](http://www.ewea.org)  
[www.awea.org](http://www.awea.org)  
[www.windpower.org/fr/core.htm](http://www.windpower.org/fr/core.htm)  
<http://electronique1.blogspot.com>