



Université ABBES LAGHROUR Khenchela  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Industriel  
جامعة عباس لغرور  
خنشلة كلية العلوم  
والتكنولوجيا قسم الهندسة  
الصناعية



## Mémoire de fin d'étude

*Pour l'obtention du diplôme de Master*

**Filière : Electrotechnique**

**Spécialité : commande électrique**

### THEME

***Thème : Amélioration des  
performances d'un système alimenté  
par une turbine éolienne***

**Réalisé par :**

**- Adami Brahim**

**Soutenu le 18/06/2023 Devant le jury composé de :**

**Mr. Mokhtari Khalil**

**Mr. Menadi Abdelkrim**

**M<sup>me</sup>. Bessam Bessma**

**Président**

**Encadrant**

**Examineur**

**Université Abbes Laghrour-Khenchela**

**Université Abbes Laghrour-Khenchela**

**Université Abbes Laghrour-Khenchela**

*Promotion 2022/2023*

## Table des matières

<b>Introduction générale</b> .....	15
<b>Chapitre 01 : Généralité sur les Systèmes de Conversion D'énergie Eolienne</b> .....	4
<b>I. Introduction</b> :.....	5
<b>II. Définition de l'énergie éolienne</b> :.....	6
<b>III. Etat de l'art et situation de l'énergie l'éolienne dans le monde</b> : .....	6
<b>III-1 Historique de l'énergie éolienne</b> : .....	6
<b>IV. Etat de l'art sur la machine utilisée dans système de conversion éolienne</b> : .....	9
<b>IV-1 Systèmes utilisant la machine asynchrone</b> :.....	9
<b>IV-2 Systèmes utilisant la machine synchrone</b> :.....	16
<b>V. Description et types des machines synchrones à aimants permanents</b> : .....	18
<b>VI. Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne</b> : .....	21
<b>VII. Les types de turbine éolienne</b> : .....	22
<b>VII-1 Eoliennes à axe horizontal</b> : .....	22
.....	23
<b>VII-2 L'éolienne a axe verticale</b> :.....	26
<b>VIII. Les convertisseurs de puissance</b> : .....	30
<b>IX. Conclusion</b> :.....	31
Chapitre 02 :Modélisation d'un système éolienne .....	32
<b>I. Introduction</b> :.....	33
<b>II. Modélisation du vent</b> :.....	33
<b>III. Conversion de l'énergie éolienne</b> : .....	34
<b>III.1 Loi de Betz</b> : .....	34
<b>IV. Modélisation de la turbine éolienne</b> :.....	35
<b>IV.1 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine</b> :...	35
<b>V. Modèle de la machine synchrone à aimants permanents</b> : .....	41
<b>V.1 Matériaux pour aimants</b> :.....	42

<b>V.2 Présentation de la machine synchrone à aimants permanents :</b>	43
<b>VI. Les avantages et les inconvénients de MSAP :</b>	44
<b>VII. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents :</b>	45
<b>VII.1 Les hypothèses simplificatrices :</b>	45
<b>VII.2 Equations électriques et magnétiques de la machine :</b>	46
<b>VII.3 Transformation de PARK :</b>	47
<b>VIII. Modélisation de la MSAP dans le repère de d, q :</b>	48
<b>VIII.1 Transformation de Park :</b>	48
<b>VIII.2 Circuit équivalent de la MSAP :</b>	50
<b>IX. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents en convection génératrice :</b>	51
<b>IX.1 Modélisation à vide de la GSAP :</b>	51
<b>IX.2 Modélisation en charge de la GSAP :</b>	51
<b>X. La commande MLI :</b>	52
<b>XI. Modèle du redresseur MLI :</b>	52
<b>XII. Modélisation de l'onduleur :</b>	54
<b>XIII. CONCLUSION :</b>	56
<b>Chapitre 03 :Simulation de la chaine de conversion éolienne</b>	57
<b>I. Introduction :</b>	58
<b>II. Chaine éolienne :</b>	58
<b>III. Synthèse des Contrôleurs PI du convertisseur de puissance :</b>	58
<b>III.1 Régulation du courant :</b>	59
<b>III.2 Régulation de tension <math>V_{dc}</math> :</b>	60
<b>IV. Modèle mathématique de turbine :</b>	61
<b>V. Schéma bloc de simulation :</b>	62
<b>IV.1 Paramétré :</b>	63
<b>VI. Résultats de la simulation :</b>	63

<b>VII. Conclusion :</b> .....	73
<b>CONCLUSION GENERALE</b> .....	74
<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	78

## *Remerciement*

*Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné le courage durant ces longues années d'étude, la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.*

*Nous tenons à remercier sincèrement notre encadreur Mr : Menadi Abdelkrim, pour ces précieux conseils, orientation, confiance et patience qui ont constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être mené au bon port.*

*Qu'il trouve dans ce travail un hommage vivant à sa haute personnalité. Ces remerciements vont tout d'abord au corps professoral et administratif de la Faculté des Science et Technologie, ensuite à tous les professeurs qui nous ont enseigné et qui par leurs compétences nous ont soutenu dans la poursuite de nos études.*

*Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche.*

*Nous remercions de tous nos cœurs nos parents, pour nous avoir toujours soutenu et cru en nous.*

*A nos familles et nos amis qui par leurs prières et leurs encouragements, on a pu surmonter tous les obstacles.*

*Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

*Merci à tous et à toute*

## *Je dédie ce travail :*

*Je Dédie Ce Modeste Travail A Tout Ce Que Je Possède De Plus*

*Cher Au Monde : A Mes Chers Parents : Mon PÈRE Qui Ne  
Cesse Pas De M'encourager Et Qui M'à Toujours Soutenu, Ma*

*Jolie MÈRE Qui Est Tout Pour Moi, Pour Sa Profonde*

*Tendresse « Que Dieux Me Les Protège ».*

*A Mes mon Frère AHMED Et chères Sœurs*

*A Mes Meilleurs Amies : Abd nour, hamid, younes, taha,*

*achref.....*

*Et enfin tous ceux qui m'ont aidé et soutenu de près ou de loin*

*durant l'élaboration de ce travail.*

**ADAMI BRAHIM**

# Liste des figures

## *Liste des figures*

<b>Fig I.1</b> : champ d'énergie éolienne.....	5
<b>Fig I.2</b> : Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	6
<b>Fig I.3</b> : Roue hydraulique à axe vertical. ....	6
<b>Fig I.4</b> : Moulin à vent, Baexem, Hollande.....	7
<b>Fig I.5</b> : La capacité installée cumulée des parcs éoliens terrestres entre 2001 et 2030.....	8
<b>Fig I.6</b> : Schématisation d'une machine asynchrone à cage à écureuil.....	10
<b>Fig I.7</b> : Caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à 2 paires de pôles.....	10
<b>Fig I.8</b> : Schéma de principe d'un entraînement à vitesse fixe.....	11
<b>Fig I.9</b> : Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA.....	12
<b>Fig I.10</b> : Schéma de principe de la machine à double alimentation à rotor bobiné.....	13
<b>Fig I.11</b> : Machine asynchrone brushless connectée sur le réseau.....	14
<b>Fig I.12</b> : MADA, structure Kramer.....	14
<b>Fig I.13</b> : MADA avec contrôle du glissement par l'énergie.....	15
<b>Fig I.14</b> : Structure de Sacheries avec cyclo convertisseur.....	15
<b>Fig I.15</b> : structure de Scherbius avec convertisseurs MLI.....	16
<b>Fig I.16</b> : schéma fonctionnel du générateur synchrone à rotor bobiné.....	17
<b>Fig I.17</b> : Schéma de principe du GSAP.....	18
<b>Fig I.18</b> : Machine synchrone à aimants permanents montés en surface.....	19
<b>Fig I.19</b> : Machine synchrone à aimants permanents insérés.....	20
<b>Fig I.20</b> : Machine synchrone à aimants permanents chapeautés.....	20
<b>Fig I.21</b> : Machine synchrone à aimants enterrés : (a) avec concentration de flux, (b) structure classique.....	21
<b>Fig I.22</b> : Une configuration typique et les principaux composants d'un système d'éolienne à axe horizontal.....	23
<b>Fig I.23</b> : composants principaux d'une éolienne à axe horizontal.....	24
<b>Fig I.24</b> : interconnexion d'une éolienne à un système électrique via un transformateur.....	25
<b>Fig I.25</b> : Éoliennes à axe vertical (VAWT).....	28
<b>Fig I.26</b> : classification des convertisseurs statiques pour entraînements électriques.....	30
<b>Fig. II.1</b> : Tube de courant autour d'une éolienne.....	34
<b>Fig. II.2</b> : Modèle simplifié de la turbine éolienne.....	36
<b>Fig. II.3</b> : Schéma de la turbine éolienne.....	36
<b>Fig. II.4</b> : Coefficient de puissance en fonction de lambda (avec $\beta=0^0$ ).....	38

# Liste des figures

<b>Fig. II.5</b> : $C_p$ en fonction de $\lambda$ (avec différentes valeurs de $\beta$ ).....	38
<b>Fig. II.6</b> : Schéma du système éolien.....	39
<b>Fig. II.7</b> : .....	40
<b>Fig. II.8</b> : Schéma bloc du modèle de la turbine.....	41
<b>Fig. II.9</b> : Circuit magnétique associé à un aimant.....	42
<b>Fig. II.10</b> : Cycle d'hystérésis.....	43
<b>Fig. II.11</b> : Construction mécanique de la machine synchrone à aimants permanents MSAP.....	44
<b>Fig. II.12</b> : Représentation symbolique de la machine synchrone.....	46
<b>Fig. II.13</b> : Représentation de la MSAP dans le repère (d, q) de Park.....	49
<b>Fig. II.14</b> : Schéma de circuits électriques équivalents de la MSAP.....	50
<b>Fig. II.15</b> : Schéma de l'association MSAP – Redresseur MLI.....	54
<b>Fig. II.16</b> : Schéma de l'onduleur triphasé deux niveaux.....	56
<b>Fig III.1</b> : schéma de chaîne de conversion.....	58
<b>Fig III.2</b> : schéma a bloc du correcteur PI.....	58
<b>Fig III.3</b> : Boucle de régulation du courant $i_d$ .....	59
<b>Fig III.4</b> : Boucle de régulation de la tension $V_{dc}$ .....	60
<b>Fig III.5</b> : Modèle mathématique turbine.....	61
<b>Fig III.6</b> : model Simulink de la chaîne de conversion.....	62
<b>Fig III.7</b> : vitesse de la turbine (constante) (rad /s).....	64
<b>Fig III.8</b> : Allure de la couple électromagnétique.....	64
<b>Fig III.9</b> : Allure de la tension redresseur.....	65
<b>Fig III.10</b> : Allure de tensions de l'onduleur.....	65
<b>Fig III.11</b> : Zoom de l'Allure de tensions de l'onduleur.....	66
<b>Fig III.12</b> : Allure de courant de l'onduleur.....	66
<b>Fig III.13</b> : Zoom de l'Allure de tensions de l'onduleur.....	66
<b>Fig III.14</b> : Allure de tensions de d'alimentation.....	67
<b>Fig III.15</b> : Zoom d'Allure de tensions de d'alimentation.....	67
<b>Fig III.16</b> : Allure de courant de stators.....	67
<b>Fig III.17</b> : vitesse de la turbine (rad /s).....	69
<b>Fig III.18</b> : Allure de la couple électromagnétique.....	69
<b>Fig III.19</b> : Allure de la tension redresseur.....	70
<b>Fig III.20</b> : Allure de la tension issue de l'onduleur.....	70
<b>Fig III.21</b> : zoom d'Allure de la tension issue de l'onduleur.....	70
<b>Fig III.22</b> : Allure de la courante issue de l'onduleur.....	71

## Liste des figures

<b>Fig III.23</b> : Zoom d'Allure de la courante issue de l'onduleur.....	71
<b>Fig III.24</b> : Allure de tensions d'alimentation.....	71
<b>Fig III.25</b> : Zoom d'Allure de tensions d'alimentation.....	72
<b>Fig III.26</b> : Allure de courant de stators.....	72

# Liste des tableaux

## *Liste des tableaux*

**Tableau II.1** : coefficients liés aux caractéristiques de la turbine.

**Tableau III.1** : parametre de vitesse de rotation de la machine constant..

**Tableau III.2** : parametre de vitesse de rotation de la machine variable.

# Index des notions

## *Index des notions*

### 1. Notions utilisées dans le chapitre I :

- MADA : Machine asynchrone à double alimentation.  
GSAP : Générateur Synchrone à Aimants Permanents.  
MLI : Modulation de largeur d'Impulsion  
P : nombre de pôle.  
F : fréquence.  
AC : Courant alternatif.  
DC : Courant continue.  
VAWT : Vertical Axis Wind Turbine.  
HAWT : Horizontal Axis Wind Turbine.

### 2. Notions utilisées dans le chapitre II :

- V : vitesse.  
 $V_m$  : Valeur moyenne de la vitesse du vent.  
K : le Rang du dernier harmonique retenu dans le calcul du profil du vent.  
 $a_n$  : Amplitude de l'harmonique de l'ordre.  
 $\omega_n$  : Pulsation de l'harmonique de l'ordre.  
E : l'énergie cinétique.  
M : la masse.  
 $\rho$  : est la densité de l'air, égale à 1,225 kg/m<sup>3</sup>.  
 $V_v$  : est la vitesse du vent en m/s.  
S : La surface utile traversée par le vent a pour expression.  
P<sub>v</sub> : puissance délivrée par le vent.  
P<sub>eol</sub> : Puissance développée par la turbine de l'éolienne  
C<sub>p</sub> : Coefficient de puissance  
 $\lambda$  : Rapport de vitesse (vitesse de l'extrémité des pales sur la vitesse du vent).  
 $\Omega_l$  : vitesse de rotation avant le multiplicateur.  
R : rayon des pales de l'aérogénérateur.  
 $\eta$  : rendement aérodynamique de la turbine.  
C<sub>aer</sub> : Couple de l'aérogénérateur.  
 $\Omega_{tur}$  : Vitesse de la turbine.  
J<sub>tur</sub> : Moment d'inertie de la turbine.  
C<sub>g</sub> : Couple de l'aérogénérateur appliqué sur le générateur.

# Index des notions

- $\Omega_g$  : Vitesse appliquée sur le générateur.
- $J_g$  : moment d'inertie du générateur.
- $f$  : Coefficient de frottement visqueux.
- $C_1$  : sont des coefficients liés aux caractéristiques de la turbine.
- $\Omega_{mec}$  : est la vitesse angulaire de rotation de la génératrice (rad /s) ou (tr/mn).
- $G$  : rapport de multiplication.
- $C_{mec}$  : Couple mécanique sur l'axe du générateur en (N. m).
- $H_m$  : champ maximal.
- $H_c$  : champ coercitif.
- $B_r$  : rémanente intuction.
- $e_a$  : la longueur de l'aimant.
- $e$  : la largeur de l'entrefer.
- $H$  : l'excitation magnétique dans l'aimant.
- $H_e$  : l'excitation magnétique dans l'entrefer.
- $S_a, S_e$  : sont les sections de l'aimant et l'entrefer.
- $B$  : L'induction magnétique de l'aimant.
- $B_e$  : L'induction magnétique de l'entrefer, donné par :
- $\mu_0$  : est la perméabilité relative de l'entrefer.
- $[V_a, V_b, V_c]$  : Les tensions des phases statorique.
- $[I_a, I_b, I_c]$  : Les courants des phases statorique.
- $[\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c]$  : Les flux totaux à travers les bobines statorique.
- $i_d i_q$  : Courants statorique de le repère de Park [A].
- $V_q$  : Tensions statorique de le repère de Park [V].
- $V_d R_s$  : Résistance statorique [ $\Omega$ ].
- $L_d$  : Inductance cyclique statorique [H].
- $P$  : Nombre de pair de pôles de la machine synchrone.
- $\omega$  : Pulsation des tensions [rad/s].
- $[(P)]$  : Matrice de Park.
- $[(P)]^{-1}$  : Matrice inverse de Park.

# Index des notions

## 3. Notions utilisées dans le chapitre III :

- $d, q$  : Composante de Park directe et quadrature.
- $V_d, V_q$  : Tensions statorique dans de repère de Park.
- $I_d, I_q$  : Courants statorique dans le repère de Park.
- $K_p$  : Coefficient proportionnel du régulateur PI.
- $K_i$  : Coefficient intégral du régulateur PI.
- $\tau$  : Constante de temps électrique.

# Résumé

## Résumé :

Dans cet article, nous étudions la modélisation et la commande d'une machine synchrone à aimants permanents associée à une chaîne de conversion d'énergie éolienne de petite taille en site isolé. Le système proposé débite à travers un redresseur MLI commandé en sortie continue par un commande MLI afin d'obtenir un rendement énergétique maximal. Les résultats des différentes simulations de toute la chaîne de conversion, réalisées sous environnement MATLAB/Simulink, ont permis d'évaluer les performances du système proposé.

# Résumé

## **Abstract :**

In this paper, we study the modeling and the control of a synchronous permanent magnet machine associated to a chain of wind energy conversion of small size in isolated site. The proposed system outputs through a PWM rectifier checked up at continuous output by PWM command in order to obtain a maximum energetic efficiency. The results of various simulations of all the chain of conversion, carried out under MATLAB/Simulink software, made it possible to evaluate the performances of the proposed system.

*Introduction  
générale*

# Introduction générale

Après le début de la baisse du pourcentage de pétrole, les énergies renouvelables, qui se caractérisent par leurs réserves inépuisables, ont commencé à être utilisées en continu. Il est propre et a un impact minimal sur l'environnement, d'où son succès. Croissance de l'opinion publique auprès des investisseurs et des pouvoirs publics. Parmi ces énergies figurent le solaire, l'éolien et...

La production d'électricité à partir de l'énergie éolienne est l'une des méthodes qui connaît la croissance la plus rapide dans le monde. L'énergie cinétique de l'air en mouvement est transformée en électricité par des éoliennes qui sont installées à des endroits où les conditions météorologiques sont les plus propices. Les éoliennes peuvent être utilisées individuellement, mais elles sont souvent regroupées pour former des parcs éoliens ou des centrales éoliennes. L'électricité produite à partir des parcs éoliens peut servir à répondre à des besoins locaux ou à alimenter un réseau de distribution d'électricité desservant des résidences et des commerces qui sont plus éloignés. L'utilisation de cette forme d'énergie permet de réduire les effets de la production d'électricité sur l'environnement car elle nécessite aucun combustible et ne produit aucun polluant ni gaz à effet de serre.

Elle repose principalement sur des éoliennes à vitesse fixe et variable. Les éoliennes à vitesse fixe sont limitées car l'énergie éolienne n'est pas pleinement exploitée. Bien que les éoliennes à vitesse variable présentent de nombreux avantages, outre le fonctionnement au point de puissance maximale (PPM) sur une large plage de vitesses de vent. En effet, elles présentent une réduction des contraintes mécaniques et une puissance de sortie supérieure par rapport au fonctionnement à vitesses fixes. Différents types de génératrices peuvent être utilisés pour convertir l'énergie mécanique produite par le mouvement de l'arbre éolien en énergie électrique, les génératrices synchrones à aimants permanents, avec différents structures, ont pris de plus en plus la prédominance sur les autres machines électriques. Ce développement s'explique par la caractéristique d'auto excitation des aimants permanents qui leur permet de fonctionner avec un facteur de puissance élevé et un bon rendement, qui les rend intéressante dans l'application de conversion d'énergie éolienne. Ce type de machine permet d'extraire un maximum d'énergie en réduisant les contraintes mécaniques, cela par élimination du multiplicateur de vitesse, ce qui améliore la fiabilité du système et la réduction des frais d'entretien. En outre, la machine synchrone à aimant permanent (MSAP) à entraînement direct convient aux applications d'éoliennes en raison de sa puissance, de son couple élevé et donc de son rendement élevé. Si dans le cas où le système éolien fonctionne à basse vitesse, le multiplicateur peut être omis. Ainsi, une construction sans engrenage représente une solution efficace et robuste qui devrait être bénéfique, en particulier pour les applications offshore, où des exigences de maintenance

# Introduction générale

réduites sont préférables, voire nécessaires. De plus, en utilisant la MSAP, le système d'excitation à courant continu est éliminé et permet de réduire le poids, les pertes, les coûts et les besoins de maintenance. Il faut aussi mentionner qu'en raison de l'intensification des codes de réseau dans le monde, les concepts d'éoliennes basées sur la MSAP.

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à l'étude d'une chaîne complète de conversion d'énergie éolienne basée sur une machine synchrone à aimants permanents, nous nous avons également étudié des stratégies de commande permettant l'optimisation de l'énergie extraite par la turbine ainsi que des contrôleurs permettant de commander la puissance électrique fournie au réseau.

Nous allons commencer par une introduction générale, présentant les intérêts socioéconomique et scientifiques, par la suite nous allons entamer ce travail qui traitera des généralités sur l'énergie éolienne, à commencer par les différents types d'éoliennes existant. Puis nous allons parler de conversion d'énergie éolienne en énergie électrique suivi des lois et contraintes mécaniques associées à la conversion de cette énergie, enchaînées avec le mode et les différents systèmes utilisés pour l'exploitation.

Dans le chapitre deux, nous allons commencer par la modélisation du vent. ce qui nous permettra d'identifier le profil du vent qui sera utilisé dans le reste du travail. Nous allons ensuite modéliser la turbine éolienne sur laquelle se base notre étude. Cette modélisation va permettre de commander la turbine de sorte à ce que le coefficient de puissance soit toujours optimal quelques soient les variations du vent.

Nous avons développé un modèle de la machine synchrone à aimants permanents, en présentant le modèle mathématique de la machine synchrone à aimants permanents (MSAP), la conversion des équations dans le référentiel de Park afin d'arriver à sa commande vectorielle. Qui sera suivi par la commande vectorielle de la puissance active et réactive de la machine synchrone à aimants permanents qui est entraînée par la turbine éolienne.

Et à la fin du chapitre, nous avons étudié les convertisseurs d'énergie redresseur MLI et l'onduleur et principe de modélisée.

Le troisième chapitre est consacré à la commande MLI, c'est une méthode qui se ramène à une structure de commande linéaire, permettant un découplage entre les variables de commande, reste la plus utilisée vue les performances dynamiques élevées qu'elle offre pour une large gamme d'applications. et la régulateur PI, et étudier la commande MLI de la turbine. Les conditions de travail étant variables, le rôle de cet étage d'adaptation consiste à poursuivre le point de puissance maximale qui se trouve à son tour variable et stable.

## **Introduction générale**

Enfin nous allons ensuite modéliser la turbine éolienne sur laquelle se base notre étude. Cette modélisation va permettre de commander la turbine de sorte à ce que le coefficient de puissance soit toujours optimal quelques soient les variations du vent suivi de quelques résultats de simulation. Ce dernier a été mis en œuvre à l'aide du logiciel "MATLAB".

*Chapitre 01 :*  
*Généralité sur les*  
*Systemes de*  
*Conversion*  
*D'énergie Eolienne*

# Chapitre 1 : Généralité sur les Systèmes de Conversion D'énergie Eolienne

## I. Introduction :

Une éolienne est une installation qui convertit la puissance du vent en énergie électrique, donc le maximum d'énergie émis ne dépend pas seulement de la machine mais aussi des limites de la vitesse du vent. Les éoliennes convertissent l'énergie du vent en énergie électrique. D'autre part, elles convertissent l'énergie éolienne en énergie mécanique .L'électricité produite par les éoliennes est utilisée pour les circuits de charge de batterie, les systèmes de production d'énergie résidentiels, les systèmes de production distribuée, et les grands réseaux de services publics. Les différents éléments des éoliennes sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique ; d'une manière générale, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est indispensable. [1]

L'énergie éolienne est la deuxième plus grande source de production mondiale d'énergie renouvelable, dépassée uniquement par l'énergie hydroélectrique. L'énergie éolienne est aujourd'hui la première source d'électricité renouvelable aux États-Unis. 2021 a été une année record pour les nouvelles installations éoliennes en Europe, avec davantage de parcs éoliens destinés à la construction en 2022. Environ 13 % de l'électricité chinoise est désormais produite par des parcs éoliens. L'énergie éolienne est également en hausse dans des pays tels que le Brésil, l'Inde, l'Indonésie, le Japon, la Corée du Sud, la Russie, le Royaume-Uni et l'Australie [2].

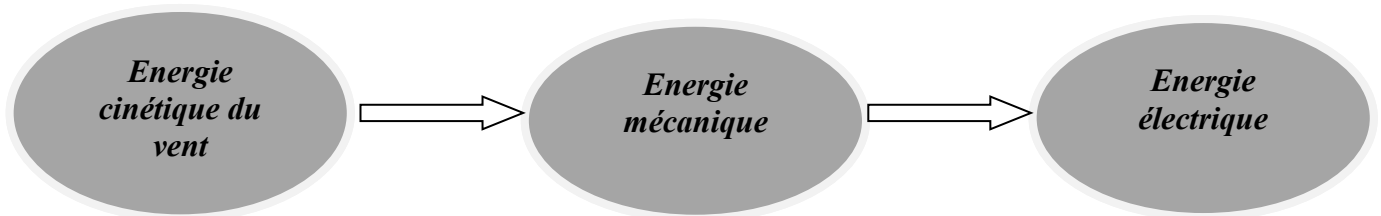


**Fig I.1** : champ d'énergie éolienne.

# Chapitre 1 : Généralité sur les Systèmes de Conversion D'énergie Eolienne

## II. Définition de l'énergie éolienne :

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 [3].



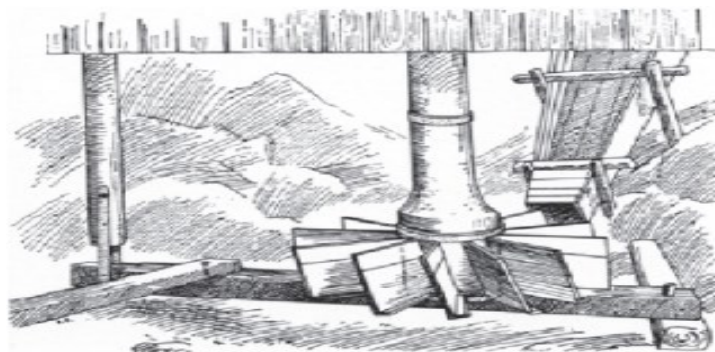
**Fig I.2 :** Conversion de l'énergie cinétique du vent.

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences. [4]

## III. Etat de l'art et situation de l'énergie l'éolienne dans le monde :

### III-1 Historique de l'énergie éolienne :

Les sources d'énergie étaient inconnues ou rares, l'énergie éolienne représente un moyen efficace de Développement industriel et économique. Le vent est le mouvement d'une masse d'air, soufflant à travers la Terre des zones de haute pression vers les zones de basse pression, et apportant avec lui une quantité inépuisable de force motrice naturelle. L'humanité a exploité l'énergie éolienne il y a 5 000 ans, avec des applications précoces telles que le pompage de l'eau et le broyage du grain. Les techniques de construction de cette époque découvertes au Moyen-Orient reposaient principalement sur l'utilisation d'axes verticaux pour extraire la force de traînée du vent.



**Fig I. 3 :** Roue hydraulique à axe vertical.

## Chapitre 1 : Généralité sur les Systèmes de Conversion D'énergie Eolienne

Les premières utilisations de l'énergie éolienne en Europe remontent à 1191, lorsque des pays dotés de riches ressources éoliennes, tels que les Pays-Bas et l'Angleterre, ont construit des moulins à vent à axe horizontal.

Le développement des éoliennes à rotor de forme aérodynamique les pales pour la production d'électricité n'ont commencé qu'il y a environ 80 ans, y compris des projets d'ingénieurs allemands (Kleinhenz et Honnef), et par le L'américain Palmer Putnam (pour la société Smith) dans les années 1940 qui produit une turbine de 1250 kW. Les machines éoliennes ont été produites en série au début des années 1950, principalement par l'entreprise de construction allemande Allgaier, pour fournir de l'électricité aux exploitations agricoles éloignées du réseau public. Cependant, il s'agissait de générateurs à petite échelle d'une puissance nominale de 6 kW à 10kW. Les grandes éoliennes de la classe des mégawatts ne sont réapparues qu'au années 1970 en raison de la hausse des prix du carburant. Particulièrement aux États-Unis, en Suède et Allemagne, des machines mégawatts ont été produites comme le MOD-2 américain avec une puissance nominale de 2,5 MW et un diamètre de rotor de 91 m, le modèle AEOLUS 4 MW suédois américain de 61 m, le modèle AEOLUS suédois 3 MW WTS-75 et le GROWIAN allemand de 3 MW avec un diamètre de rotor de 100 m et un moyeu de 100 m hauteur[5].



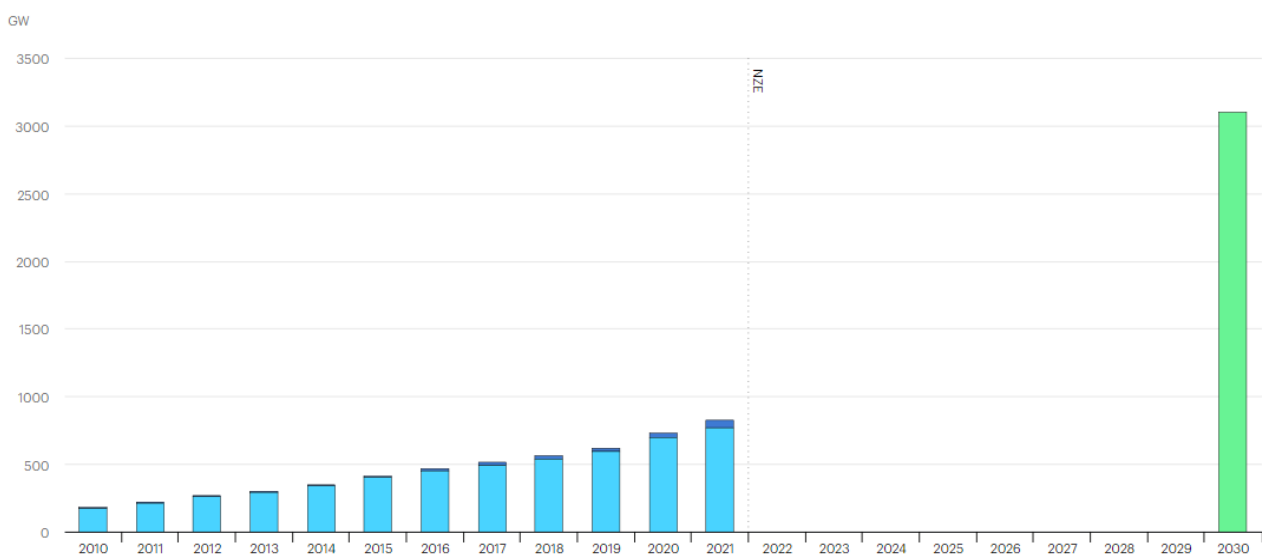
**Fig I.4 :** Moulin à vent, Baexem, Hollande.

Indépendamment du développement de grandes éoliennes, l'utilisation d'éolienne puissance pour fournir de l'énergie au réseau à grande échelle a commencé dans les années 1980 dans l'État américain de Californie. D'autres pays dont le Danemark.

La Hollande et L'Allemagne développait également des éoliennes connectées au réseau. Éoliennes de 50 kW initialement, progressivement augmentés jusqu'à des gammes de mégawatts, ont été utilisés. Ce le développement a conduit à la production de masse d'éoliennes et a abouti dans une amélioration considérable des performances.

## Chapitre 1 : Généralité sur les Systèmes de Conversion D'énergie Eolienne

Rapidement au cours de la dernière décennie. De 2000 à 2016, le cumul installé la capacité éolienne a augmenté à un taux annuel composé de 15 %. La figure 1 montre l'évolution de la capacité éolienne mondiale au cours de la période entre 2012 et 2017. Fin 2012, environ 180 000 éoliennes d'une capacité totale de 282 GW avaient été installées dans le monde. De plus, environ 900 000 petites éoliennes d'une puissance inférieure à 100 kW fonctionnaient avec une capacité totale estimée à 850 MW. Puis en 2015, un montant record de une nouvelle capacité éolienne, d'environ 63 000 MW, a été ajoutée, total d'environ 433 000 MW. Fin 2016, la capacité éolienne totale installée avait atteint 487 GW, dont 454 GW à terre. La Chine a représenté 38 % des nouveaux ajouts de capacité en 2016, suivis des États-Unis (17%), de l'Allemagne (10 %), Inde (7 %), Brésil (4 %) et France (3 %).<sup>2</sup> Ajouts nets d'énergie éolienne de 21 % en 2016 par rapport à 2015, année record où 65 GW a été ajoutée à la capacité globale. Cela s'explique principalement par les changements de politique La Chine, qui a provoqué une ruée vers l'installation avant l'expiration d'un politique régime de soutien à la fin de 2015. La Chine a ajouté 42 % de capacité en moins en 2016 qu'en 2015, ce qui représente la quasi-totalité de la différence mondiale entre 2016 et 2015. La fourchette des ajouts annuels prévus au cours des 3 à 5 prochaines années est de 40 à 50 GW. La Chine, les États-Unis, l'Allemagne, l'Inde et la France sont devrait représenter la majorité des nouveaux ajouts.<sup>3</sup> Toute la croissance rapide ci-dessus est attisée d'une part par l'envie réduire les émissions de gaz à effet de serre dans le monde et la volonté de résoudre problème de la pénurie mondiale d'énergie. Il est également soutenu par une incitation gouvernementale.



**Fig I.5 :** La capacité installée cumulée des parcs éoliens terrestres entre 2001 et 2030. [6]

## **Chapitre 1 : Généralité sur les Systèmes de Conversion D'énergie Eolienne**

En 2016, rien qu'en Europe, il y avait 168,8 GW de capacité éolienne installée. Les parcs composés de 153 GW de parcs éoliens terrestres et 15,8 GW de parcs éoliens offshore. Trois pays sont les principaux contributeurs, à savoir l'Allemagne et les États-Unis, le Royaume et l'Espagne, et ils ont environ les quatre cinquièmes du nombre total d'appareils installés en Europe en capacité.

En 2021, la production d'électricité éolienne a augmenté d'un record de 273 TWh (+ 17 %). Il s'agit d'une croissance supérieure de 55 % à celle réalisée en 2020 et la plus élevée de toutes les technologies d'énergie renouvelable. Un développement aussi rapide a été possible grâce à une augmentation sans précédent des ajouts de capacité éolienne, qui ont atteint 113 GW en 2020, contre seulement 59 GW en 2019. Pour la production d'électricité éolienne en 2030, il est nécessaire de porter les ajouts de capacité annuels moyens à près de 250 GW, soit plus du double de la croissance record de 2020. Des efforts beaucoup plus importants sont nécessaires pour atteindre ce niveau de croissance soutenue de la capacité, les domaines d'amélioration les plus importants étant de faciliter l'obtention de permis pour l'éolien terrestre et les réductions de coûts pour l'éolien offshore. [6]

### **IV. Etat de l'art sur la machine utilisée dans système de conversion éolienne :**

La technologie des aérogénérateurs a énormément évolué ces 20 dernières années entraînant une spécialisation des différents types d'éolienne [08]. Différents types de machines électriques peuvent être utilisés pour la génération de puissance éolienne. Des facteurs techniques et économiques fixent le type de machine pour chaque application. Pour les petites puissances (< 20 kW), la simplicité et le coût réduit des générateurs synchrones à aimants permanents (PMSG) expliquent leur prédominance. Dans les applications de plus forte puissance, jusqu'à 2 MW environ le générateur asynchrone est plus courant et économique. Les générateurs habituellement rencontrés dans les éoliennes sont présentés dans les paragraphes suivants [7] :

#### **IV-1 Systèmes utilisant la machine asynchrone :**

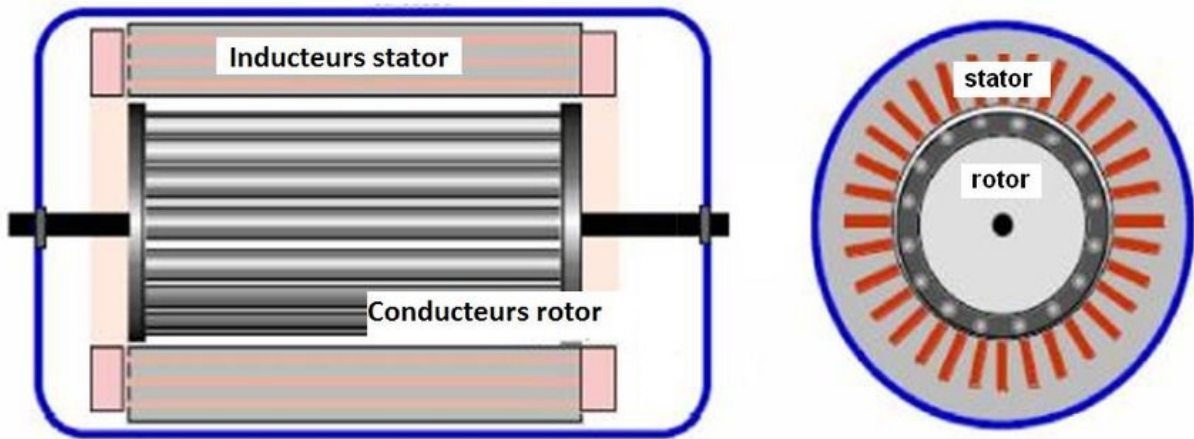
Le générateur à induction est largement utilisé dans les turbines éoliennes de moyenne et grande puissance en raison de sa robustesse, sa simplicité mécanique et son coût réduit. Son inconvénient majeur est la consommation d'un courant réactif de magnétisation au stator [8].

##### **IV.1.1 Machine asynchrone à cage d'écureuil :**

La cage d'écureuil est un enroulement dans sa forme la plus simple. Au moment de la mise en circuit, un champ tournant est généré dans le stator. Le rotor à l'arrêt est traversé par le champ

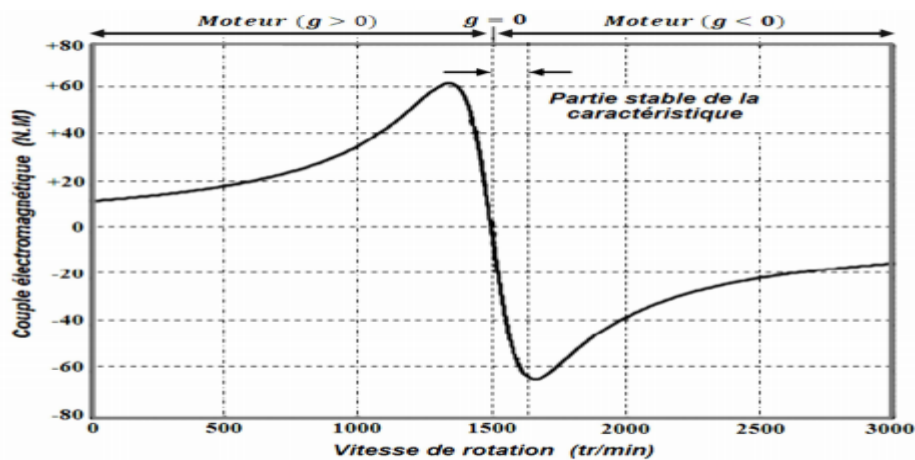
# Chapitre 1 : Généralité sur les Systèmes de Conversion D'énergie Eolienne

tournant, engendrant dans la cage d'écureuil une tension d'induction en raison du changement de flux [9].



**Fig I.6 :** Schématisation d'une machine asynchrone à cage à écureuil [10]

Le courant d'induction dans la cage d'écureuil génère à son tour un champ magnétique autour des barres du rotor. Celui-ci est orienté de sorte qu'il souhaite bloquer le champ tournant. Mais comme le rotor peut tourner, il est entraîné par le champ tournant du stator. Le champ tournant génère donc un couple de rotation qui agit sur le rotor. La caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à deux paires de pôles est donnée sur la **Fig1.6** [7]



**Fig I.7 :** Caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à 2 paires de pôles.

Ces systèmes éoliens sont constitués d'une turbine éventuellement équipée d'un système de contrôle de l'angle de calage des pales, d'un multiplicateur de vitesse et d'un générateur. Ce générateur est principalement une machine asynchrone à cage directement couplée au réseau et fonctionnant en hyper synchronisme à la vitesse Sync, où  $g$  est le glissement de la machine ( $g < 0$  dans ce cas). La machine étant couplée directement au réseau, la vitesse de synchronisme étant

## Chapitre 1 : Généralité sur les Systèmes de Conversion D'énergie Eolienne

imposée par ce dernier, la vitesse de rotation est par conséquent quasiment constant ; à titre d'exemple ; le glissement d'une machine de 1,5 MW est de l'ordre de 1%.

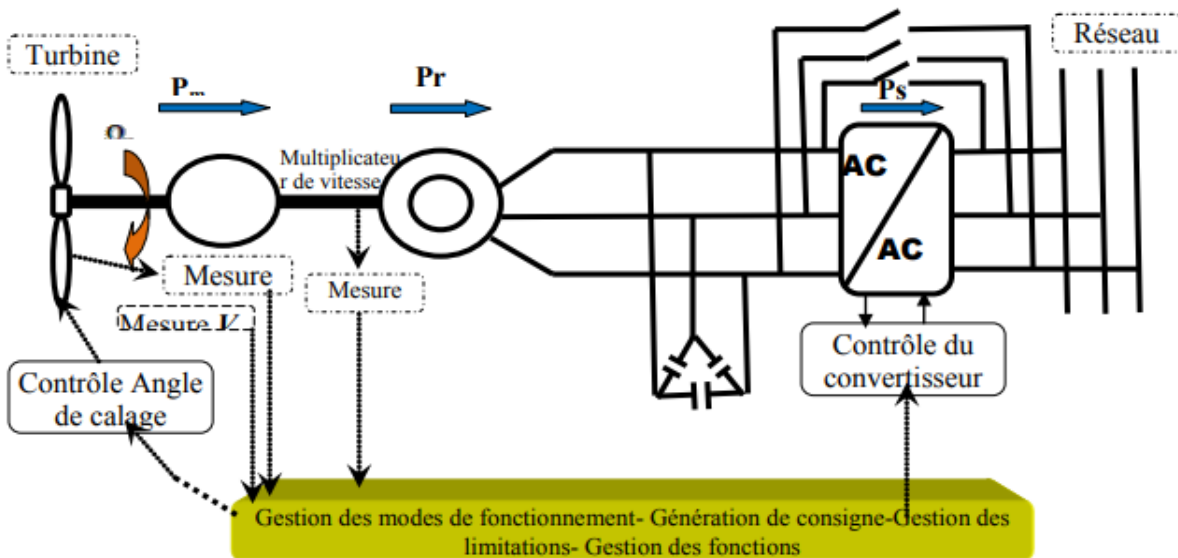


Fig I.8 : Schéma de principe d'un entraînement à vitesse fixe.

On peut noter, dans certains cas la présence d'un convertisseur statique de type gradateur entre le réseau et la génératrice. Ce convertisseur sert uniquement à limiter le fort appel de courant dû à la magnétisation au moment du couplage sur le réseau. Une fois le couplage effectué, ce convertisseur est court-circuité. La machine est alors directement raccordée au réseau. On note également la présence de batterie de condensateur pour compenser la puissance réactive consommée par le maintien de la magnétisation de la machine.

On retrouve encore cette technologie chez certains constructeurs tels que VESTAS : VERGNET, SUZLON ou encore MITSUBISHI [11].

Par contre, cette configuration représente quelques inconvénients [7] :

- Il n'y a pas d'accès pour récupérer l'énergie induit dans le rotor ;
- Elle ne permet pas une vitesse variable ;
- Le courant débité au réseau est perturbé à cause la variation brusque du couple ;
- Elle ne fonctionne en régime autonome qu'en présence des condensateurs.

# Chapitre 1 : Généralité sur les Systèmes de Conversion D'énergie Eolienne

## IV.1.2 Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) :

La machine asynchrone double alimentation présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées munies d'encoches dans lesquelles vient s'insérer les enroulements. L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne [12].

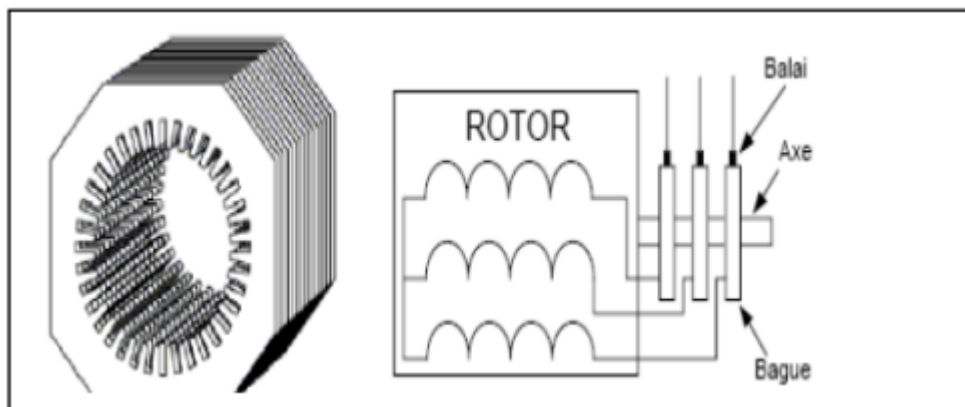
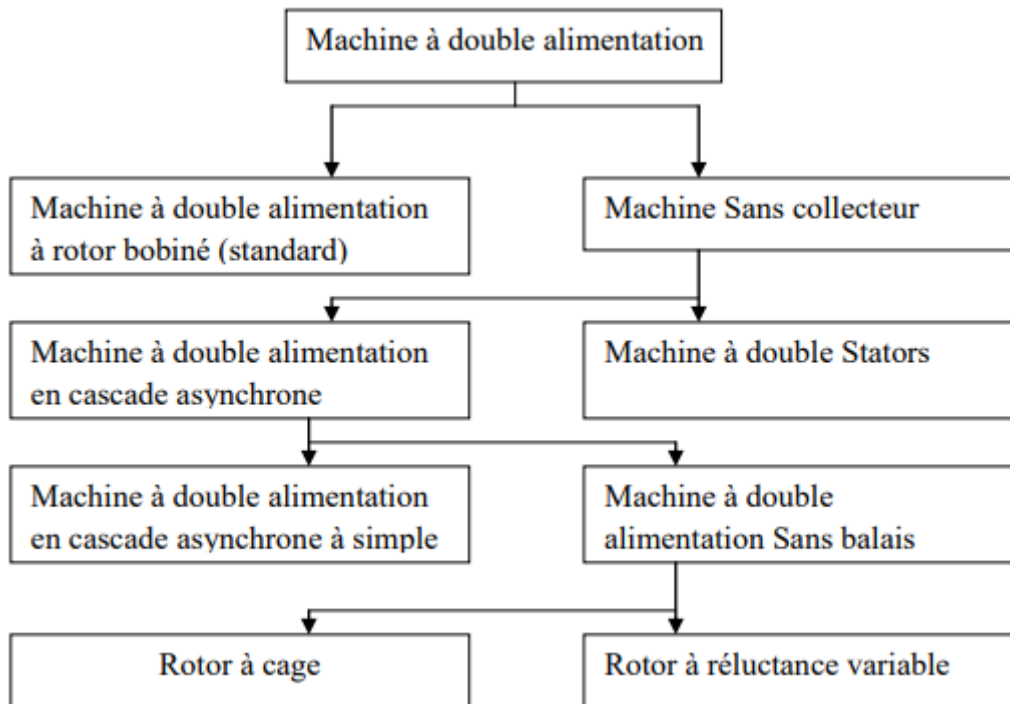


Fig I.9 : Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA

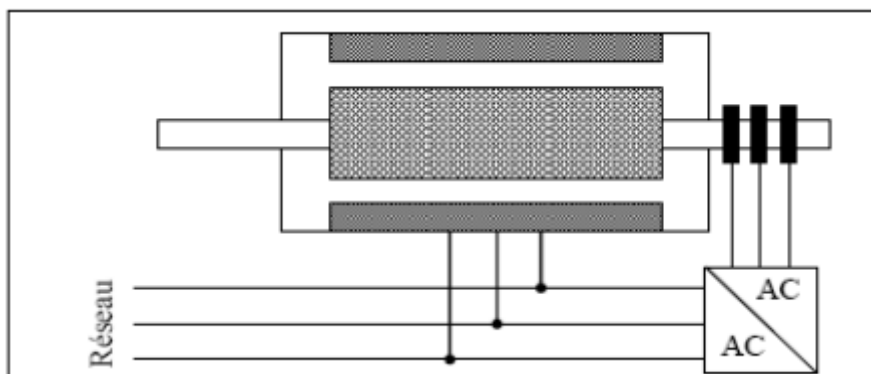
### IV.1.2.1 Classification des machines asynchrone à double alimentation :

La classification de la machine asynchrone à rotor bobiné est obtenue à partir d'une recherche bibliographique qui a été développée dans la littérature du domaine des machines à double alimentation. Les différentes variantes de la machine à double alimentation les plus attractives et les plus développées dans la littérature sont classifiées par un organigramme donné précédemment. Le schéma de principe et la description de chaque variante seront détaillés ci-dessous [12].



## A. Machine Asynchrone à Double Alimentation type "rotor bobiné" :

La figure illustre le schéma de principe de ce type de machines, tel que le stator est alimenté directement par le réseau, alors que le rotor est alimenté au moyen d'un convertisseur alternatif-alternatif de telle sorte que le glissement de cette machine devient une grandeur contrôlable. Il faut noter que le convertisseur bidirectionnel indiqué dans la figure peut être un convertisseur indirect (AC/DC/AC) composé d'un redresseur et d'un onduleur ou bien un convertisseur direct (AC/AC): cyclo-convertisseur ou convertisseur matriciel[12].



**Fig I.10** : Schéma de principe de la machine à double alimentation à rotor bobiné

# Chapitre 1 : Généralité sur les Systèmes de Conversion D'énergie Eolienne

## B. Machine asynchrone à double alimentation type "brushless" :

Cette machine a la particularité de posséder deux bobinages triphasés au stator. Un des bobinages est directement connecté au réseau et est destiné au transfert de puissance. Le second bobinage, dont la section des conducteurs est moins élevée, permet de faire varier les courants d'excitation de la machine. Le rotor possède une structure spéciale différente de la cage d'écureuil classique mais tout aussi robuste : il est constitué de plusieurs boucles conductrices concentriques.

Cette machine présente l'intérêt d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable à l'instar du dispositif de la Figure. En revanche, le stator de forte puissance est connecté directement sur le réseau et le convertisseur est placé entre le stator de faible puissance et le réseau [13]

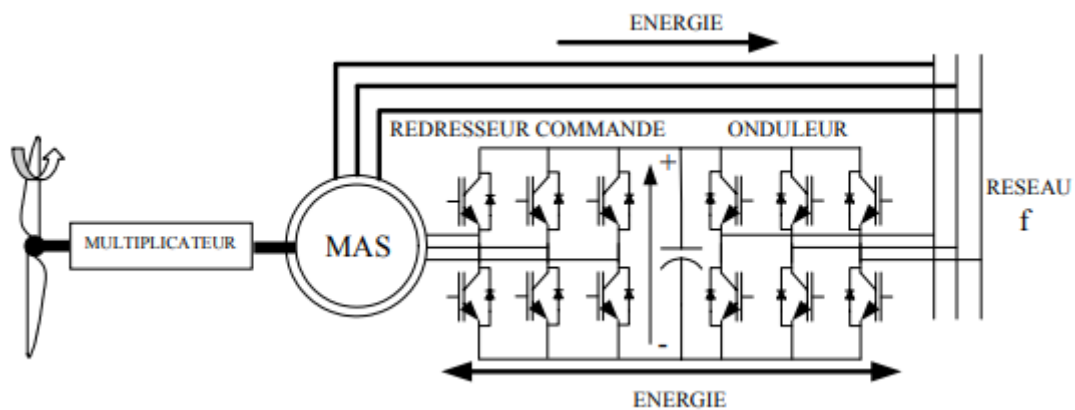


Fig I.11 : Machine asynchrone brushless connectée sur le réseau [13]

## C. Machine asynchrone à double alimentation – structure de Kramer :

Dans le but de réduire les pertes d'énergie dues à la structure du système précédent, le hacheur et la résistance sont remplacés par un onduleur qui renvoie l'énergie de glissement vers le réseau (structure de Kramer) [13].

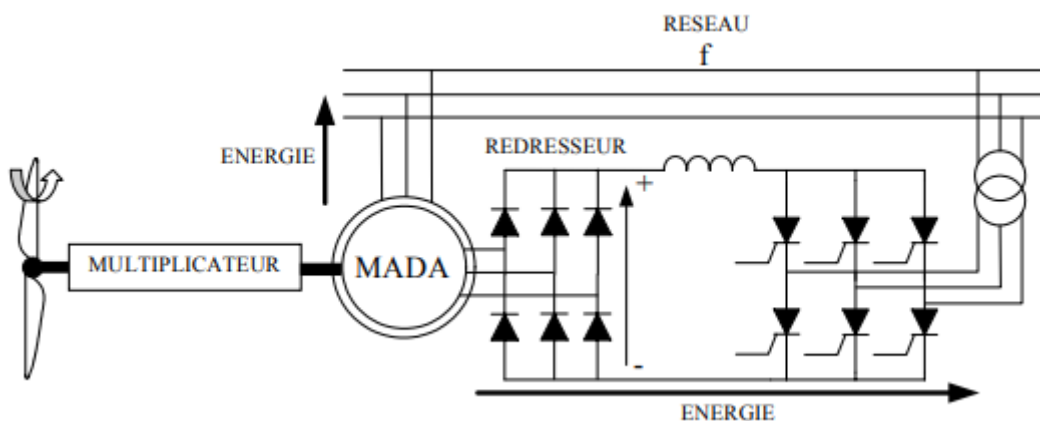


Fig I.12 : MADA, structure Kramer

# Chapitre 1 : Généralité sur les Systèmes de Conversion D'énergie Eolienne

## D. Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorque dissipée :

Cette configuration à vitesse variable est représentée sur la (Figure 1-20), 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 [7]. Le contrôle de l'IGBT permet de faire varier l'énergie dissipée par le bobinage rotorque 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.

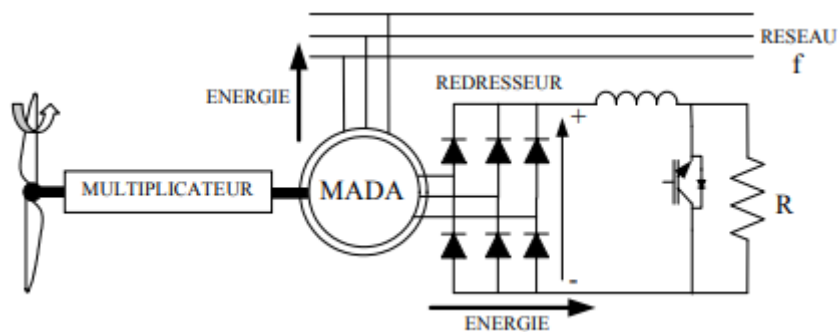


Fig I.13 : MADA avec contrôle du glissement par l'énergie.

## E. Machine asynchrone à double alimentation – structure de Sacheries avec cyclo convertisseur :

. Afin d'autoriser un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, l'association redresseur-onduleur peut être remplacée par un cyclo convertisseur (Figure), l'ensemble est alors appelé structure de Sacheries.

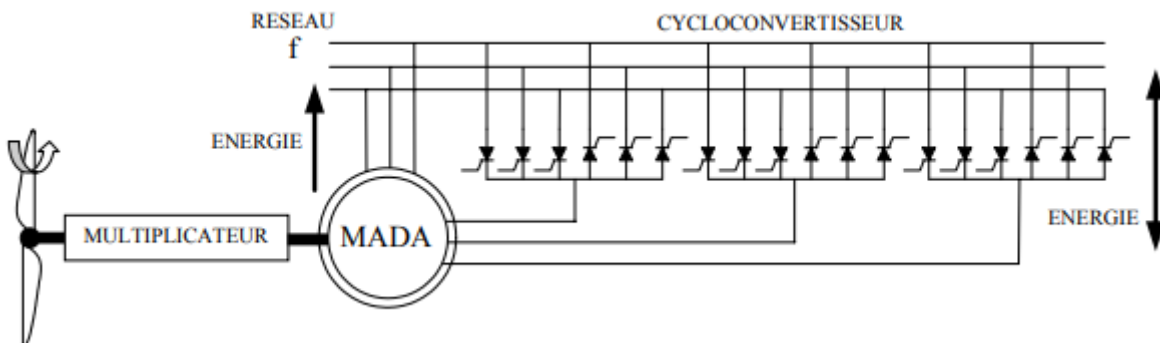


Fig I.14 : Structure de Sacheries avec cyclo convertisseur.

# Chapitre 1 : Généralité sur les Systèmes de Conversion D'énergie Eolienne

## F. Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scherbius avec convertisseurs MLI :

Cette configuration (Figure) a les mêmes caractéristiques que la structure de Scherbius avec cyclo convertisseur. Toutefois les interrupteurs utilisés ici (transistors IGBT) peuvent être commandés à l'ouverture et à la fermeture et leur fréquence de commutation est plus élevée que celle des GTO. L'utilisation de ce type de convertisseur permet d'obtenir des allures de signaux de sortie en Modulation de Largeur d'Impulsions dont la modularité permet de limiter les perturbations en modifiant le spectre fréquentiel du signal (rejet des premiers harmoniques non nuls vers les fréquences élevées).

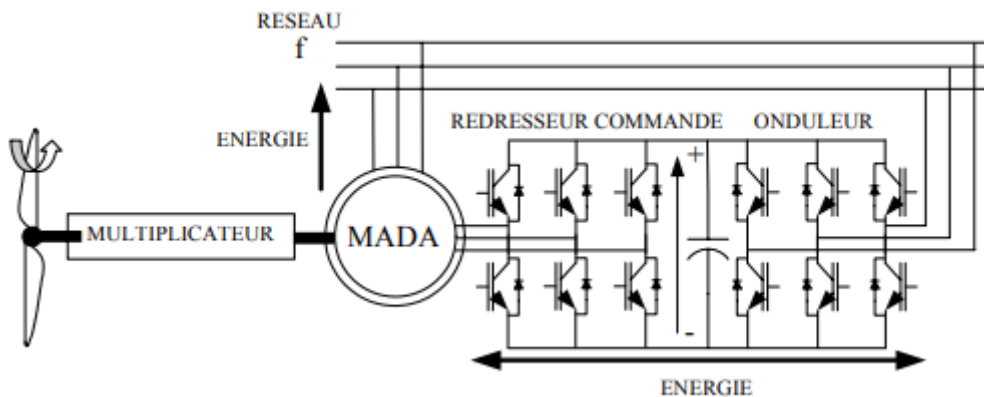


Fig I.15 : structure de Scherbius avec convertisseurs MLI.

## IV-2 Systèmes utilisant la machine synchrone :

Le Colonne vertébrale de bataille pour la production d'électricité est la machine synchrone. La majeure partie de l'énergie électrique est produite par des générateurs synchrones triphasés. Les générateurs synchrones avec des puissances nominales de plusieurs centaines de MVA sont courants ; les plus grosses machines ont une puissance allant jusqu'à 1500 MVA. En régime permanent, elles fonctionnent à une vitesse fixée par la fréquence du réseau électrique, et sont donc appelées machines synchrones. En tant que générateurs, les machines synchrones fonctionnent en parallèle dans les grandes centrales. Une cote de 600 MVA est alors assez courante [14].

### IV.2.1 Les types de générateur synchrone :

#### A. Générateur Synchrone à Rotor Bobiné :

Dans cette figure montre un générateur à induction à rotor bobiné avec contrôle de la résistance du rotor (contrôle dynamique du glissement). Dans ce schéma, les enroulements du

# Chapitre 1 : Généralité sur les Systèmes de Conversion D'énergie Eolienne

rotor sont connectés via des bagues collectrices et des balais avec une résistance variable externe. La résistance équivalente dans le circuit peut être ajustée par un système de contrôle électronique, le glissement du générateur peut être affecté et la vitesse du rotor est modifiée. Le générateur peut avoir une variation de vitesse jusqu'à 10 % au-dessus de la vitesse synchrone ; cependant, la conception est vulnérable à l'usure au niveau des bagues collectrices et nécessite un entretien suffisant. La résistance du rotor peut également être contrôlée dans les transitoires du système d'alimentation pour aider à surmonter les défauts de l'éolienne [15].

Les machines synchrones à rotor bobiné demandent un entretien régulier du système de contacts glissants au rotor. Le circuit d'excitation est assuré par l'intermédiaire d'un redresseur connecté

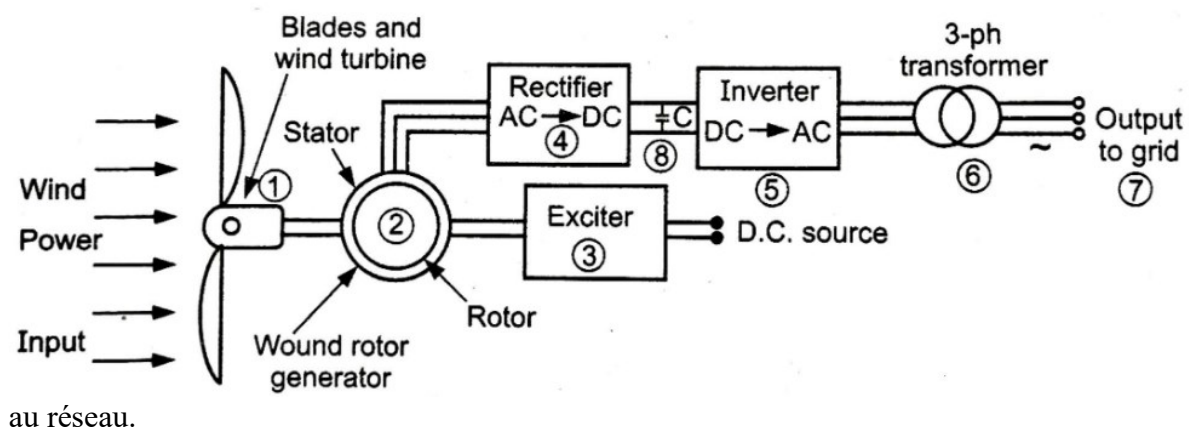


Fig I.16 : schéma fonctionnel du générateur synchrone à rotor bobiné [16]

## B. Générateur Synchrone à Aimants Permanents (GSAP) :

### Définition :

La génératrice synchrone est un tel dispositif qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique délivrée par le moteur principal de la génératrice. Il est également connu sous le nom d'alternateur. Elle est appelée génératrice synchrone car sa vitesse de rotation est égale à la vitesse de rotation du champ au stator de la génératrice appelée vitesse synchrone. Dans ce générateur, une alimentation externe est prévue pour exciter le générateur qui est l'inverse du générateur à induction. Pour l'excitation, la source de courant continu externe est connectée à un générateur synchrone [8].

Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction des machines synchrones à aimants permanents à des coûts qui deviennent compétitifs. Les machines de ce type sont à grand nombre de pôles et permettent de développer des couples mécaniques

## Chapitre 1 : Généralité sur les Systèmes de Conversion D'énergie Eolienne

considérables. Il existe plusieurs concepts de machines synchrones à aimants permanents dédiées aux applications éoliennes, des machines de construction standard (aimantation radiale) ou génératrices discoïdes (champs axial), ou encore à rotor extérieur.

Le couplage de ces machines avec l'électronique de puissance devient de plus en plus viable économiquement, ce qui en fait un concurrent sérieux des génératrices asynchrones à double alimentation. Les systèmes de ce type ont un taux de défaillance jugé faible grâce à la de certaines sources de défauts : suppression du multiplicateur de vitesse et du système de bague et balais. Les frais d'entretien sont alors minimisés ce qui est très intéressant dans les applications éoliennes, en particulier dans les sites difficilement accessibles (offshore par exemple). La présence obligatoire de l'électronique de puissance permet enfin une régulation simple de la vitesse de rotation et donc une optimisation énergétique efficace.

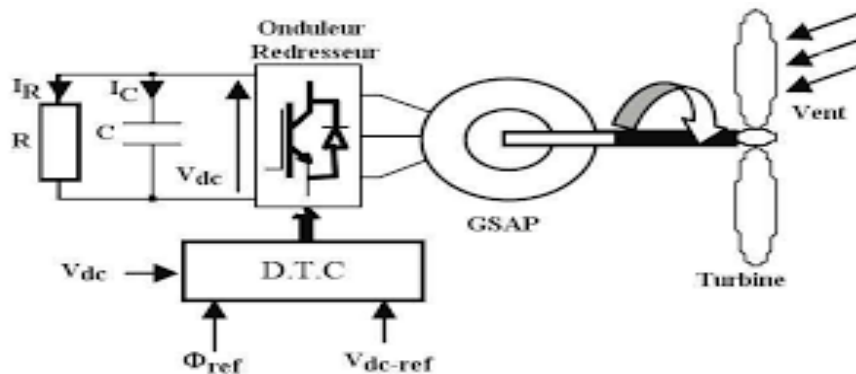


Fig I.17 : Schéma de principe du GSAP [17]

Le système global étudié est constitué d'une turbine éolienne, d'une GSAP et d'un onduleur/redresseur à M.L.I. Dans le cas d'un fonctionnement en autonome avec une charge équilibrée, il est possible de ramener la charge du côté continu. Par conséquent, l'étude de la commande peut se restreindre à celle de la tension continue à la sortie du redresseur à M.L.I. Le système étudié est alors simplifié comme montré à la figure [18].

### V. Description et types des machines synchrones à aimants permanents :

L'alternateur est formé d'un stator fixe, et d'un rotor tournant. Le stator ou induit se compose d'un noyau feuilleté ayant la forme d'un cylindre vide et comportant des encoches dans lesquelles sont logés les conducteurs d'un enroulement triphasé à  $2p$  pôles. Les bobines constituant cet enroulement sont décalées de et toujours raccordées en étoile et le neutre est accessible pour permettre sa mise à la terre. Le rotor ou inducteur comporte  $p$  pôles nord et  $p$

## Chapitre 1 : Généralité sur les Systèmes de Conversion D'énergie Eolienne

pôles sud intercalés. Ces pôles sont créés par des bobines alimentées en courant continu ou par des aimants permanents. Le rotor est soit à pôles saillants ou à pôles lisses [19].

Le nombre de pôles d'un alternateur est imposé par la vitesse du rotor et par la fréquence du courant à produire. Ainsi, considérons un conducteur de l'induit devant lequel se déplacent les pôles nord et les pôles sud du rotor. Si la tension induite dans ce conducteur rend une série de valeurs positives pendant le passage d'un pôle nord, elle prendra une série de valeurs égales, mais négatives, pendant le passage d'un pôle sud. Chaque fois qu'une paire de pôles se déplace devant un conducteur, la tension induite décrit donc un cycle complet. On en déduit que la fréquence est donnée par l'équation :  $f = \frac{pn}{120}$

Il existe quatre types de machines synchrones à aimants permanents du point de vue Construction mécanique :

### V.1 Machines synchrones à aimants permanents montés en surface (MSAPS) :

Cette structure est la plus simple à construire parce que des aimants permanents à aimantation radiale sont disposés directement sur la périphérie du rotor (figure). Les aimants ont généralement une forme de tuile et sont collés sur une culasse cylindrique. Cette structure de machine rentre dans la catégorie des machines à pôles lisses. La tenue mécanique des aimants est facilitée par la force centrifuge [19].

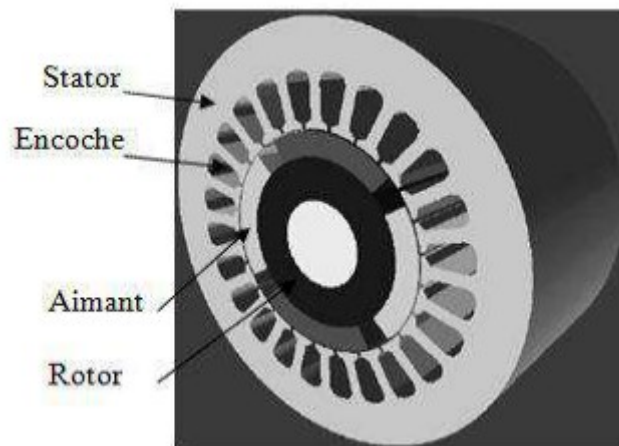


Fig I.18 : Machine synchrone à aimants permanents montés en surface.

### V.2 Machine synchrones à aimants permanents insérés (MSAPI) :

A partir de la structure précédente, on entaille des logements pour insérer les aimants permanents dans le rotor afin de faciliter l'assemblage mécanique. Les parties de fer entre les

## Chapitre 1 : Généralité sur les Systèmes de Conversion D'énergie Eolienne

aimants permanents sont des espaces inter polaires qui rajoutent de la saillance. Toutefois, les caractéristiques de cette structure restent fondamentalement proches [20].

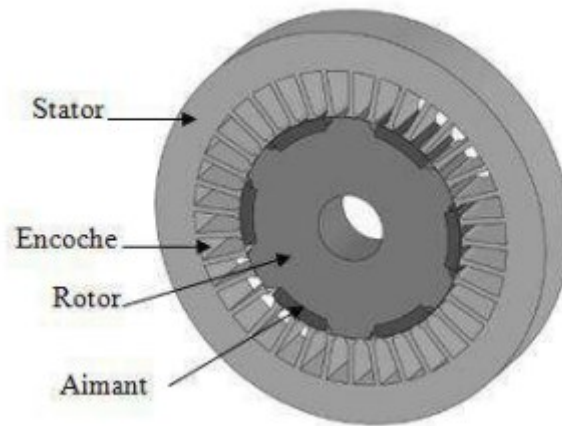


Fig I.19 : Machine synchrone à aimants permanents insérés

### V.3 Machines synchrones à aimants permanents chapeautés (MSAPC) :

Cette structure est déduite de celles avec des aimants permanents montés en surface. On place sur les aimants des pièces polaire généralement en acier doux. La combinaison des aimants et des pièces polaires crée une anisotropie du rotor et rajoute une saillance. Les pièces polaires permettent de contrôler la forme de la f.e.m au stator en agissant sur le profil de la pièce [21].

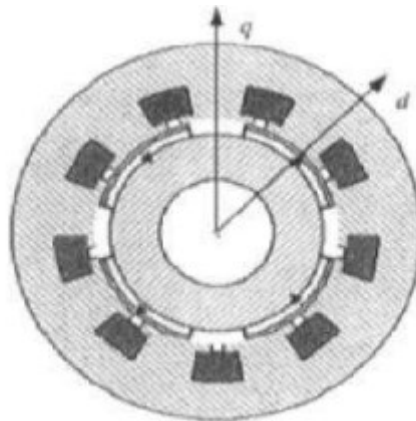


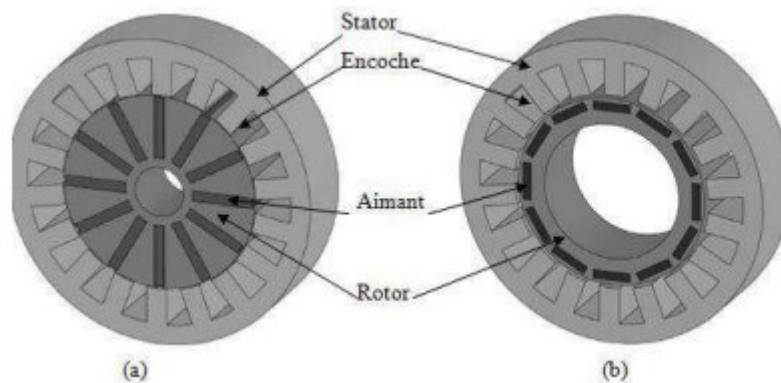
Fig I.20 : Machine synchrone à aimants permanents chapeautés

### V.4 Machines synchrones à aimants permanents enterrés (MSAPE) :

La structure des inducteurs de ce type de machine est à géométrie complexe. Les aimants sont enterrés à l'intérieur du rotor. La robustesse mécanique de ce type de rotor permet d'atteindre de très grandes vitesses pour des puissances importantes. Deux configurations du rotor peuvent être distinguées, l'une est à concentration de flux et l'autre à structure classique. L'avantage de ces deux configurations réside dans la possibilité de concentrer le flux produit par ces aimants,

## Chapitre 1 : Généralité sur les Systèmes de Conversion D'énergie Eolienne

permettant ainsi d'assurer des niveaux d'inductions élevées dans l'entrefer. De plus, les aimants enterrés sont bien protégés contre la démagnétisation [19] [21].



**Fig I.21 :** Machine synchrone à aimants enterrés : (a) avec concentration de flux, (b) structure classique

### VI. Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne :

L'énergie produite par une éolienne s'appuie sur la force motrice du vent pour faire tourner des hélices qui, elles-mêmes, font marcher une turbine qui produira de l'électricité. Ainsi, l'énergie cinétique du vent est transformée en énergie mécanique grâce à un générateur électrique situé en haut du mât. L'énergie éolienne peut être issue de grands projets de champs d'éoliennes horizontales, mais également des éoliennes domestiques qui s'appuient sur différentes technologies. Si les avantages de cette énergie sont nombreux, quelques inconvénients sont également à souligner.

#### VI- 1 Les avantages :

L'énergie éolienne a de nombreux avantages dont, par exemple, le fait d'être une énergie 100 % naturelle, et Il ne cause aucune pollution environnementale [22], renouvelable et durable. Produite grâce au souffle du vent, cette énergie ne connaît aucun risque de pénurie, à la différence des énergies ayant un combustible pour sous-jacent (nucléaire, thermique...). Le fait que l'énergie produite par une éolienne soit 100 % naturelle implique qu'elle ne génère aucune pollution, car il n'y a aucun rejet dans l'air suite à la transformation électrique.

Par ailleurs, le principe même d'une éolienne fait que la surface au sol nécessaire pour produire de l'énergie est relativement faible, à la différence de l'énergie solaire dont les panneaux

## **Chapitre 1 : Généralité sur les Systèmes de Conversion D'énergie Eolienne**

photovoltaïques occupent une vaste superficie pour une puissance maximale limitée. L'énergie éolienne a aussi la particularité d'avoir un rendement supérieur en hiver, car le vent est généralement plus fort pendant la saison froide. C'est un point très positif pour la gestion du réseau énergétique, car les besoins des consommateurs sont nettement supérieurs au cours de la période hivernale.

Enfin, le développement des projets d'éoliennes fait mécaniquement diminuer le coût grâce à des rendements d'échelle intéressants [23].

### **VI-2 Les inconvénients :**

L'un des inconvénients majeurs de cette énergie reste sa difficulté à la prévoir. En effet, les vents sont difficiles à anticiper et il faut savoir que, si une éolienne a besoin d'un vent minimum pour démarrer, elle s'arrêtera de fonctionner en cas de vents supérieurs à 90 km/h. L'autre inconvénient majeur, souvent mis en avant par les riverains, est le bruit que cause cet équipement [23].

De plus, le coût de la construction d'une éolienne reste importante, car son implantation nécessite l'intervention d'engins spéciaux et a donc un coût de génie civil à prendre en compte. Il convient également de souligner qu'il n'est pas simple de démonter une éolienne dans la mesure où les mâts peuvent monter haut.

## **VII. Les types de turbine éolienne :**

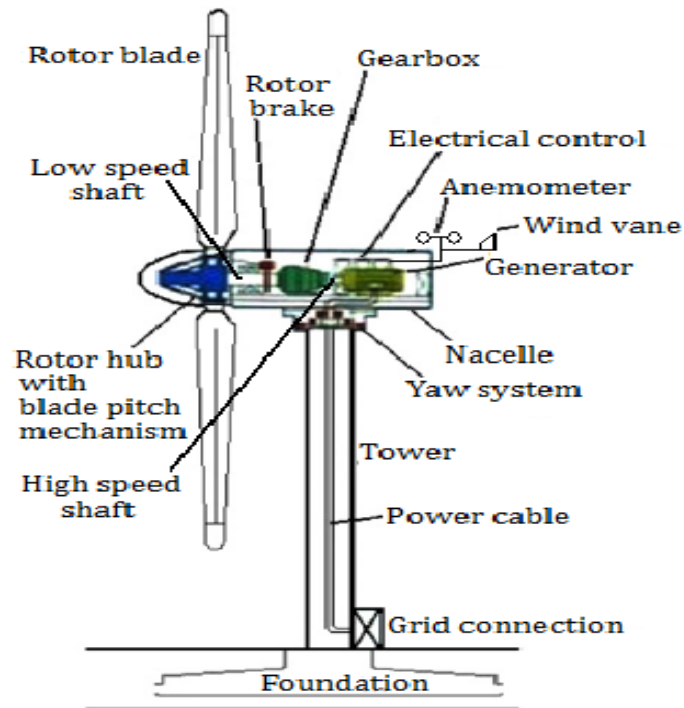
On peut partager les éoliennes en deux grandes familles selon la disposition géométrique de l'arbre :

Celles à axe vertical (VAWT : Vertical Axis Wind Turbine) et celles à axe horizontal (HAWT : Horizontal Axis Wind Turbine) [23] :

### **VII-1 Eoliennes à axe horizontal :**

Les éoliennes à axe horizontal sont les éoliennes les plus couramment utilisées en raison de leur puissance et de leur efficacité. La base des tours doit être extrêmement solide, permettant à l'arbre du rotor d'être installé au sommet de la tour, ce qui permet à la turbine d'être exposée à des vents plus forts. Les pales de l'éolienne étant perpendiculaires au vent, la rotation des pales peut générer plus de puissance par rapport à l'éolienne à axe vertical. Cependant, la construction de ce type de turbine nécessite un support lourd pour la tour afin de supporter le poids des pales, de la boîte de vitesses et du générateur ainsi que l'utilisation d'une grue de taille importante pour soulever les composants jusqu'au sommet de la tour. Éoliennes à axe horizontal,

## Chapitre 1 : Généralité sur les Systèmes de Conversion D'énergie Eolienne



**Fig I.22** : Une configuration typique et les principaux composants d'un système d'éolienne à axe horizontal [24]

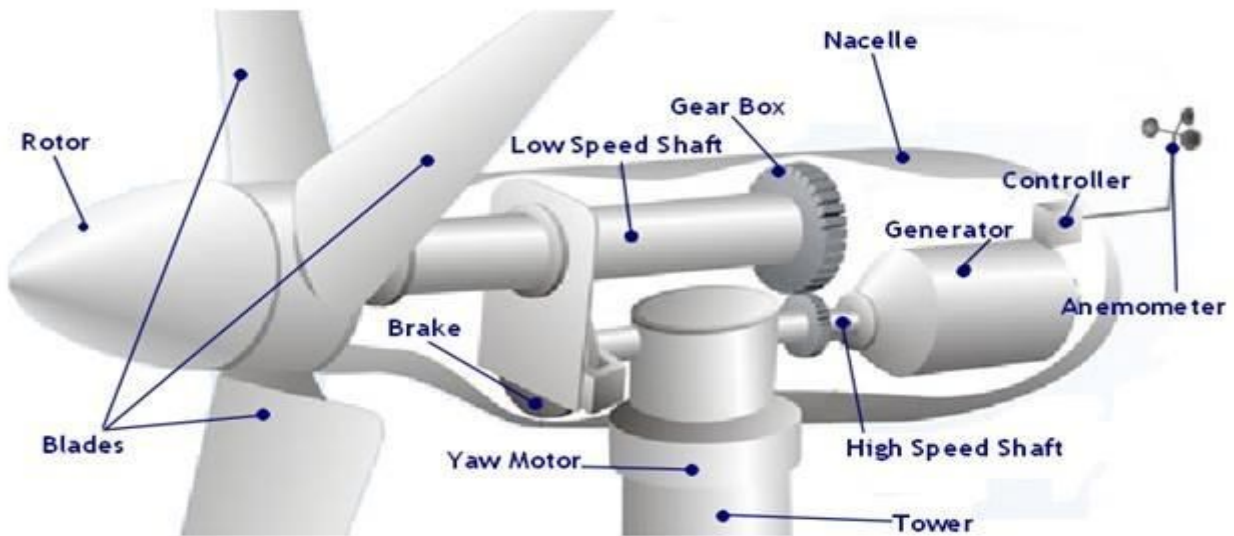
elles nécessitent un capteur de vent qui détecte la direction du vent et un mécanisme de lacet qui fait tourner l'appareil afin d'être correctement aligné contre le vent [25].

Dans une situation où le vent souffle vers le bas, la structure de la turbine peut souffrir d'une fatigue du métal qui pourrait entraîner une défaillance structurelle.

Ceci est résolu en concevant les turbines avec une conception au vent. Un contrôle de lacet supplémentaire est nécessaire pour les éoliennes à axe horizontal afin de suivre la direction du vent, pour éviter d'endommager l'éolienne [26].

### VII.1.1 Les principaux composants d'une éolienne horizontale :

Pour ajouter de l'efficacité à la turbine, l'éolienne a quelques éléments clés. Dans la nacelle, également connue sous le nom de tête, il y a une girouette, un anémomètre et un contrôleur qui lit la vitesse et la direction du vent. En cas de changement de cap d'enroulement, un moteur fait tourner la Nacelle pour assurer que les pales soient face au vent. Dans les vents extrêmes, il y a une rupture sur la turbine pour ralentir la vitesse de l'arbre. Le frein empêche les turbines d'être endommagées dans des conditions difficiles.



**Fig I.23 :** composants principaux d'une éolienne à axe horizontal [27]

Endommagé dans des conditions difficiles. Les turbines à axe horizontal ont des avions comme des hélices à trois pales. Le plus grand est un bâtiment de près de 20 étages avec des pales de 100 pieds de long. Plus la turbine est haute, plus elle produit d'électricité. Le type horizontal est presque utilisé dans toutes les turbines [28].

# Chapitre 1 : Généralité sur les Systèmes de Conversion D'énergie Eolienne

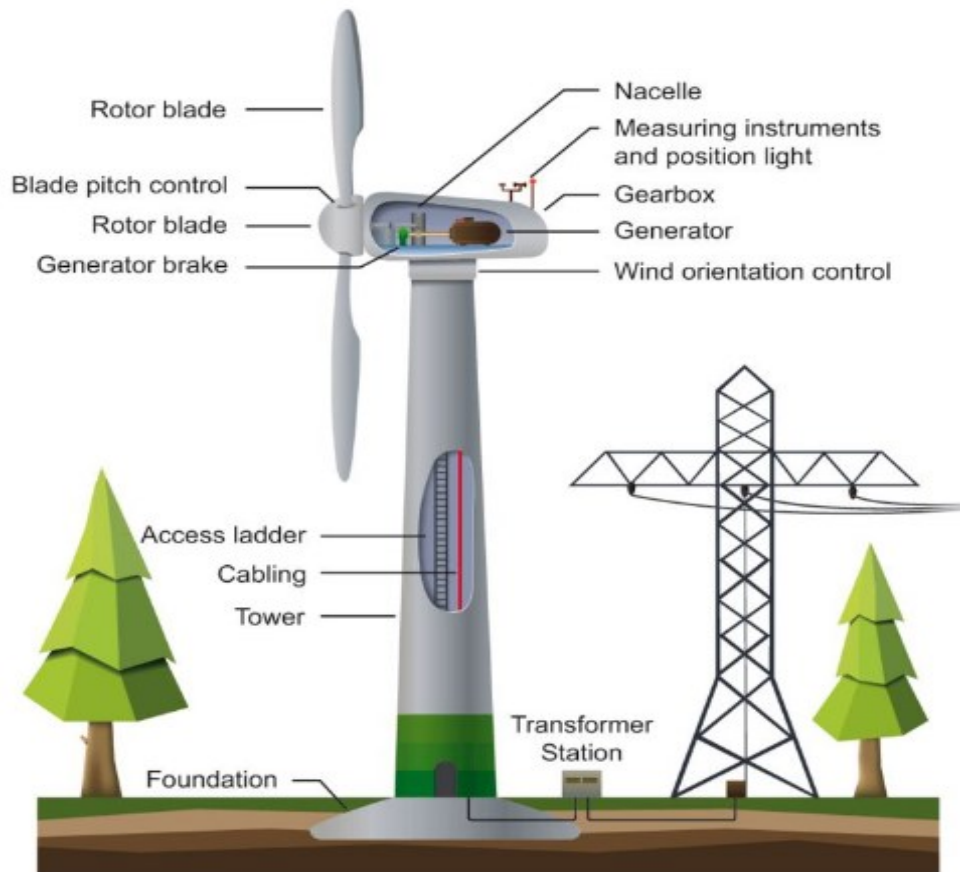


Fig I.24 : interconnexion d'une éolienne à un système électrique via un transformateur [27]

## VII.1.2 Les avantages et les inconvénients :

### A. Les avantages :

- Elle est fiable : Sa conception est utilisée dans tous les domaines (industriels et domestiques), preuve que ce système est efficace car il a fait ses preuves depuis des décennies.
- Elle offre un très bon rendement : Le rotor n'est pas fixe, il peut s'orienter en fonction du sens du vent. Résultat : il peut exploiter un maximum d'énergie. Sa productivité est supérieure à celle d'une éolienne verticale grâce aussi au positionnement de ses pales qui capture mieux le vent.
- Elle est silencieuse : En fonctionnement, le bruit de ses pales est semblable à celui du vent contre un arbre.
- Elle est abordable : Les modèles horizontaux s'étant nettement démocratisés ces dernières années, le prix des premiers modèles est devenu plus accessible (fourchette basse à 10 000 €).

## Chapitre 1 : Généralité sur les Systèmes de Conversion D'énergie Eolienne

- Elle est écologique : Vous pouvez produire de l'électricité 100 % verte grâce au vent.
- Elle vous fournit gratuitement en électricité : Peu importe si votre éolienne est un système central ou d'appoint, votre investissement vous permettra d'avoir tout ou partie de votre électricité totalement gratuite.
- Elle est adaptée aux zones les plus venteuses : Plusieurs zones françaises disposent d'un fort potentiel éolien, comme la côte languedocienne, la vallée du Rhône ou encore toute la façade ouest, du Pas-de-Calais jusqu'à la Vendée.

### B. Les inconvénients :

- Elle met plus de temps pour se mettre en route que l'éolienne verticale : En cherchant la direction du vent, l'éolienne horizontale va mettre plus de temps pour trouver sa position idéale. Cette particularité affecte légèrement son rendement
- Elle est fragile : Comme son fonctionnement varie en fonction de la direction du vent, elle est plus sujette aux intempéries et aux tempêtes. De plus, elle s'arrête lorsque les vents sont trop forts, ce qui peut diminuer son rendement dans les zones proches des océans ou de la mer. Ces éoliennes sont renforcées grâce à un hauban et le rotor s'arrête automatiquement grâce à un frein connecté à un détecteur de vitesse
- Elle est soumise à certaines contraintes administratives : Déclaration de travaux, permis de construire, étude d'impact, raccordement, etc. l'installation d'une éolienne horizontale peut nécessiter selon les cas un peu d'administratif
- Elle peut être chère : Les modèles haut de gamme peuvent monter jusqu'à 90 000 €
- Son efficacité dépend des conditions : En fonction de votre emplacement et de votre exposition au vent, vous obtiendrez des rendements différents [29].

### VII-2 L'éolienne a axe verticale :

Les éoliennes à axe vertical ont été testées et utilisées plus largement dans les années 1980 et 1990 car elles étaient plus silencieuses et pouvaient fonctionner sans nécessiter de commandes de lacet, quelle que soit la direction du vent. [30]

Les VAWT sont disponibles dans un grand nombre de formes et de tailles depuis des décennies, cependant, ils ne représentent qu'une fraction des éoliennes en fonctionnement globalement. Ils ont généralement été utilisés pour des projets de production d'électricité à petite échelle et milieux résidentiels, en particulier dans les zones urbaines, et, par conséquent, principalement

## Chapitre 1 : Généralité sur les Systèmes de Conversion D'énergie Eolienne

en tant que vent autonome éoliennes, plutôt que connectées au réseau. En conséquence, ils n'ont pas été au centre, ni même un axe majeur, d'investissement ou de R&D, qui se sont principalement concentrés sur HAWT, malgré leurs nombreuses fonctionnalités attrayantes qui pourraient aider à subvenir aux besoins exploitation plus importante et moins coûteuse de l'énergie cinétique du vent pour la production d'électricité.

Par exemple, contrairement aux HAWT nécessitant des vents soufflant de certaines directions, la verticale les systèmes d'axes des VAWT signifient que "l'air circulant dans n'importe quelle direction ou vitesse peut tourner [leurs] pales » pour générer de l'énergie même en cas de « rafales de vent » (Arcadie 2017). En d'autre mots, ils peuvent fonctionner avec des vents "de tous les 360 degrés, et même certaines turbines sont alimenté lorsque le vent souffle de haut en bas ». Les VAWT, contrairement aux HAWT, qui ne peuvent pas fonctionner par vent lent, peuvent même augmenter leur production d'énergie lorsqu'ils sont « regroupés en réseaux pour créer des turbulences d'une turbine à l'autre, ce qui permet d'augmenter le débit autour d'elles et d'augmenter production d'électricité » (Arcadie 2017). Une telle augmentation pourrait être assez phénoménale comme démontré par un modèle aérodynamique financé par un 2010 Californie Energie Subvention de la Commission (CEC). Ce modèle "a prouvé que les VAWT modernes, lorsqu'ils sont placés à proximité ensemble créerait également «l'effet de vortex couplé». L'espacement rapproché d'un mètre et les contre-rotations leur permettent de produire 20 à 30% d'énergie en plus par paire qu'avec deux VAWT fonctionnant séparément » (Dvorak 2018). Cela pourrait même répondre à l'un des lacunes des VAWT, ce qui a contribué à rendre les HAWT plus attractifs option pour les groupes électrogènes. Cette capacité "compense le problème auquel les VAWT sont confrontés et que les HAWT ne rencontrent pas : leurs pales créent une traînée lorsqu'elles retournent dans le vent. Historiquement, cela l'augmentation de la traînée les empêchait d'atteindre plus de 45% d'efficacité, alors que Les HAWT peuvent atteindre 50 %. Avec l'effet de vortex couplé, les VAWT dans les réseaux peuvent réaliser théoriquement l'efficacité des HAWT » [31]

## Chapitre 1 : Généralité sur les Systèmes de Conversion D'énergie Eolienne

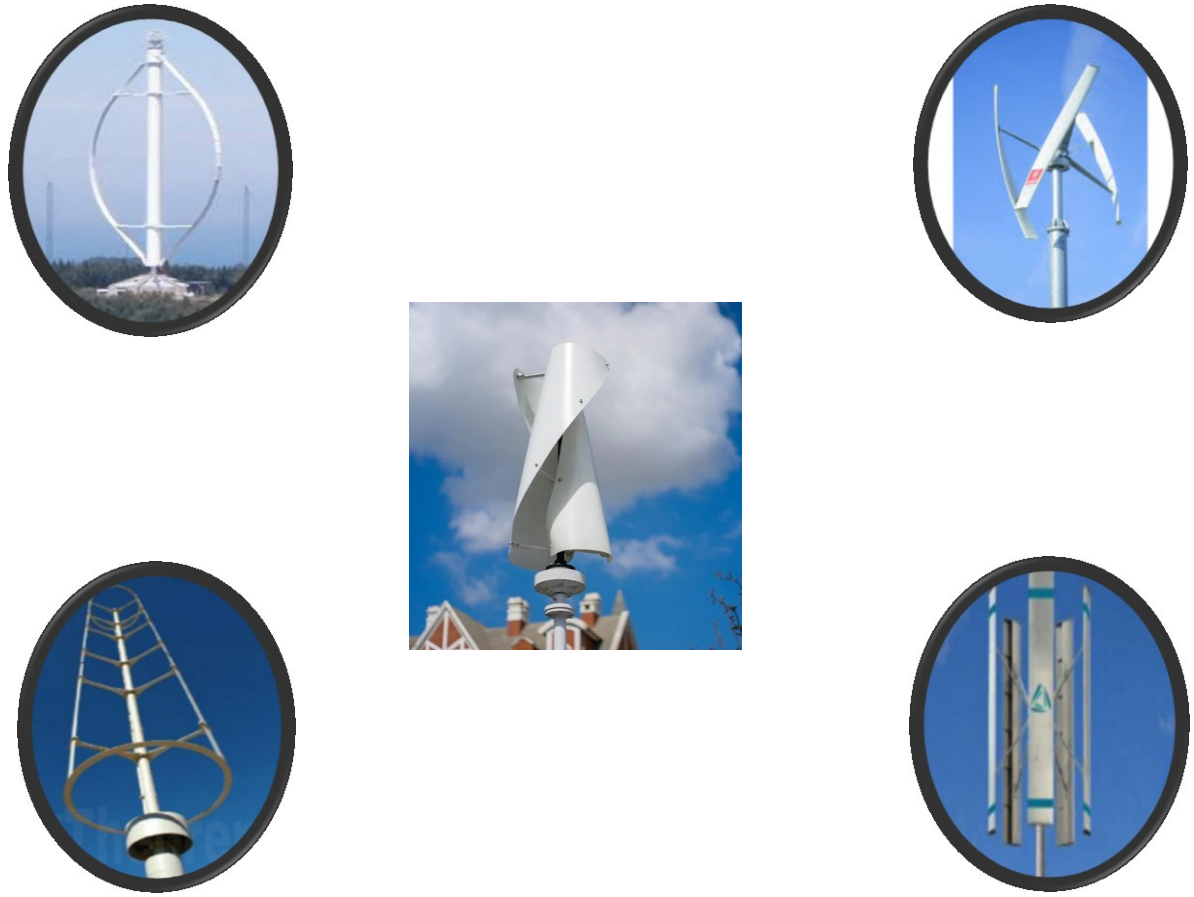


Fig I.25 : Éoliennes à axe vertical (VAWT)[31][32]

### VII.2.1 Les avantages et les inconvénients :

#### A. Les avantages :

- Sécurité pour les travailleurs : Les travailleurs de maintenance n'ont pas à grimper aussi haut pour atteindre certaines parties de la tour. Non seulement les VAWT sont plus courts. Ils ont également des composants majeurs plus proches du sol. L'entretien des générateurs, des boîtes de vitesses et de la plupart des pièces mécaniques et électriques de la structure ne nécessite pas de mise à l'échelle de la tour car elles ne sont pas montées sur le dessus. L'équipement de levage et le matériel d'escalade ne sont pas non plus nécessaires.

## Chapitre 1 : Généralité sur les Systèmes de Conversion D'énergie Eolienne

- Évolutivité : la conception peut être réduite à de petites tailles, même aussi petites que ce qui conviendra à un toit urbain. Dans les villes, il n'y a peut-être pas de place pour toutes les technologies d'énergie renouvelable, mais les turbines verticales offrent une alternative viable aux sources d'énergie à base d'hydrocarbures.
- Moins cher à produire que les turbines à axe horizontal.
- Plus facilement installé par rapport aux autres types d'éoliennes.
- Transportable d'un endroit à un autre.
- Équipé de lames à basse vitesse, réduisant les risques pour les personnes et les oiseaux.
- Fonctionne par temps extrême, avec des vents variables et même des conditions de montagne.
- Autorisé là où les structures plus hautes sont interdites.
- Plus silencieux à utiliser, ils ne dérangent donc pas les habitants des quartiers résidentiels.

### B. Les inconvénients :

Toutes les pales ne produisent pas de couple en même temps, ce qui limite l'efficacité des systèmes verticaux à produire de l'énergie. D'autres lames sont simplement poussées. Il y a aussi plus de traînée sur les pales lorsqu'elles tournent. Bien qu'une éolienne puisse fonctionner dans des rafales de vent, ce n'est pas toujours le cas ; le faible couple de démarrage et les problèmes de stabilité dynamique peuvent limiter la fonctionnalité dans des conditions pour lesquelles la turbine n'a pas été spécifiquement conçue. [18]

Étant donné que les éoliennes sont plus basses que le sol, elles n'exploitent pas les vitesses de vent plus élevées que l'on trouve souvent à des niveaux plus élevés. Si les installateurs préfèrent ériger la structure sur une tour, celles-ci sont plus difficiles à installer de cette manière. Cependant, il est plus pratique d'installer un système vertical sur une base de niveau, comme le sol ou le haut d'un bâtiment.

Les vibrations peuvent parfois être un problème et même augmenter le bruit produit par la turbine. Le flux d'air au niveau du sol peut augmenter la turbulence, augmentant ainsi les vibrations. Cela peut user le roulement. Parfois, cela peut entraîner plus de maintenance et donc plus de coûts qui y sont associés. Dans les modèles précédents, les pales étaient sujettes à se plier et à se fissurer, provoquant la défaillance de la turbine. Les petites unités au sommet de bâtiments ou d'autres structures peuvent être soumises à des forces de bousculade, qui ajoutent

# Chapitre 1 : Généralité sur les Systèmes de Conversion D'énergie Eolienne

des contraintes latérales qui justifient un entretien continu et l'utilisation de matériaux plus solides et plus robustes [33].

## VIII. Les convertisseurs de puissance :

La gamme de convertisseurs statiques disponible pour les machines électriques que ce soit en courant continu ou alternatif, est caractérisée par une grande diversité de montages et de versions (fig.). Cette section présente ceux qui sont d'utilisation courante dans le domaine des énergies éoliennes.

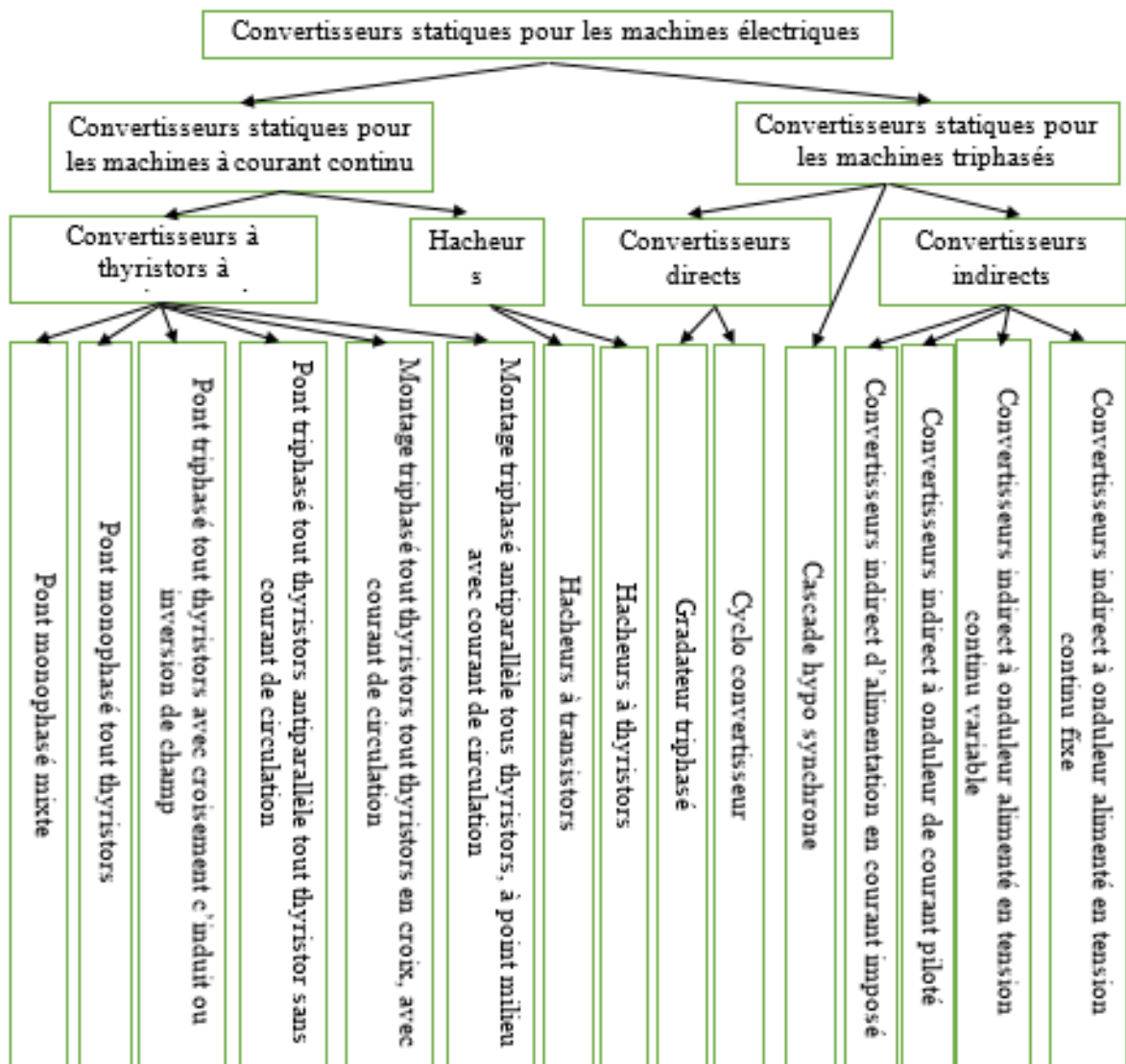


Fig I.26 : classification des convertisseurs statiques pour entrainements électriques.

# Chapitre 1 : Généralité sur les Systèmes de Conversion D'énergie Eolienne

## IX. Conclusion :

Ce chapitre nous a permis de dresser un panel de solutions électrotechniques possibles pour la production d'énergie électrique grâce à des turbines éoliennes. Après un rappel de notions nécessaires à la compréhension du système de conversion de l'énergie éolienne, différents types d'éoliennes et leur mode de fonctionnement ont été décrits. Et par la suite des machines électriques et leurs convertisseurs associés, adaptables à un système éolien ont été présentés. Deux grandes familles de machines sont présentées : machines asynchrones, machines synchrones. Nous avons aussi appris à connaître les types de convertisseur et le plus important L'onduleur et redresseur.

*Chapitre 02 :  
Modélisation  
d'un système  
éolienne*

### I. Introduction :

L'objectif de ce chapitre est de présenter la modélisation de vent et modélisation de turbine et modélisation de la machine synchrone à aimants permanents (MSAP). Ce chapitre est divisé en deux parties : La première partie est consacrée à la modélisation de vent et les type de machine synchrone à aimants permanents la machine synchrone à aimants permanents en fonctionnement à vide ainsi le mode en charge. La deuxième partie est destinée à la modélisation de l'ensemble du convertisseur de redresseur MLI et onduleur commandé.

### II. Modélisation du vent :

Le vent est le mouvement des masses d'air résultant du réchauffement inégal de la surface de la Terre par le Soleil. Ces mouvements de masses d'air sont provoqués par deux phénomènes se produisant simultanément : un réchauffement inégalement repart à la surface de la planète par l'énergie solaire et la rotation de la planète. Jusqu'à environ 100 m de hauteur, l'influence de la surface du sol sur les vents est importante. Ainsi, la rugosité du terrain et les obstacles naturels ou artificiels peuvent freiner les vents. A cette hauteur, le vent devient donc plus fort et plus régulier. Le vent est une variable dans le temps et selon l'endroit. [34]

Il est donc nécessaire de modéliser la vitesse du vent comme une fonction scalaire qui se varie avec le temps [35].

$$V=f(t) \quad (2.1)$$

Elle modélisée par une somme des composantes harmoniques avec la forme :

$$V = V_m + \sum_{n=1}^k a_n \cdot \sin(b_n \cdot \omega_n \cdot t) \quad (2.2)$$

$V_m$  : Valeur moyenne de la vitesse du vent.

$K$  : le Rang du dernier harmonique retenu dans le calcul du profil du vent.

$a_n$  : Amplitude de l'harmonique de l'ordre.

$\omega_n$  : Pulsation de l'harmonique de l'ordre.

Étant donné que les éoliennes à axe vertical ont un couple de démarrage très faible, ainsi que des problèmes de stabilité dynamique, on les trouve couramment dans les petites applications éoliennes. D'autre part, les éoliennes à axe horizontal sont les éoliennes les plus courantes et sont les plus couramment utilisées pour les parcs éoliens, les projets éoliens communautaires et les petites applications éoliennes [36].

### III. Conversion de l'énergie éolienne :

#### III.1 Loi de Betz :

L'expression de l'énergie cinétique d'une masse d'air en mouvement peut être donnée par la relation [37] :

$$E = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (2.3)$$

Cette masse d'air traverse un tube de section A à une vitesse V, le volume d'air V s'écoulant pendant une certaine unité de temps t est appelé débit volumique, il est exprimé par :

$$V = v \cdot s \quad (2.4)$$

Le débit massique pour une densité d'air  $\rho$  :

$$m = \rho \cdot v \cdot s \quad (2.5)$$

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, (Fig.)

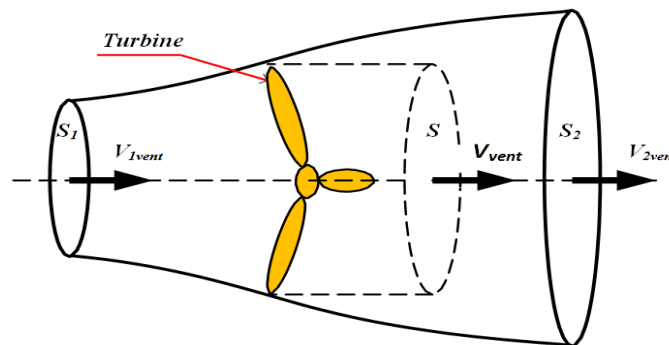


Fig. II.1 : Tube de courant autour d'une éolienne

La puissance de la masse d'air Pv qui traverse la surface équivalente à la surface active S de l'éolienne est donnée par :

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_v^2 \quad (2.6)$$

$\rho$  est la densité de l'air, égale à 1,225 kg/m<sup>3</sup>.

$V_v$  est la vitesse du vent en m/s

La théorie de Betz est une approche simplificatrice découverte en 1920 par le physicien allemand Albert Betz. Elle donne la quantité maximale d'énergie cinétique pouvant être recueillie par une éolienne. Cette quantité est définie par la limite de Betz :

$$P_m = P_{\max} = \frac{16}{27} \cdot P_v = 0.59 \cdot P_v \quad (2.7)$$

Sous cette forme, la formule de Betz montre que l'énergie maximale susceptible d'être recueillie par un aérogénérateur ne peut en aucun cas dépasser 59 % de l'énergie cinétique de

## Chapitre 2 ..... Modélisation d'un système éolienne

la masse d'air qui le traverse par seconde. De cette façon le coefficient de puissance maximal théorique est défini par :

$$C_p^{max} = \frac{P_{max}}{P_v} = \frac{2 \cdot P_{max}}{\rho \cdot S \cdot V_v^3} \leq 0.59 \quad (2.8)$$

En réalité, jusqu'à présent, seulement 60 à 70% de cette puissance maximale théorique peut être exploitée par les engins les plus perfectionnés. Ce rendement, appelé coefficient de puissance  $C_p$  de l'éolienne, est propre à chaque voilure. Ce coefficient lie la puissance éolienne à la vitesse du vent [39] :

$$C_p = \frac{2 \cdot P_{eol}}{\rho \cdot S \cdot V_v^3} \quad (2.9)$$

Pour décrire la vitesse de fonctionnement d'une éolienne, une grandeur spécifique est utilisée :

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_1}{V_v} \quad (2.10)$$

$\lambda$  : Rapport de vitesse (vitesse de l'extrémité des pales sur la vitesse du vent).

$\Omega_1$  : vitesse de rotation avant le multiplicateur.

R : rayon des pales de l'aérogénérateur.

Le coefficient de puissance  $C_p$  ( $\lambda$ ,  $\beta$ ) représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il dépend de la caractéristique de la turbine et de la vitesse du vent. On peut représenter la variation de ce coefficient en fonction du rapport de vitesse  $\lambda$  et l'angle de l'orientation des pales  $\beta$ .

Les meilleures turbines à axe horizontal, bipale ou tripale, se situent à 60-65% de la limite de BETZ, on ne récupère globalement que 40% de l'énergie due au vent. On déduit alors le rendement aérodynamique :

$$\eta = C_p^{max} \leq 0.59 \quad (2.11)$$

### IV. Modélisation de la turbine éolienne :

#### IV.1 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine :

Les modèles les plus fréquemment rencontrés dans le cadre d'étude électromécanique sont relativement simples et obéissent aux hypothèses simplificatrices suivantes [40] :

- La vitesse du vent est supposée à répartition uniforme sur toutes les pales, ce qui permet de considérer l'ensemble des pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de tous les systèmes mécaniques.
- Le coefficient de frottement des pales par rapport à l'air est très faible et peut être négligé.

## Chapitre 2 ..... Modélisation d'un système éolienne

• Les pertes par frottement du rotor turbine sont considérées négligeables par rapport aux pertes par frottement du côté générateur ( $F_c$ ).

Le dispositif mécanique de la turbine, qui sera étudié, est constitué d'une turbine éolienne comprenant trois pales de longueur  $R_t$ , fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse  $\Omega_{tur}$  qui entraîne un générateur à travers un multiplicateur de vitesse de gain  $G$ .

On peut ainsi aboutir à un modèle mécanique plus simple (fig) [40] :

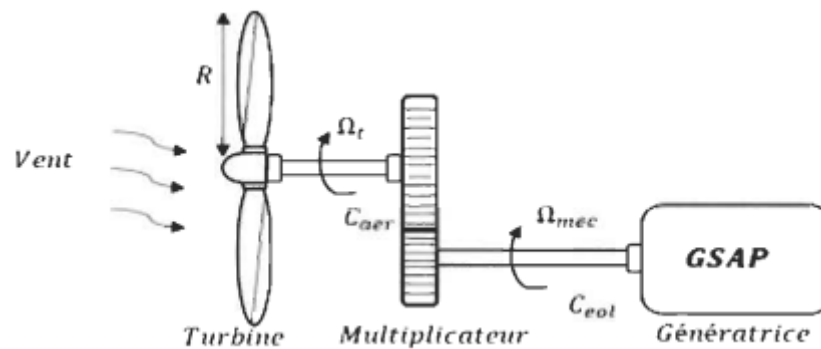


Fig. II.2 : Modèle simplifié de la turbine éolienne.

Où :

$C_{aer}$  : Couple de l'aérogénérateur.

$\Omega_{tur}$  : Vitesse de la turbine.

$J_{tur}$  : Moment d'inertie de la turbine.

$C_g$  : Couple de l'aérogénérateur appliqué sur le générateur.

$\Omega_g$  : Vitesse appliquée sur le générateur.

$J_g$  : moment d'inertie du générateur.

$f$  : Coefficient de frottement visqueux.

### IV.1.1 Modèle de la turbine :

La figure présente une turbine éolienne avec trois pales de longueur  $R$ , tourne sous la force du vent  $v$  pour entraîner une génératrice synchrone à une vitesse mécanique  $\Omega_{méc}$  par l'intermédiaire d'un multiplicateur de gain  $G$ .

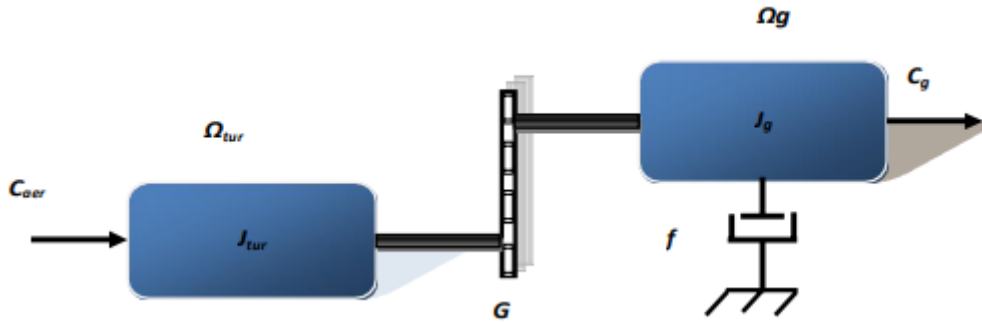


Fig. II.3 : Schéma de la turbine éolienne

Selon l'équation (6) :

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_v^2$$

Cette formule présente la puissance éolienne ou la puissance du vent, qui est la quantité d'énergie extraite lors de la circulation du vent dans une surface \$S\$, avec une vitesse \$V\$.

\$\rho\$ : la densité de l'air en Kg/m<sup>3</sup> (généralement \$\rho = 1.225\$ kg/m<sup>3</sup>, pour les conditions atmosphériques ).

Cette puissance va transmettre à l'arbre de la génératrice en puissance aérodynamique ou en puissance de turbine, elle est donnée par :

$$P_{tur} = P_v \cdot C_p = \frac{1}{2} \cdot C_p(\alpha, \beta) \cdot \rho \cdot S \cdot V_v^2 \dots \dots \dots (2.12)$$

Nous avons vu dans le chapitre précédent que \$C\_p\$ est le coefficient de puissance ou de performance, il représente le rapport entre la puissance éolienne et la puissance de la turbine :

$$C_p = \frac{P_v}{P_{tur}} \quad (2.13)$$

Selon la loi de Betz, ce coefficient ne peut jamais dépasser la valeur de 16/27 et il est donné dans la plupart des études en fonction \$\lambda\$, qui est le ratio de la vitesse de la génératrice et la vitesse du vent et \$\beta\$ l'angle de calage (Pitch angle), où \$\lambda\$ est donnée par l'équation :

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_{tur}}{V_v} \quad (2.14)$$

Avec \$\Omega\_{tur}\$ qui est la vitesse de la génératrice en rd/s.

Le coefficient de puissance de la turbine est souvent déterminé après des essais empiriques, il dépend essentiellement de la vitesse du vent et des caractéristiques de la turbine éolienne elle-même. Plusieurs littératures ont présenté la variation du coefficient de puissance \$C\_p\$ par la formule :

$$C_p(\lambda) = a_0 + a_1 \lambda + a_2 \lambda^2 + a_3 \lambda^3 + a_4 \lambda^4 + a_5 \lambda^5 \quad (2.15)$$

$$C_p(\lambda) = C_1 \left( \frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \cdot \beta - C_4 \right) e^{\frac{-C_5}{\lambda_i}} + C_6 \cdot \lambda \quad (2.16)$$

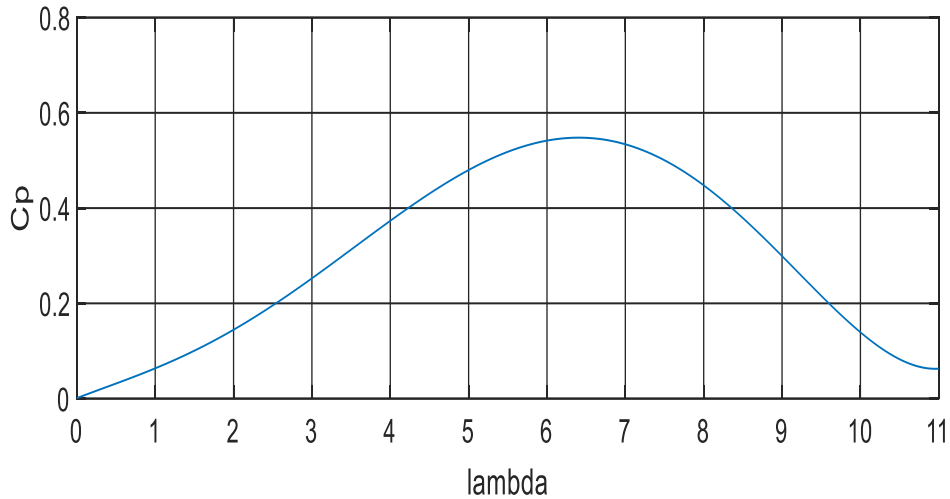
Avec :

## Chapitre 2 ..... Modélisation d'un système éolienne

$$\lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}} \quad (2.17)$$

$C_1, C_2, C_3, C_4, C_5$  et  $C_6$  sont des coefficients liés aux caractéristiques de la turbine, ils sont donnés pour les turbines de grande puissance comme suit [41] :

Tableau : Caractéristiques de la turbine éolienne.



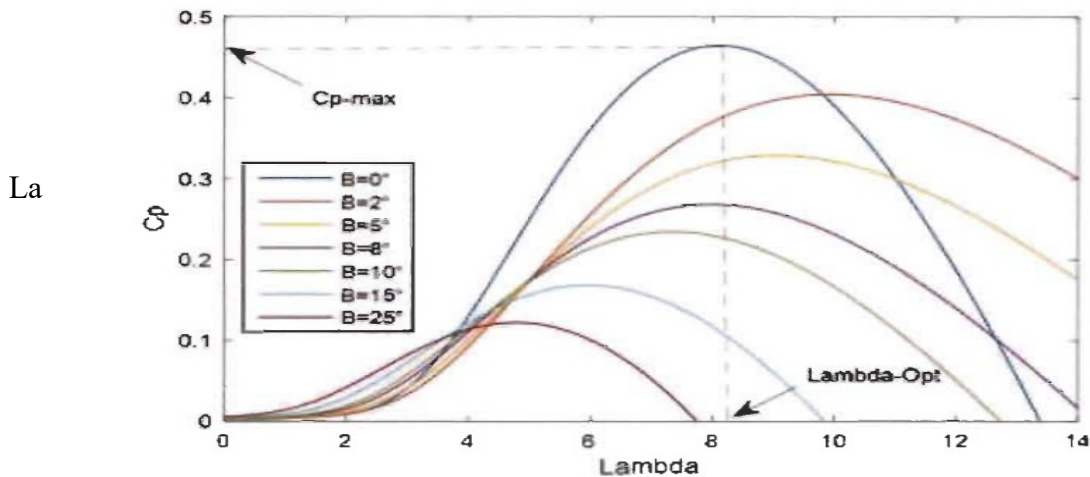
**Fig. II.4** : Coefficient de puissance en fonction de lambda (avec  $\beta = 0^\circ$ )

$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$
0.5176	116	0.4	5	21	0.0068

**Tableau II.1** : coefficients liés aux caractéristiques de la turbine.

Courbe de puissance avec l'angle de calage  $\beta = 0^\circ$

Courbe de puissance avec différentes valeurs de  $\beta$  :



**Fig. II.5** :  $C_p$  en fonction de lambda (avec différentes valeurs de  $\beta$ ).

## Chapitre 2 ..... Modélisation d'un système éolienne

figure présente la courbe du coefficient de puissance de la turbine éolienne  $C_p'$  en fonction de la vitesse spécifique  $\lambda$ , avec le changement de l'angle de calage  $\beta$ . La première remarque qui peut être apportée est la diminution du coefficient de puissance  $C_p$  avec l'augmentation de l'angle de calage, où avec  $\beta=0$  le coefficient de puissance  $C_p$  est maximal et égal à  $C_{p\text{-max}}=0.48$ , cependant à  $\beta=8^\circ$  par exemple,  $C_p = 0.27$ . La deuxième remarque est qu'avec un angle de calage  $\beta=2^\circ$ , nous observons que la courbe de puissance couvre une large gamme de vitesse, avec un coefficient  $C_p=0.4$  ; cette courbe est convenable pour les éoliennes à vitesse variable qui fonctionnent sous une large gamme de vitesse de vent.

### IV.1.2 Modèle du multiplicateur :

Le rôle du multiplicateur est de transformer la vitesse mécanique de la turbine en vitesse du générateur plus élevée, et le couple aérodynamique en couple du multiplicateur d'une valeur moins que le précédent, selon les formules mathématiques suivantes [40] :

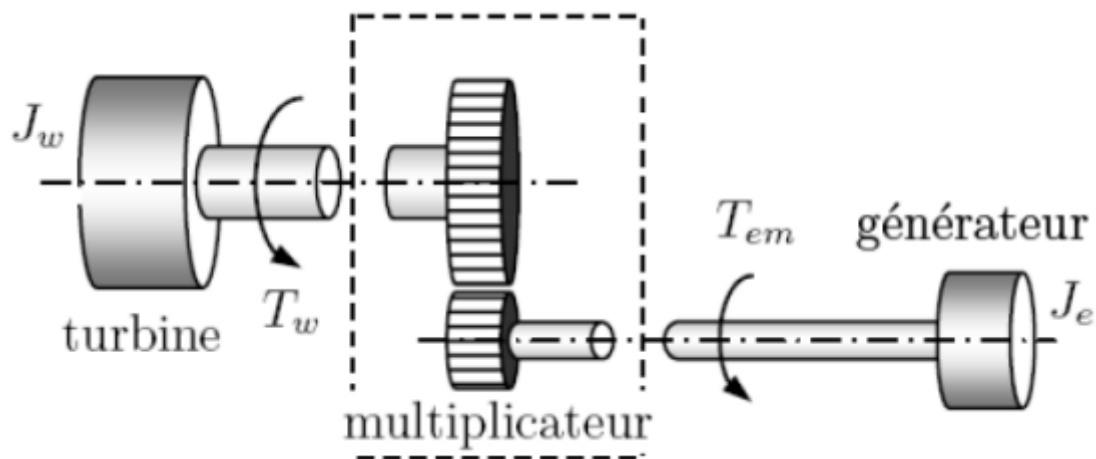


Fig. II.6 : Schéma du système éolien. [42]

$$\Omega_{\text{mec}} = G \cdot \Omega_{\text{tur}}$$

Où :

$\Omega_{\text{mec}}$  : est la vitesse angulaire de rotation de la génératrice (rad /s) ou (tr/mn).

Le couple mécanique de la turbine éolienne est divisé par le rapport de multiplicateur pour obtenir le couple mécanique sur l'arbre du générateur.

$$C_{\text{mec}} = 1/G \cdot C_{\text{aer}}$$

Où :

$G$  : rapport de multiplication.

$C_{\text{mec}}$  : Couple mécanique sur l'axe du générateur en (N. m). [42]

IV.1.3 Modèle de l'arbre mécanique :

Sur la figure est illustré le couplage mécanique de la chaîne éolienne, basé sur le Modèle à deux masses, où apparaissent :

- Le couple moteur développé par la turbine  $T_{aero}$ .
- Le couple électromagnétique de la GADA  $T_{em}$ , opposant le couple de la turbine.
- L'inertie des deux parties ( $J_t, J_g$ ), simulant les deux masses.

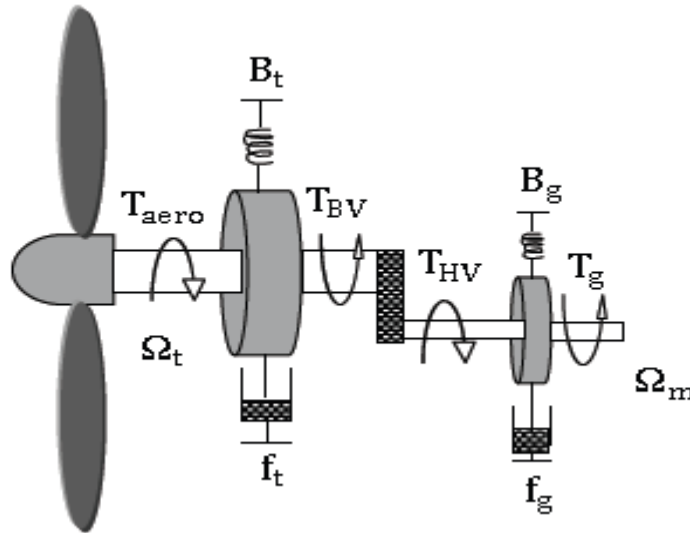


Fig. II.7 : schéma de transmission mécanique à une masse ramené sur l'arbre rapide  
En prenant en compte les coefficients de rigidité et d'amortissement des deux masses, les équations décrivent le comportement dynamique de l'arbre mécanique :

$$\begin{cases} J_t \dot{\Omega}_t = T_{aero} - F_t \Omega_t - B_t \theta_t - T_{BV} \\ J_g \dot{\Omega}_m = T_{HV} - F_g \Omega_m - B_g \theta_g - T_{em} \end{cases} \quad (2.18)$$

En utilisant les équations (2.7) et en négligeant la rigidité du system l'expression de la Dynamique de l'arbre devient alors :

$$J \dot{\Omega}_m = T_g - f \Omega_m - T_{em} \quad (2.19)$$

$$\begin{cases} J = \frac{J_t}{G_t^2} + J_g \\ F = \frac{F_t}{G_t^2} + J_g \\ T_G = \frac{F_{aero}}{G_t} \end{cases}$$

Où le multiplicateur de vitesse, disposé entre la turbine et la génératrice a pour but d'adapter La vitesse de la turbine  $\Omega_m$  assez lente, à celle que nécessite la génératrice  $\Omega$ .

Il est modélisé par l'équation suivante :

$$G_t = \frac{\Omega_m}{\Omega_t} = \frac{T_{BV}}{T_{HV}} \quad (2.20)$$

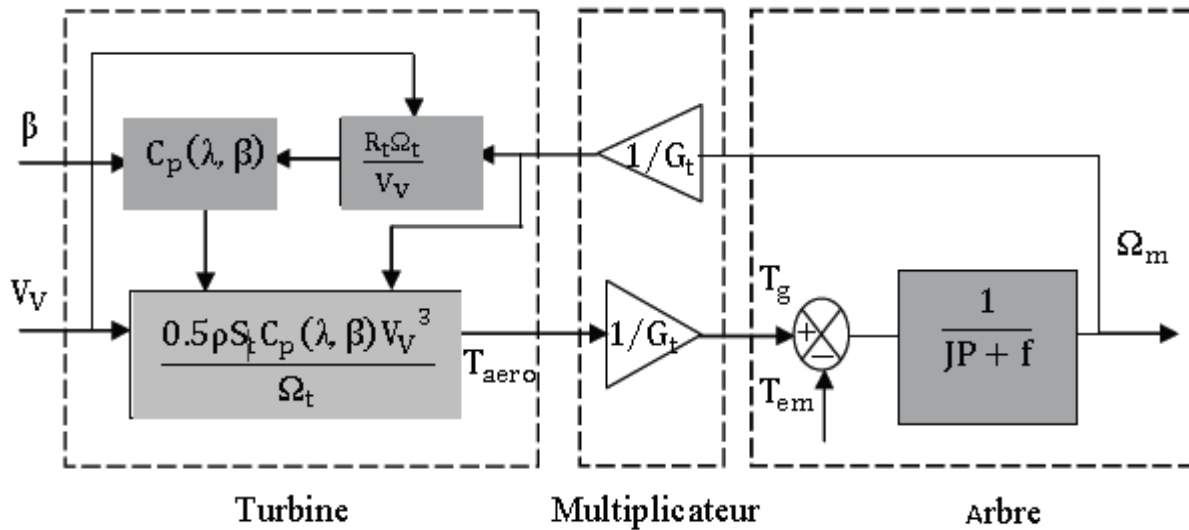


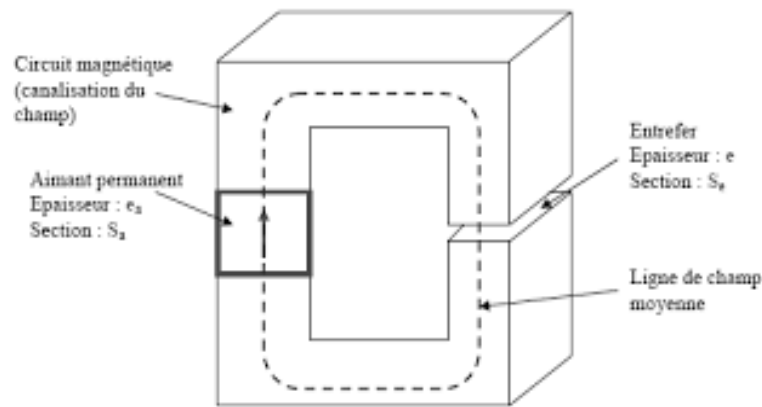
Fig. II.8 : Schéma bloc du modèle de la turbine. [43]

**V. Modèle de la machine synchrone à aimants permanents :**

Grâce aux nombreux avantages qu'elle a par rapport aux autres types de machines électriques (maintenance, prix), la machine synchrone à aimants permanents est intéressante pour l'utilisation comme génératrice couplée à une turbine éolienne. Le modèle mathématique de la machine synchrone à aimants permanents obéit à certaines hypothèses essentielles simplificatrices [44] :

- L'absence de saturation dans le circuit magnétique.
- La distribution sinusoïdale de le FMM créée par les enroulements du stator.
- L'hystérésis est négligée avec les courants de Foucault et l'effet de peau.
- L'effet d'encochage est négligeable.
- La résistance des enroulements ne varie pas avec la température.

Les matériaux utilisés pour leurs propriétés magnétiques se classent en fonction de la largeur de leur cycle d'hystérésis et forment deux grandes familles. Le premier est celle des matériaux magnétiques durs (à large cycle), appelés communément « aimants permanents » car leur aimantation ne varie pas sous l'effet d'un champ magnétique extérieur. La seconde est celle des matériaux magnétiques dits « doux » qui ne manifestent de propriétés magnétiques qu'en présence d'une excitation externe [45].



**Fig. II.9** : Circuit magnétique associé à un aimant [46].

### V.1 Matériaux pour aimants :

Selon les matériaux utilisés dans les aimants, on distingue deux types d'aimants permanents.

- ❖ Aimants « rigides » ou durs : bien adaptés aux aimants modernes à cause des caractéristiques linéaires.
- ❖ Aimants « peu rigides » : Leurs caractéristiques non linéaires et les représentations associées sont plus complexes que celles des aimants rigides [44].

On peut distinguer trois grandes catégories de matériaux utilisés pour la réalisation d'aimants:-

Les Alnicos : sont les alliages de fer, d'aluminium, de nickel, et de cobalt. Leur champ rémanent est élevé, mais leur excitation coercitive est faible. Sensibles aux champs antagonistes, leur part de marché est assez réduite et leur coût est moyen [47].

Les ferrites : sont des composés d'oxyde de ferrique et d'oxyde de strontium ou de baryum. Leur champ rémanent n'est pas très élevé, mais leur excitation coercitive est importante. Leur faible coût fait que les ferrites occupent aujourd'hui la majorité du marché des aimants.

- Les composés de cobalt et de terres rares, comme le samarium. Ces matériaux ont d'excellentes performances techniques. Leur champ rémanent et leur excitation Coercitive sont élevés, leur inconvénient reste le coût important.

Modélisation d'un aimant « rigide » :

Un aimant permanent est en général associé à un circuit magnétique pour créer un champ dans l'entrefer.

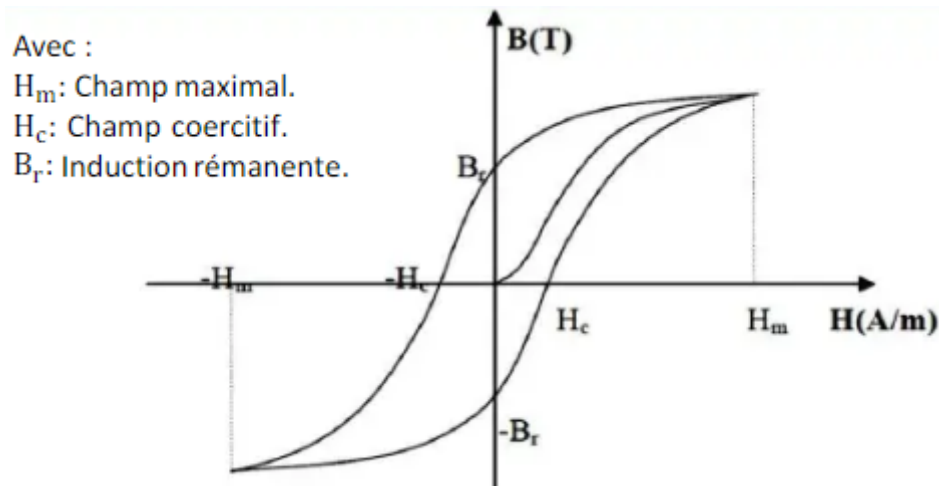


Fig. II.10 : Cycle d'hystérésis.

La perméabilité des pièces de matériau ferromagnétique étant très élevée, la reluctance de ces tronçons de circuit magnétique est négligeable devant celle de l'entrefer Soient :

$e_a$  : la longueur de l'aimant,  $e$  : la largeur de l'entrefer,  $H$  l'excitation magnétique dans l'aimant et  $H_e$  l'excitation magnétique dans l'entrefer (mesures algébrique) .Le théorème d'Ampère donne [44] :

$$H \cdot e_a + H_e = 0 \quad (2.21)$$

Par ailleurs si  $S_a$  et  $S_e$  sont les sections de l'aimant et l'entrefer, la conservation du flux s'écrit :

$$B \cdot S_a = B_e \cdot S_e \quad (2.22)$$

$B$  : L'induction magnétique de l'aimant.

$B_e$  : L' induction magnétique de l'entrefer, donné par :

$$B_e = \mu_e H_e \quad (2.23)$$

$\mu_0$  : est la perméabilité relative de l'entrefer.

A partir des trois équations précédentes on déduit la relation :

$$B = - \mu_0 \frac{S_e e_a}{S_a e} H \quad (2.24)$$

## V.2 Présentation de la machine synchrone à aimants permanents :

Les chaînes de conversion d'énergie associées utilisent souvent un générateur synchrone à aimants permanents. Dans le cadre de notre étude, nous disposons aussi d'une machine spécialement conçue pour être employée dans un ensemble éolien à axe vertical de type Savonius. Il s'agit d'une machine synchrone WR-02 (voir annexe A) présentée sur le schéma de la [39].

## Chapitre 2 ..... Modélisation d'un système éolienne

Cette machine multipôle est à aimants permanents et à rotor extérieur. Compte tenu de la gamme de vitesse de rotation de l'éolienne, le nombre élevé de pôles sert à obtenir une fréquence électrique suffisante sans avoir recours au multiplicateur mécanique, ce qui permet de réduire les pertes mécaniques et d'augmenter la durée de vie du système. La génératrice est conçue pour un fonctionnement vertical ayant un rôle de support de la voile ; elle est équipée d'un jeu de roulements internes adaptés. Le mât supportant l'ensemble machine –voilure sert aussi de dissipateur de chaleur en provenance du stator bobiné [44].

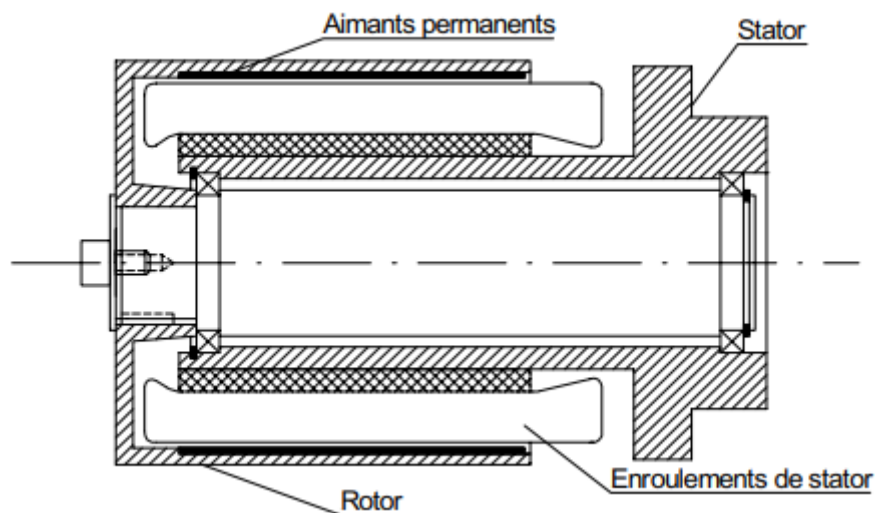


Fig. II.11 : Construction mécanique de la machine synchrone à aimants permanents MSAP.

### VI. Les avantages et les inconvénients de MSAP :

La machine synchrone à aimants permanents possède plusieurs avantages et inconvénients par rapport aux autres machines à courant continu, asynchrone, synchrone à excitation électrique [48].

#### VI.1 Les avantages :

On cite les avantages suivants :

- rendement et facteur de puissance élevés.
- Puissance massique important.
- Une capacité à fonctionner à haute, voire très haute vitesse.
- Augmentation de la fiabilité.
- Absences des contacts glissants.

#### VI.2 les inconvénients :

Comme inconvénients on indique :

- Ondulation de couple, coût élevé des aimants, technologie coûteuse, survitesse pénalisante.

## Chapitre 2 ..... Modélisation d'un système éolienne

- Risque de désaimantation (irréversible) : limite de température maximale.
- Interaction magnétique due au changement de structure.
- Pertes par courants de Foucault dans les aimants.

### VII. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents :

Afin de modéliser la MSAP, on adopte les hypothèses simplificatrices usuelles données dans la majorité des références : Le moteur possède une armature symétrique non saturée ce qui permet d'exprimer les flux comme fonctions linéaires des courants et une distribution sinusoïdale de la FMM créée par enroulements au stator [49].

Pour le système d'axe de référence au stator abc : la phase (a) est choisie de sorte que la force magnétomotrice est maximale avec l'application d'un courant positif maximal à cette phase. Les axes de références de la phase (b) et (c) sont fixés à  $120^\circ$  et  $240^\circ$  en avance de l'axe (a). Le système d'axe de référence au rotor d-q est choisi de sorte que le flux de magnétisation est en phase avec l'axe d. L'axe q est fixé à  $90^\circ$  en avance de cet axe. L'angle séparant l'axe (d) au rotor et l'axe (a) au stator représente la position électrique du rotor de la machine  $\theta = p \cdot \theta_r$ , Le système d'axe de référence lié au rotor d-q tourne à la vitesse  $\omega = p \cdot (d\theta_r/dt)$  tandis que le système d'axe de référence au stator abc reste fixe, où  $\omega$  est la fréquence électrique du système. La relation qui relie la fréquence électrique  $\omega$  et la vitesse de rotation mécanique du rotor  $\omega_r$  présentée par l'expression suivante  $\omega_r = \omega / p$  où  $p$  est le nombre de paires de pôles de la machine [46] [49].

#### VII.1 Les hypothèses simplificatrices :

Le modèle de la machine synchrone à aimants permanents est beaucoup plus complexe que celui des machines à courant continu, il nécessite l'utilisation des lois de commandes de plus en plus performantes, et par voie de conséquence leur commande se verra plus complexe, du fait que[50]:

- Les grandeurs sont alternatives, à fréquence fixe ou variable.
- Le système est non linéaire à coefficients variables et à entrées et sorties multiples.

Le modèle établi au système lors de son fonctionnement, est basé sur des phénomènes physiques qui peuvent être partiellement ou totalement pris en compte. Le modèle sera plus simple pour un nombre d'hypothèses plus grand. Dans le cas de la MSAP, la modélisation est dépendante des hypothèses simplificatrices suivantes [51] :

- ❖ La bobine de stator connectée en étoile, neutre dans l'air pour éliminer l'élément homopolaire des courants.

## Chapitre 2 ..... Modélisation d'un système éolienne

- ❖ La saturation du circuit magnétique est négligée, elle aboutit à l'expression des flux magnétiques en tant que fonctions linéaires des courants des phases.
- ❖ La distribution de la FMM dans l'entrefer est sinusoïdale, les harmoniques d'espace sont alors négligés.
- ❖ Les pertes par hystérésis et par courants de Foucault sont négligées.
- ❖ L'effet de peau et de la température est négligé.

### VII.2 Equations électriques et magnétiques de la machine :

La machine synchrone à aimants permanents est constituée par trois bobinages statoriques qui constituent les trois phases, et des aimants au rotor distribués en 17 paires de pôles. Les flux créés par les aimants permanents sont de forme sinusoïdale le long de l'entrefer [52].

- Au stator : trois enroulements a, b, c décalés entre eux de  $2\pi/3$  électriques.
- Au rotor : un inducteur à aimants permanents.

La figure montre la représentation de la MSAP dans le repère triphasé.

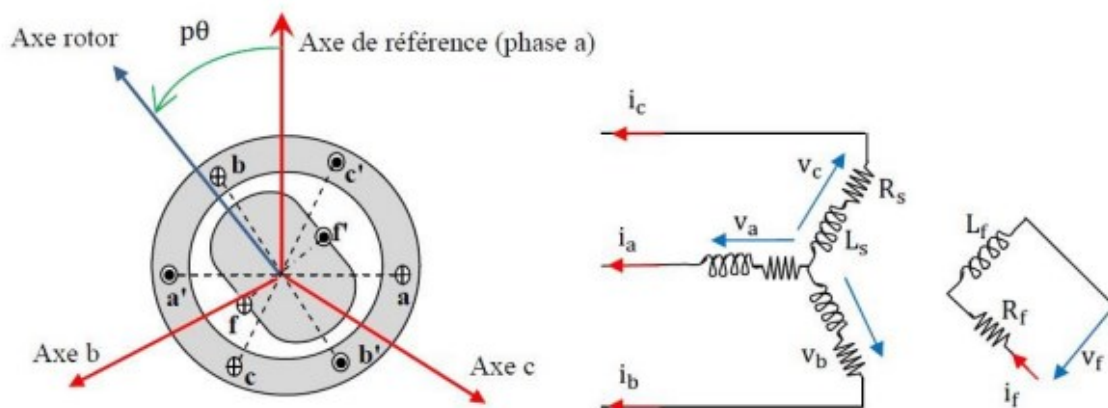


Fig. II.12 : Représentation symbolique de la machine synchrone.

$$\frac{d\varphi}{dt} = V - R \cdot i \quad (2.25)$$

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_s}{dt} = V_s - R_s i_s \\ \frac{d\varphi_r}{dt} = V_r - R_r i_r \end{cases}$$

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

Pour le stator :

$$\begin{cases} V_{sa} = R_s \cdot i_{sa} + \frac{d\varphi_{sa}}{dt} \\ V_{sb} = R_s \cdot i_{sb} + \frac{d\varphi_{sb}}{dt} \\ V_{sc} = R_s \cdot i_{sc} + \frac{d\varphi_{sc}}{dt} \end{cases} \quad (2.26)$$

## Chapitre 2 ..... Modélisation d'un système éolienne

Pour le rotor :

$$\begin{cases} V_{ra} = R_r \cdot i_{ra} + \frac{d\varphi_{ra}}{dt} \\ V_{rb} = R_r \cdot i_{rb} + \frac{d\varphi_{rb}}{dt} \\ V_{rc} = R_r \cdot i_{rc} + \frac{d\varphi_{rc}}{dt} \end{cases} \quad (2.27)$$

Écriture sous une forme matricielle :

$$[Vs] = [Rs] [Is] + \frac{d}{dt}[\varphi s] \quad (2.28)$$

$$[Vr] = [Rr] [Ir] + \frac{d}{dt}[\varphi r] \quad (2.29)$$

Avec :

$$[Vs] = \begin{bmatrix} Vsa \\ Vsb \\ Vsc \end{bmatrix} \quad [Is] = \begin{bmatrix} Isa \\ Isb \\ Isc \end{bmatrix} \quad [\varphi s] = \begin{bmatrix} \varphi sa \\ \varphi sb \\ \varphi sc \end{bmatrix}$$

$$[Vr] = \begin{bmatrix} Vra \\ Vrb \\ Vrc \end{bmatrix} \quad [Ir] = \begin{bmatrix} Ira \\ Irb \\ Irc \end{bmatrix} \quad [\varphi r] = \begin{bmatrix} \varphi ra \\ \varphi rb \\ \varphi rc \end{bmatrix}$$

$$[Rs] = \begin{bmatrix} Rs & 0 & 0 \\ 0 & Rs & 0 \\ 0 & 0 & Rs \end{bmatrix} \quad [Rr] = \begin{bmatrix} Rr & 0 & 0 \\ 0 & Rr & 0 \\ 0 & 0 & Rr \end{bmatrix}$$

Les équations électriques en notation matricielle deviennent :

Pour le stator :

$$\begin{bmatrix} Vsa \\ Vsb \\ Vsc \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Rs & 0 & 0 \\ 0 & Rs & 0 \\ 0 & 0 & Rs \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Isa \\ Isb \\ Isc \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi sa \\ \varphi sb \\ \varphi sc \end{bmatrix}$$

Pour le rotor :

$$\begin{bmatrix} Vra \\ Vrb \\ Vrc \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Rr & 0 & 0 \\ 0 & Rr & 0 \\ 0 & 0 & Rr \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Ira \\ Irb \\ Irc \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi ra \\ \varphi rb \\ \varphi rc \end{bmatrix}$$

$[Vs]$  ,  $[Vr]$  : Sont les vecteurs de tensions statorique et rotoriques.

$[Is]$  ,  $[Ir]$  : Sont les vecteurs de courants statorique et rotoriques.

$[\varphi s]$  ,  $[\varphi r]$  : Sont les vecteurs de flux statorique et rotoriques.

$[Rs]$  ,  $[Rr]$  : sont les matrices des résistances statorique et rotoriques.

### VII.3 Transformation de PARK :

La transformation de Park consiste à transformer un système d'enroulements triphasés d'axes a, b, c, en un système équivalent à deux enroulements biphasés d'axes d, q créant la même force

## Chapitre 2 ..... Modélisation d'un système éolienne

magnétomotrice. La composante homopolaire intervient pour équilibrer le système transformé, c'est-à-dire, elle ne participe pas à la création de cette fmm de sorte que l'axe homopolaire peut être choisi orthogonal au plan (d, q). La condition de passage du système triphasé au système biphasé est la création d'un champ électromagnétique tournant avec des forces magnétomotrices égales. Ceci conduit à la conservation de puissances instantanées et la réciprocité des inductances mutuelles, et permet d'établir une expression du couple électromagnétique dans le repère correspondant au système transformé, qui reste invariable pour la machine réelle. Le schéma de la figure montre le principe de la transformation de Park appliquée à la machine synchrone à aimant permanent [53].

$$\begin{bmatrix} Xd \\ Xq \\ X0 \end{bmatrix} = P(0) \begin{bmatrix} Xa \\ Xb \\ Xc \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

La variable X Peut correspondre aux : tension, courant ou un flux.

Le système matriciel les courants dans le repère (d q) sont obtenus :

$$\begin{bmatrix} Id \\ Iq \\ I0 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} n_1 \\ n_2 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{4\pi}{3}) \\ K0 & K0 & K0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Ia \\ Ib \\ Ic \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

$\frac{n_1}{n_2} = \sqrt{\frac{2}{3}}$  et  $ko = \frac{1}{2}$  dans ce cas des courants sinusoïdaux :

Donc La transformation de Park est donnée :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

Et inversement, pour passer des équations dans le plan de Park aux équations dans le plan abc on utilise la transformation de Park inverse qui est donnée par :

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{2} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{2} \\ \cos(\theta + \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

### VIII. Modélisation de la MSAP dans le repère de d, q :

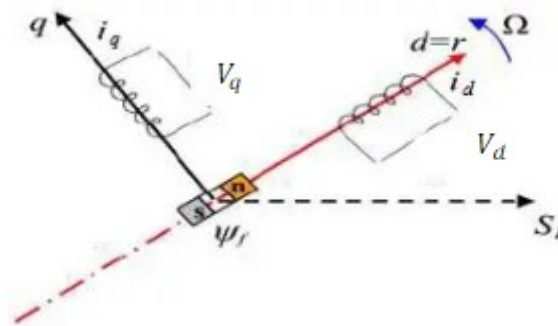
#### VIII.1 Transformation de Park :

## Chapitre 2 ..... Modélisation d'un système éolienne

La transformation de Park est nécessaire pour la résolution numérique des équations, surtout le calcul de la matrice des inductances statorique pour la détermination des flux. Elle permet d'obtenir un système équivalent forme de trois enroulements orthogonaux (du point de vue électrique et magnétique), situés dans le même plan que les enroulements statorique triphasés. Les enroulements orthogonaux issus de la transformation sont présentés à la figure [54].

En appliquant la transformation de Park au système d'équations, on peut exprimer tous les vecteurs dans un repère lié au rotor.

Pour passer du système triphasé au biphasé on utilise les relations suivantes :



**Fig. II.13** : Représentation de la MSAP dans le repère (d, q) de Park.

$$[V_d \ V_q] = P(\Theta) [V_a \ V_b \ V_c] \quad (2.34)$$

$$[I_d \ I_q] = P(\Theta) [I_a \ I_b \ I_c] \quad (2.35)$$

$$[\varphi_d \ \varphi_q] = P(\Theta) [\varphi_a \ \varphi_b \ \varphi_c] \quad (2.36)$$

Après développement des équations, on obtient un système d'équation simplifiée de la machine synchrone, où les équations de tension sont données par :

### 1. Equations électriques :

$$V_d = R_s i_d + \frac{d}{dt} \varphi_d - P \omega \varphi_q \quad (2.37)$$

$$V_q = R_s i_q + \frac{d}{dt} \varphi_q + P \omega \varphi_d \quad (2.38)$$

### 2. Equation de flux magnétique :

$$\varphi_d = L_d i_d \varphi_f \quad (2.39)$$

$$\varphi_q = L_q i_q \quad (2.40)$$

En remplaçant les expressions des flux  $\varphi_d$  et  $\varphi_q$  dans les équations électrique nous obtenons :

$$V_d = R_s i_d + \frac{d}{dt} \varphi_d - P \omega L_q i_q \quad (2.41)$$

$$V_q = R_s i_q + \frac{d}{dt} \varphi_q + P \omega L_d i_d \varphi_f \quad (2.42)$$

## Chapitre 2 ..... Modélisation d'un système éolienne

$i_d i_q$ : Courants statorique de le repère de Park [A].

$V_d V_q$ : Tensions statorique de le repère de Park [V].

$R_s$ : Résistance statorique [ $\Omega$ ].

$L_d$ : Inductance cyclique statorique [H].

$P$  : Nombre de pair de pôles de la machine synchrone.

$\omega$ : Pulsation des tensions [rad/s].

Les tensions étant les grandeurs d'entrée, on peut exprimer les grandeurs de sortie (les courants) en fonction de celles-ci. On obtient alors :

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_s} (V_q - R_s i_q - L_q P \omega i_d - \varphi_f P \omega) \quad (2.43)$$

En les exprimant sous forme matricielle, on a :

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} = \frac{1}{L_s} \left[ \begin{pmatrix} V_d \\ V_q \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} R_s & -L_s P \omega \\ L_s P \omega & R_s \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ \varphi_f P \omega \end{pmatrix} \right] \quad (2.44)$$

### 3. Expressions du couple électromagnétique :

Pour compléter le modèle électromécanique de la MSAP, on doit ajouter l'expression du couple électromagnétique ainsi que l'équation mécanique [55].

L'expression du couple électromagnétique est exprimée par :

$$C_{em} = \frac{3}{2} P (L_d L_q) i_d i_q + i_q \varphi_f \quad (2.45)$$

Notre génératrice synchrone est à pole lisse, c'est-à-dire  $L_d = L_q$  alors l'expression de couple devient :

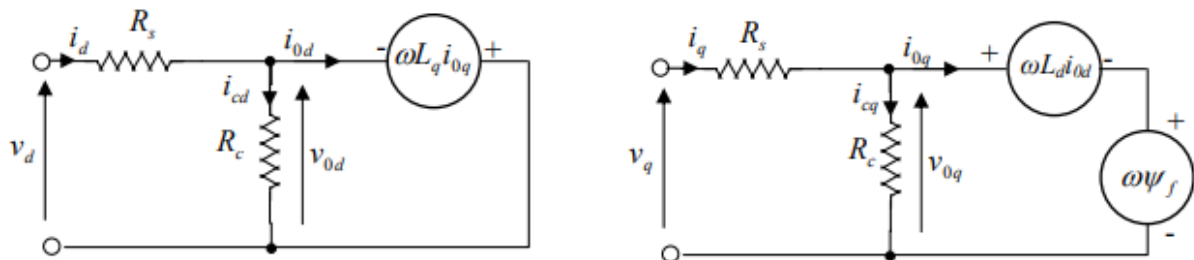
$$C_{em} = \frac{3}{2} P i_q \varphi_f \quad (2.46)$$

L'équation mécanique est donnée par l'expression suivante :

$$J \frac{d\omega}{dt} - f_m \omega = C_t - C_{em} \quad (2.47)$$

Notons  $\omega_t = \omega$  que pour entrainer une MSAP par la turbine éolienne.

### VIII.2 Circuit équivalent de la MSAP :



Les circuits électriques équivalents de la MSAP peuvent être représentés comme suit :

L'équation de la dynamique de la MSAP est donnée comme suit [56] :

Fig. II.14 : Schéma de circuits électriques équivalents de la MSAP.

$$J_m \frac{d\varphi_m}{dt} = C_{em} - C_m - f_m \varphi_m \quad (2.48)$$

### IX. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents en convection génératrice :

En utilisant la convention génératrice ; on inverse le sens des courant  $i_d$  et  $i_q$  dans les repères de Park (**figure**), et le modèle de la génératrice synchrone à aimants permanents ainsi obtenu peut s'écrire sous la forme [56].

$$V_d = -R_s i_d + L_d \frac{d}{dt} I_d - \omega L_q I_q \quad (2.49)$$

$$V_q = -R_s i_q + L_q \frac{d}{dt} I_q + \omega L_d I_d + \omega \varphi_f \quad (2.50)$$

#### IX.1 Modélisation à vide de la GSAP :

Pour la génératrice à vide les courants statorique sont nulles :

$$\begin{cases} I_d = 0 \\ I_q = 0 \end{cases} \quad (2.51)$$

Les expressions des tensions et du couple deviennent :

$$\begin{cases} V_d = 0 \\ V_q = \omega \cdot \varphi_f \\ C_{em} = 0 \end{cases} \quad (2.52)$$

#### IX.2 Modélisation en charge de la GSAP :

Dans notre cas d'étude, on modélise la génératrice en charge, pour cela on suppose que la génératrice alimente une charge électrique ( $R_{ch}$ ,  $L_{ch}$ ), pour avoir les tensions et les courants résultants de l'application de cette charge sur la génératrice , on applique d'une part, les tensions  $V_d$  et  $V_q$  données par:

$$V_d = R_{ch} i_d + L_{ch} \frac{d}{dt} I_d - \omega L_{ch} I_q \quad (2.53)$$

$$V_q = R_{ch} i_q + L_{ch} \frac{d}{dt} I_q + \omega L_{ch} I_d \quad (2.54)$$

En remplaçant les expressions de  $V_d$  et  $V_q$  dans les équations (III-25) et (III-26), on aura les systèmes suivant :

$$V_d = -(R_s + R_{ch}) i_d + (L_d + L_{ch}) \frac{d}{dt} I_d - \omega (L_d + L_{ch}) I_q \quad (2.55)$$

$$V_q = -(R_s + R_{ch}) i_q + (L_q + L_{ch}) \frac{d}{dt} I_q + \omega (L_q + L_{ch}) I_d + \omega \varphi_f \quad (2.56)$$

## Chapitre 2 ..... Modélisation d'un système éolienne

En introduisant le modèle d'état dans les équations ci-dessus, elles deviennent :

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{1}{(L_d+L_{ch})} [-(R_s + R_{ch})i_d + \omega (L_d+L_{ch})I_q] \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{1}{(L_{dq}+L_{ch})} [-(R_s + R_{ch})i_q + \omega (L_q+L_{ch})I_d + \omega \varphi_f] \end{cases} \quad (2.57)$$

### X. La commande MLI :

Le principe de la technique de modulation de largeur d'impulsion est basé sur la comparaison d'un signal dit la modulante et un autre dit la porteuse.

La technique choisie pour la commande de nos convertisseurs est la M.L.I sinustriangle car elle permet d'éliminer les harmoniques et l'obtention d'un bon rendement. Elle est basée sur la comparaison d'un signal triangulaire de grande fréquence et d'un signal sinusoïdal de la même fréquence que le signal de référence que l'on souhaite obtenir. Le signal triangulaire est appelé la Porteuse et le signal sinusoïdal est appelé la Modulante [57].

Ces signaux ont les propriétés suivantes :

- La modulante est une onde sinusoïdale  $V_{ref}$  d'amplitude  $u_r$  et de fréquence  $f_r$ .
- La porteuse est une onde triangulaire ou en dents de scie  $r_p(t)$ , d'amplitude  $|U_p| = |U_r|$ , et d'une fréquence  $f_p \gg f_r$
- L'indice de modulation  $m = f_p/f_r$
- Le coefficient de réglage en tension  $r$ , qui est égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence à celle de la porteuse  $= \frac{U_r}{U_p}$

Le principe de cette commande est que la valeur de la fonction  $F$  qui correspond à la première cellule de commutation soit égale à 1 si  $U_p \geq U_r$  sinon elle prend la valeur zéro.

### XI. Modèle du redresseur MLI :

Avant de modéliser le redresseur à MLI, il est utile de rappeler qu'un redresseur est un convertisseur statique. Il sert comme son nom l'indique à redresser un signal alternatif et le transformer en un signal continu.

Pour l'étude de l'ensemble (génératrice - redresseur MLI – onduleur - charge), on s'intéressera uniquement au comportement dynamique des variables électriques et mécaniques de la machine.

Afin de faciliter la modélisation et réduire le temps de simulation, on modélise le redresseur par un ensemble d'interrupteurs idéaux: c'est-à-dire résistance nulle à l'état passant, résistance infinie à l'état bloqué, réaction instantanée aux signaux de commande (pas d'empîement).

## Chapitre 2 ..... Modélisation d'un système éolienne

Le redresseur à MLI est composé de six bras, dont chacun comporte deux cellules de commutation constituées d'une diode et d'un transistor en antiparallèle. Cette structure permet de passer le courant dans les deux sens [58].

Contrairement à un redresseur à diodes qui fournit une valeur de la tension égale à celle de la tension redressée (interrupteurs idéaux), le redresseur à MLI doit fournir une tension constante quelque soit la tension produite par la génératrice.

Pour le modèle dynamique du système, on va diviser l'étude du convertisseur en trois parties: le coté alternatif, la partie discontinue composée par les interrupteurs, et le côté continu. Dans ce contexte, la fonction des interrupteurs est d'établir une liaison entre le côté alternatif et le bus continu. Ces interrupteurs étant complémentaires, leur état est défini par la fonction suivante :

$$S = \begin{cases} +1, \bar{S} = -1 \\ -1, \bar{S} = +1 \end{cases} \quad \text{pour } S=a,b,c$$

Puis, les tensions de phase d'entrée et le courant de sortie peuvent être écrits en fonction de :

$S_j$ ,  $U_{dc}$  et les courants d'entrée  $i_a, i_b, i_c$ .

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (2.58)$$

Les tensions d'entrée entre phases du redresseur MLI peuvent être décrites par :

$$\begin{cases} U_{Sab} = (S_a - S_b)U_{dc} \\ U_{Sbc} = (S_b - S_c)U_{dc} \\ U_{Sca} = (S_c - S_a)U_{dc} \end{cases} \quad (2.59)$$

Les équations de tension pour le système triphasé équilibré sans raccordement neutre peuvent être écrites ainsi :

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = R \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{Sa} \\ U_{Sb} \\ U_{Sc} \end{bmatrix} \quad (2.60)$$

Avec :

$$\begin{cases} U_{Sa} = \frac{2S_a - S_b - S_c}{3} \cdot U_{DC} \\ U_{Sb} = \frac{2S_b - S_a - S_c}{3} \cdot U_{DC} \\ U_{Sc} = \frac{2S_c - S_a - S_b}{3} \cdot U_{DC} \end{cases} \quad (2.61)$$

Finalement, on déduit l'équation de couplage entre côtés alternatif et continu par :

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c - i_l \quad (2.62)$$

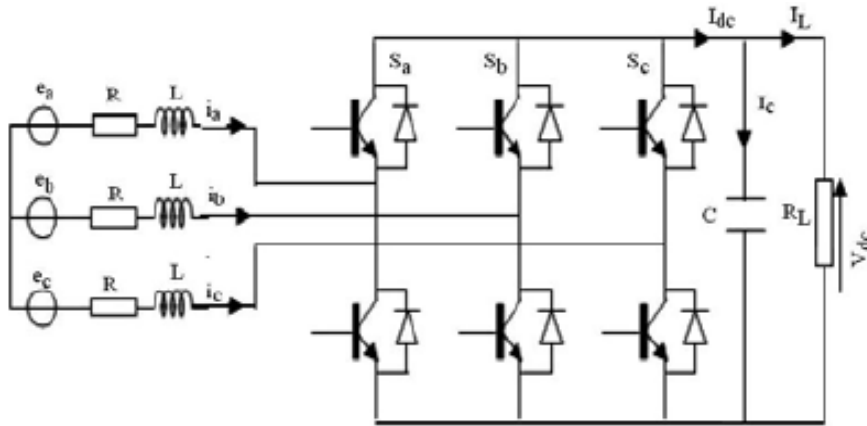


Fig. II.15 : Schéma de l'association MSAP – Redresseur MLI [59]

Les équations précédentes dans les coordonnées synchrones  $d_q$  sont :

$$e_D = R \cdot i_d + L \frac{di_d}{dt} - \omega \cdot L \cdot i_q + U_{sd} \quad (2.63)$$

$$e_Q = R \cdot i_q + L \frac{di_q}{dt} - \omega \cdot L \cdot i_d + U_{sq} \quad (2.64)$$

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = S_d i_d + S_q i_q - i_l \quad (2.65)$$

Avec :

$$\begin{cases} S_d = \frac{1}{\sqrt{6}} (2 \cdot S_a - S_b - S_c) \cdot \cos(\omega t) + \frac{1}{\sqrt{2}} (S_b - S_c) \cdot \sin(\omega t) \\ S_q = \frac{1}{\sqrt{2}} (S_b - S_c) \cdot \cos(\omega t) - \frac{1}{\sqrt{6}} (2 \cdot S_a - S_b - S_c) \cdot \sin(\omega t) \end{cases} \quad (2.66)$$

## XII. Modélisation de l'onduleur :

Un onduleur de tension triphasé dont les composants semi-conducteurs contrôlables est des transistors. Plusieurs méthodes sont utilisées pour commander les interrupteurs d'un onduleur. La stratégie la plus utilisée est la Modulation de Largeur d'Impulsions (MLI). Plusieurs types de MLI se présentent pratiquement, dont on peut citer [55] :

- Les modulations sinus-triangle effectuant la comparaison d'un signal de référence sinusoïdal à une porteuse en général triangulaire ;
- Les modulations pré calculées pour lesquelles les angles de commutation sont calculés hors ligne pour annuler certaines composantes du spectre de la tension, et donner une certaine onde fondamentale ;
- Les modulations post calculées appelées encore MLI régulières symétriques ou MLI vectorielles dans lesquelles les angles de commutation sont calculés en ligne.

## Chapitre 2 ..... Modélisation d'un système éolienne

On s'intéresse à la première technique. Pour modéliser l'onduleur de tension on considère son alimentation comme une source parfaite, supposée être constituée de deux générateurs de f.é.m. égale à  $U_0/2$  connectés entre eux par un point noté  $n_0$ .

La machine a été modélisée à partir des tensions simples que nous notons  $V_{an}$ ,  $V_{bn}$  et  $V_{cn}$ .

L'onduleur est commandé à partir des grandeurs logiques  $S_i$ . On appelle  $T_i$  et  $T_i'$  les transistors (supposés être des interrupteurs idéaux), on a :

$$\begin{cases} \text{si } S_1 = 1, \text{ alors } T_1 \text{ est fermée et } T_1' \text{ est ouvert} \\ \text{si } S_1 = 0, \text{ alors } T_1 \text{ est ouvert et } T_1' \text{ est fermée} \\ \text{si } S_2 = 1, \text{ alors } T_2 \text{ est fermée et } T_2' \text{ est ouvert} \\ \text{si } S_2 = 0, \text{ alors } T_2 \text{ est ouvert et } T_2' \text{ est fermée} \\ \text{si } S_3 = 1, \text{ alors } T_3 \text{ est fermée et } T_3' \text{ est ouvert} \\ \text{si } S_3 = 0, \text{ alors } T_3 \text{ est ouvert et } T_3' \text{ est fermée} \end{cases}$$

Les tensions composées sont obtenues à partir des sorties de l'onduleur :

$$\begin{cases} U_{ab} = U_0(V_{an0} - V_{bn0}) \\ U_{bc} = U_0(V_{bn0} - V_{cn0}) \\ U_{ca} = U_0(V_{cn0} - V_{an0}) \end{cases} \quad (2.67)$$

Les tensions simples des phases de la charge issues des tensions composées ont une somme nulle, donc :

$$\begin{cases} V_{an} = \left(\frac{U_0}{3}\right)[2U_{ab} - U_{bc} - U_{ca}] \\ V_{bn} = \left(\frac{U_0}{3}\right)[2U_{bc} - U_{ab} - U_{ca}] \\ V_{cn} = \left(\frac{U_0}{3}\right)[2U_{ca} - U_{ab} - U_{bc}] \end{cases} \quad (2.68)$$

Elles peuvent s'écrire à partir des tensions de sorties de l'onduleur en introduisant la tension du neutre de la charge par rapport au point de référence  $n_0$ .

$$\begin{cases} V_{an} + V_{nn0} = V_{an0} \\ V_{bn} + V_{nn0} = V_{bn0} \\ V_{cn} + V_{nn0} = V_{cn0} \end{cases} \quad (2.69)$$

Donc, on peut déduire que :

$$V_{nn0} = \frac{1}{3}[V_{an0} + V_{bn0} + V_{cn0}] \quad (2.70)$$

L'état des interrupteurs supposés parfaits  $\Leftrightarrow$  Si (1 ou 0)  $\{i=a, b, c\}$  on a :

$$V_{in0} = S_i U_0 - \frac{U_0}{2} \quad (2.71)$$

On a donc :

$$\begin{cases} V_{an0} = (S_a - 0.5)U_0 \\ V_{bn0} = (S_b - 0.5)U_0 \\ V_{cn0} = (S_c - 0.5)U_0 \end{cases} \quad (2.72)$$

En remplaçant (2.72) dans (2.70), on obtient :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{3}{2}V_{an0} - \frac{1}{3}V_{bn0} - \frac{1}{3}V_{cn0} \\ V_{bn} = -\frac{1}{3}V_{an0} + \frac{2}{3}V_{bn0} - \frac{1}{3}V_{cn0} \\ V_{cn} = -\frac{1}{3}V_{an0} - \frac{1}{3}V_{bn0} + \frac{2}{3}V_{cn0} \end{cases} \quad (2.73)$$

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot U_0 \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (2.74)$$

$$I_{ond} = S_a I_a + S_b I_b + S_c I_c \quad (2.75)$$

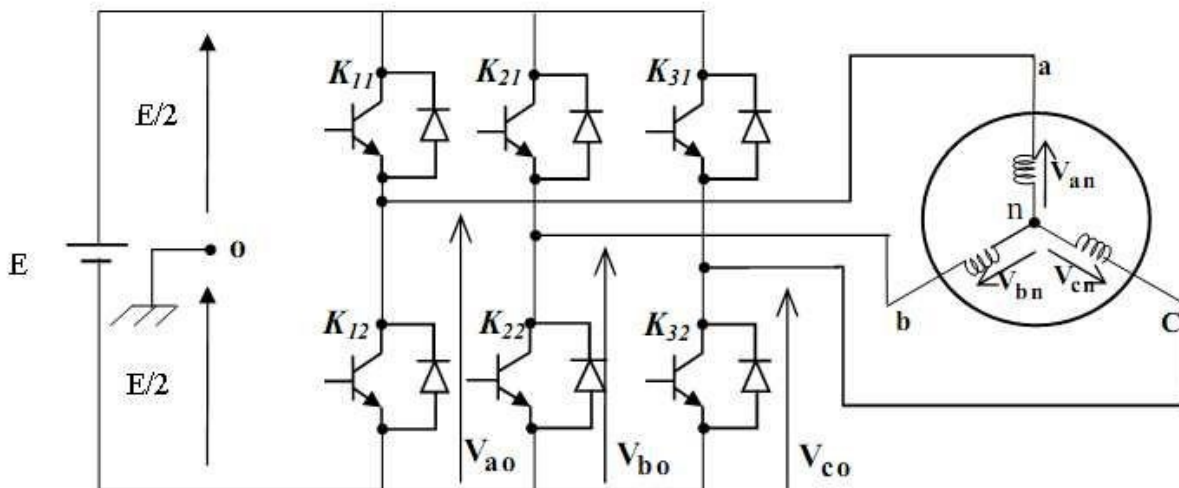


Fig. II.16 : Schéma de l'onduleur triphasé deux niveaux.

### XIII. CONCLUSION :

On a présenté dans ce chapitre, les principes fondamentaux sur la machine synchrone à aimants permanents (MSAP), ainsi que sa modélisation sous forme d'équations mathématiques. Le modèle du MSAP dans le repère de Park a été établi dans le but de linéariser le système et faciliter l'étude. Et nous avons présenté le modèle de redresseur MLI et l'onduleur de tension et de sa commande.

*Chapitre 03 :*  
*Simulation de la*  
*chaîne de*  
*conversion*  
*éolienne*

## Chapitre 3 : .....Simulation de la chaine de conversion éolienne

### I. Introduction :

Dans ce chapitre, on va essayer de simuler les différents blocs de notre système éolien avec le logiciel *Matlab/Simulink*.

Nous avons simulé la commande d'une machine synchrone à aimants permanents (MSAP) associée un redresseur commande à MLI. Les résultats des différentes simulations réalisées sous environnement *Matlab/Simulink*, ont permis d'évaluer les performances du système proposé.

### II. Chaîne éolienne :

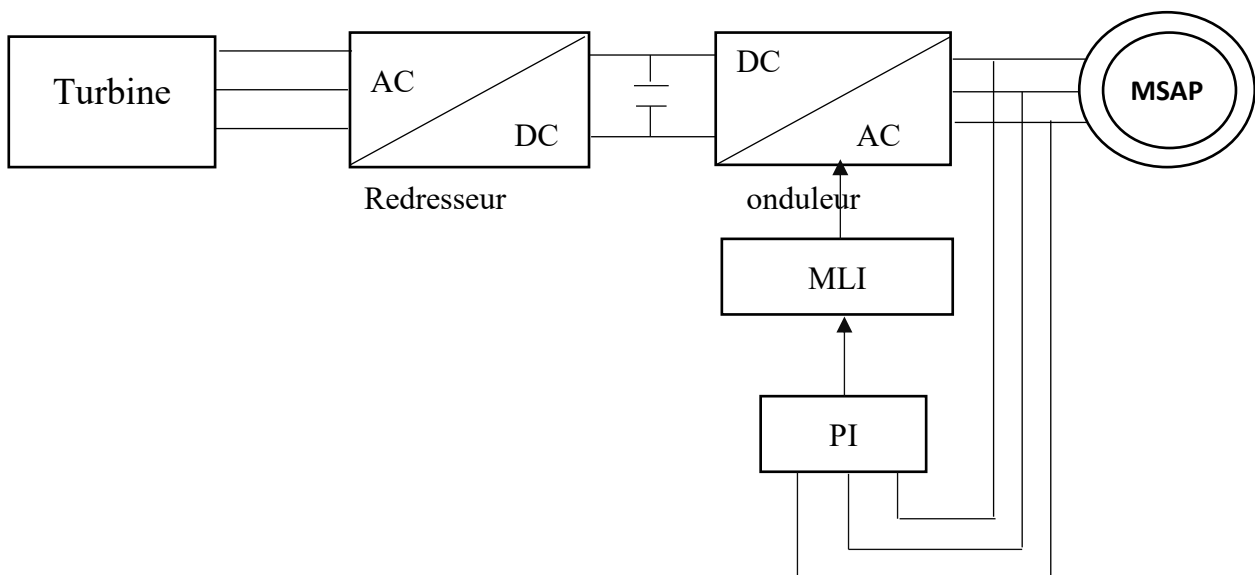


Fig III.1 : schéma de chaîne de conversion.

### III. Synthèse des Contrôleurs PI du convertisseur de puissance :

Le contrôle de la partie électrique du système éolien possède une multitude de boucles de poursuite (ou de régulation) par des correcteur PI. Dans la présentons une méthode analytique, permettant de déterminer les paramètres de tous ces régulateurs [60].

Le schéma général d'une boucle de poursuite est donne par la figure suivante :

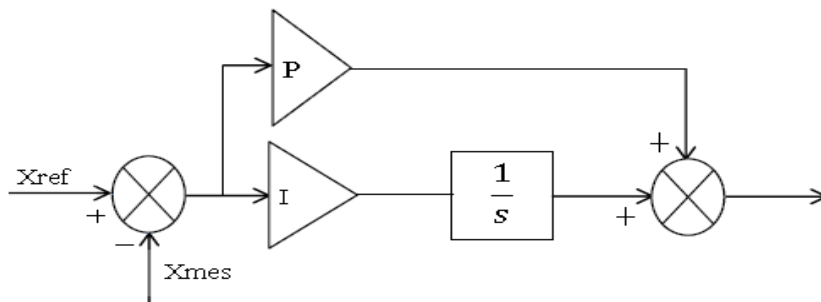


Fig III.2 : schéma a bloc du correcteur PI.

## Chapitre 3 : .....Simulation de la chaine de conversion éolienne

### III.1 Régulation du courant :

La fonction de transfert de la machine étant de la forme :

$$H_s(s) = \frac{1}{R_s + L_s \cdot S} = \frac{1}{R_s} + \frac{1}{1 + \tau \cdot S}$$

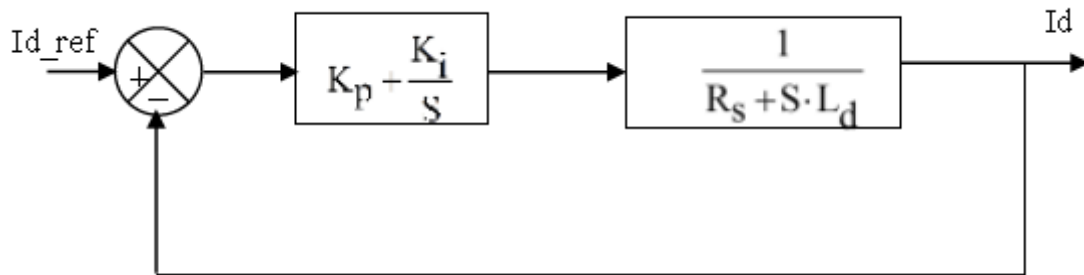
Avec :

$e_{d,q} = \omega \varphi_{d,q}$  : sont les f.e.m de rotations dues aux termes de couplage qui considéré

Comme des perturbations mesurables.

Ou :

$\tau$  : La constante de temps électrique donnée par :  $\tau = \frac{L_s}{R_s}$



**Fig III.3** : Boucle de régulation du courant id.

La fonction de transfert en boucle ouverte est donne comme suit :

$$H_{BO}(s) = \left( K_p + \frac{K_i}{S} \right) \left( \frac{1}{R_s + S \cdot L_d} \right)$$

Composons le pole  $\left( \frac{L_d}{R_s} \right)$  par  $\left( \frac{K_p}{K_i} \right)$  ce qui se traduit par le conduit :

$$\frac{L_d}{R_s} = \frac{K_p}{K_i}$$

La fonction de transfert en boucle ouvert s'écrit maintenant :

$$H_{bf}(s) = \frac{K_i}{S \cdot R_s}$$

En boucle fermée, nous obtenons un système de type 1<sup>ere</sup> ordre avec une constante de temps

$$\tau_{bf}(s) = \frac{R_s}{K_i}$$

$$H_{Bf}(s) = \frac{1}{\frac{R_s}{K_i} \cdot S + 1}$$

L'action intégrale du PI est obtenue comme suite :

### Chapitre 3 : .....Simulation de la chaine de conversion éolienne

$$K_i = \frac{R_s}{\tau_{bf}}$$

Si on choisit le temps de réponse  $t_{reb} = 3 \tau_{bf}$ , on a :

$$\begin{cases} K_i = \frac{3R_s}{t_{reb}} \\ K_p = \frac{3L_d}{t_{reb}} \end{cases}$$

Les constants ( $k_p$  et  $k_i$ ) sont identiques pour la boucle de courant de l'axe en direct et en Quadrature.

#### III.2 Régulation de tension $V_{dc}$ :

Pour dimensionner le **régulateur** de tension, considérons le schéma suivant qui met en œuvre les boucles de tension et courant en cascade. En considérant le rendement du MLI

Unitaire, il vient :

$$P_{dc} = 3 \cdot p_g \quad \longrightarrow \quad v_{dc} i_{dc} = 3 v_q i_q$$

La puissance du bus continu peut se déterminer comme suit :

$$P_{dc} = v_{dc} i_{dc}$$

La figure II.2 nous permet d'écrire :

$$i_{dc} = i_c + i_l$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} i_c = C \frac{dv_{dc}}{dt} \\ i_l = \frac{v_{dc}}{R_L} \end{cases}$$

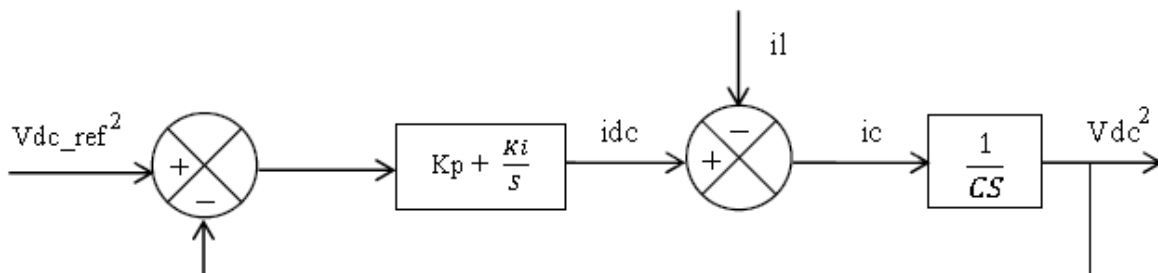


Fig III.4 : Boucle de régulation de la tension  $V_{dc}$ .

La fonction de transfert en boucle ouverte est donnée par :

$$H_{B0}(s) = \left( K_p + \frac{K_i}{s} \right) \left( \frac{1}{C \cdot s} \right)$$

### Chapitre 3 : .....Simulation de la chaine de conversion éolienne

La fonction de transfert en boucle fermée est donnée comme suit :

$$H_{Bf}(s) = \frac{H_{B0}(s)}{1 + H_{B0}(s)} = \frac{K_p \cdot s + K_i}{C \cdot s^2 + K_p \cdot s + K_i}$$

$$\begin{cases} K_i = \omega_0^2 \\ K_p = 2 \cdot \xi \cdot \omega_0 \cdot C \end{cases}$$

#### IV. Modèle mathématique de turbine :

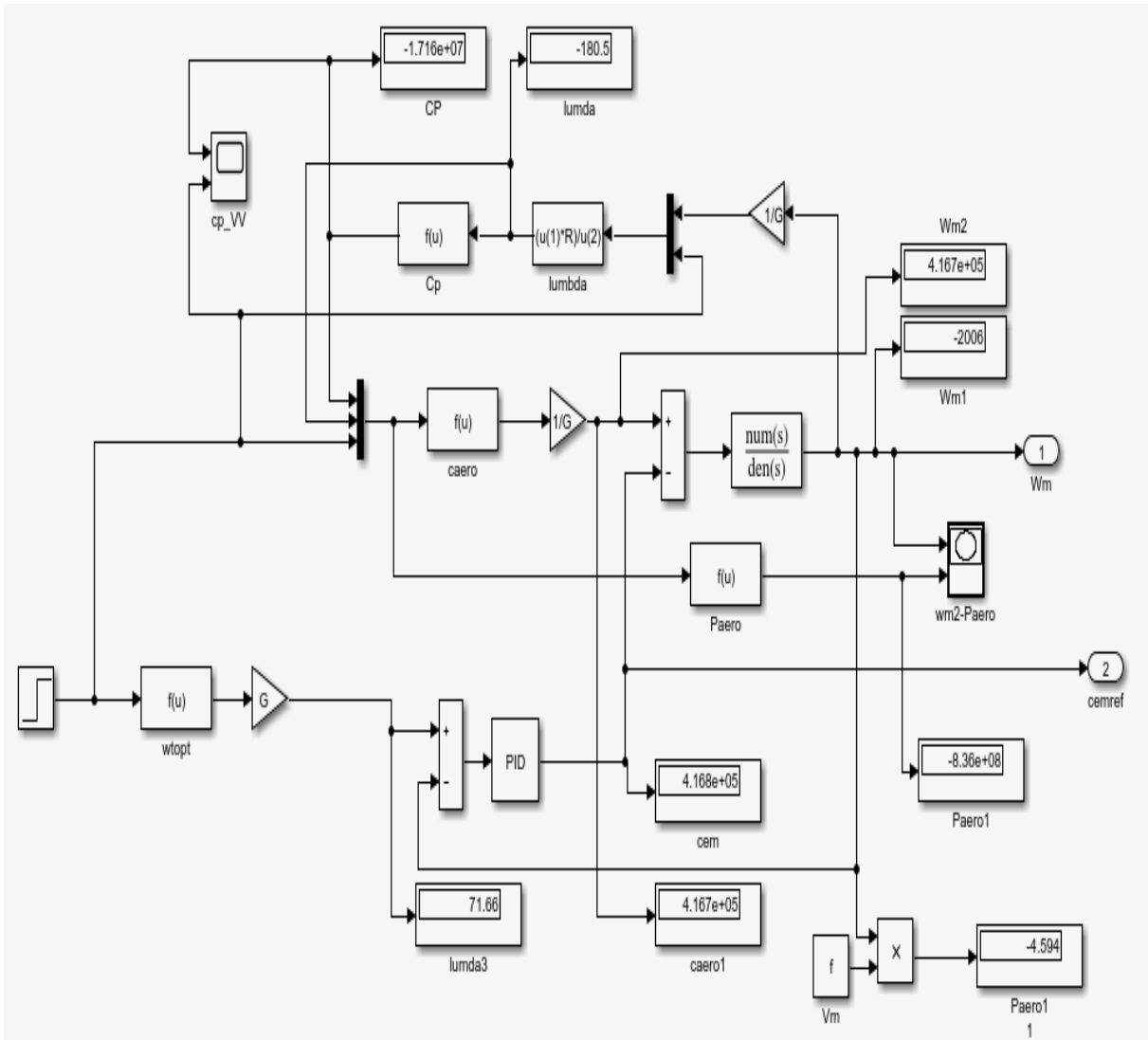


Fig III.5 : Modèle mathématique turbine.

V. Schéma bloc de simulation :

Un schéma bloc de commande de la machine synchrone à aimants permanents, basé sur la technique de la commande MLI, est représenté par la figure (Fig III.6).

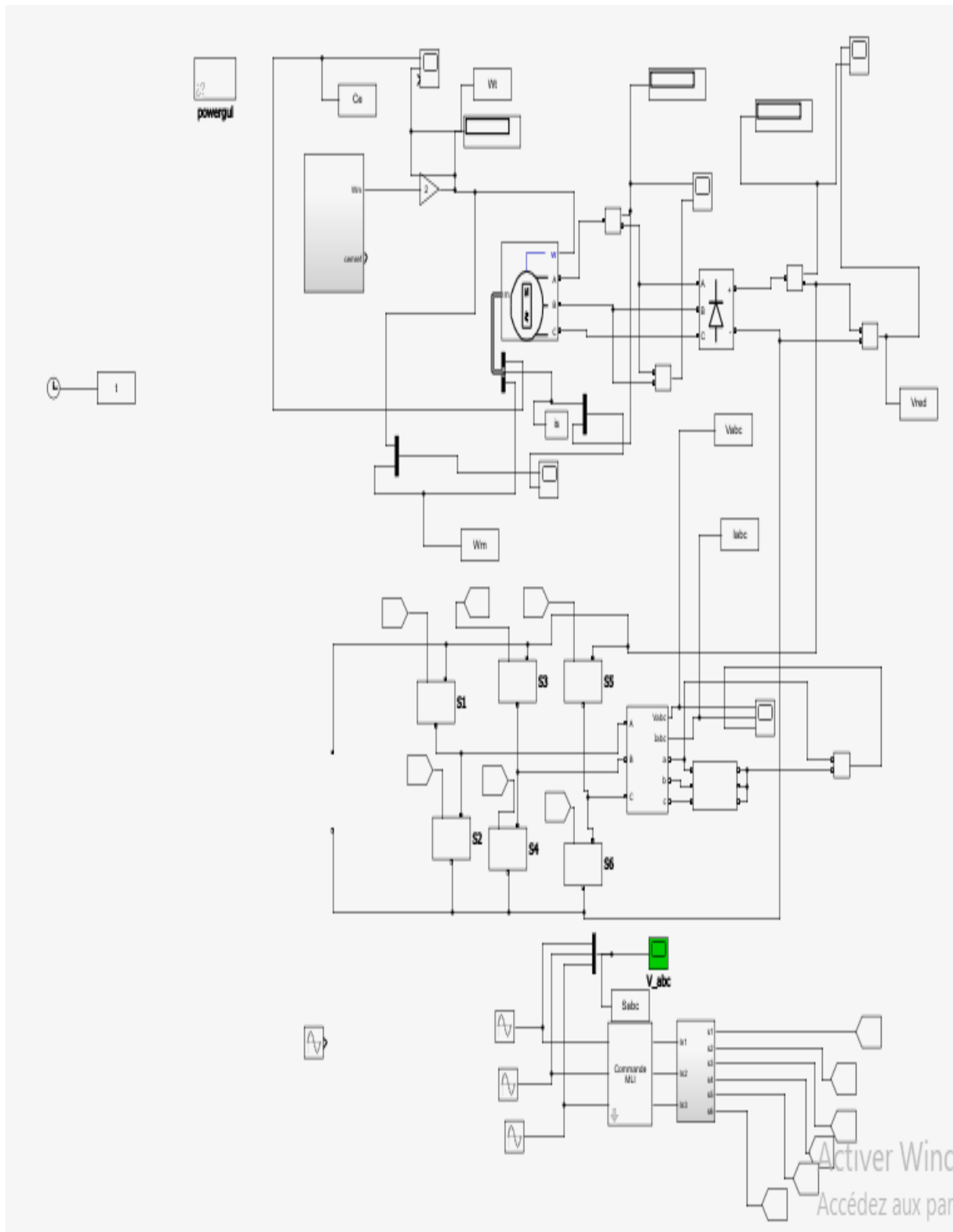


Fig III.6 : Model Simulink de la chaine de conversion.

## Chapitre 3 : .....Simulation de la chaine de conversion éolienne

### IV.1 Paramétré :

1. caractéristique de la voilure :

$a_0=0.001$  ;  $a_1=6.38e-2$  ;  $a_2=-9.41e-3$  ;  $a_3=9.86e-3$  ;  $a_4=-17.375e-4$  ;  $a_5=7.9563e-5$  ;  $h=10e-6$  ;

$r_o = 1.225$  ;  $G=1$  ;  $P_{opt}=1$  ;  $V_{rated}=5$  ;

$R=0.45$  ;

$J_t=2.9e-2$  ;

$f_t=1.19e-3$  ;

2. paramètres de la DFIG

$p=2$  ;  $N_n=1500$  ;  $P=1$  ;

$R_s=3.4$  ;  $L_s=0.3206$  ;  $R_r=3.79$  ;  $L_r=0.1788$  ;  $M=0.2073$  ;  $ws=314$  ;

$s_i=1-((M^2)/(L_r*L_s))$  ;

$J_g=0.0051$  ;  $f_g=0.0011$  ;

3. model de la dynamique ramenée à la génératrice

$J=J_g+(J_t/(G^2))$ ,  $f=f_g+(f_t/(G^2))$  ;

4. model de la dynamique ramenée à la turbine

$\%J=J_t+(J_g*(G^2))$ ,  $f=f_t+(f_g*(G^2))$  ;

$K_p=-200$

$K_i=-20$

$i=1$  ;

$l(i)=0$  ;

### VI. Résultats de la simulation :

Pour une vitesse de rotation de la machine constante :

Parametre de output a step :

Step time	Initial value	Final value	Sample time
1	5	5	0

**Tableau III.1** : parametre de vitesse de rotation de la machine constante.

# Chapitre 3 : .....Simulation de la chaine de conversion éolienne

Vitesse de turbine :

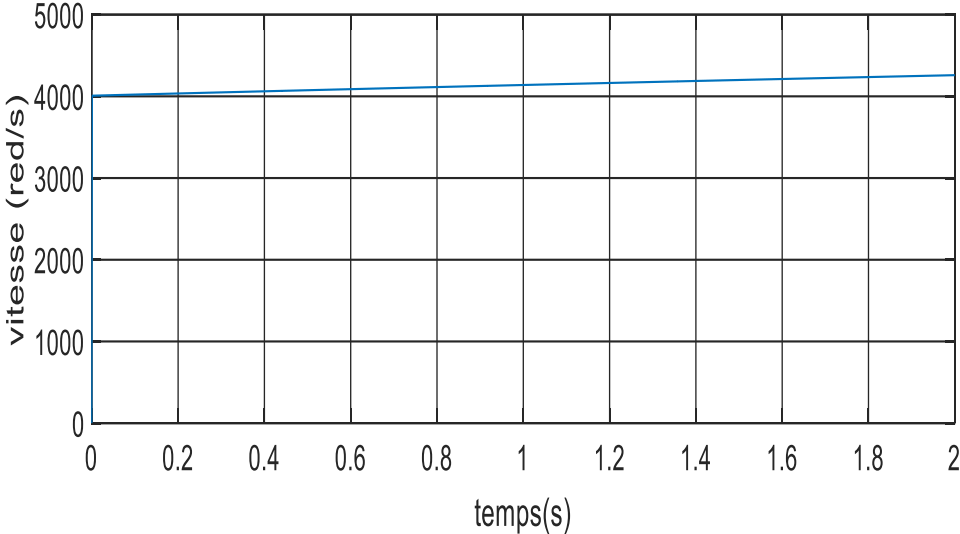


Fig III.7 : Vitesse de turbine (constante).

Couple de machine :

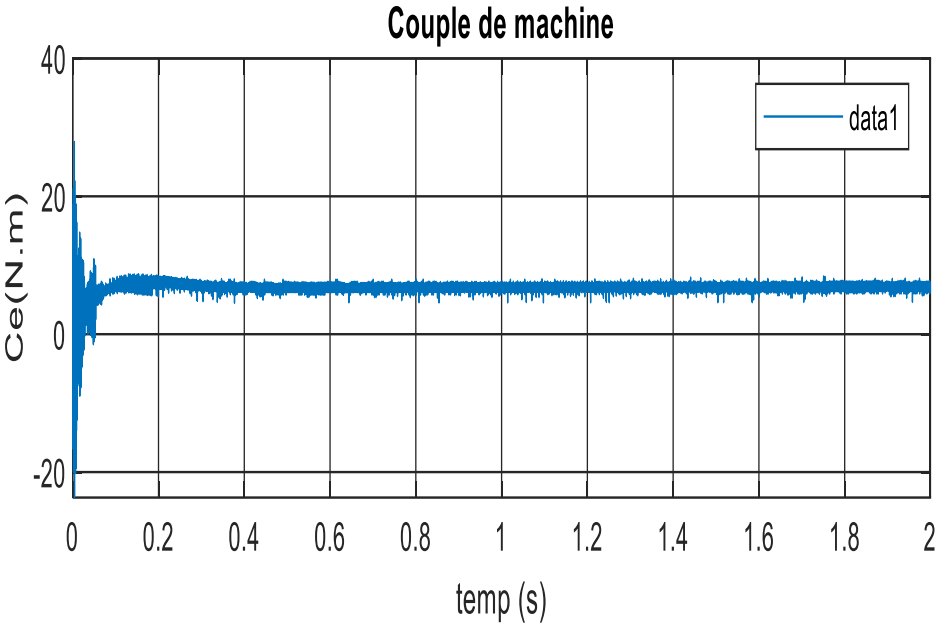
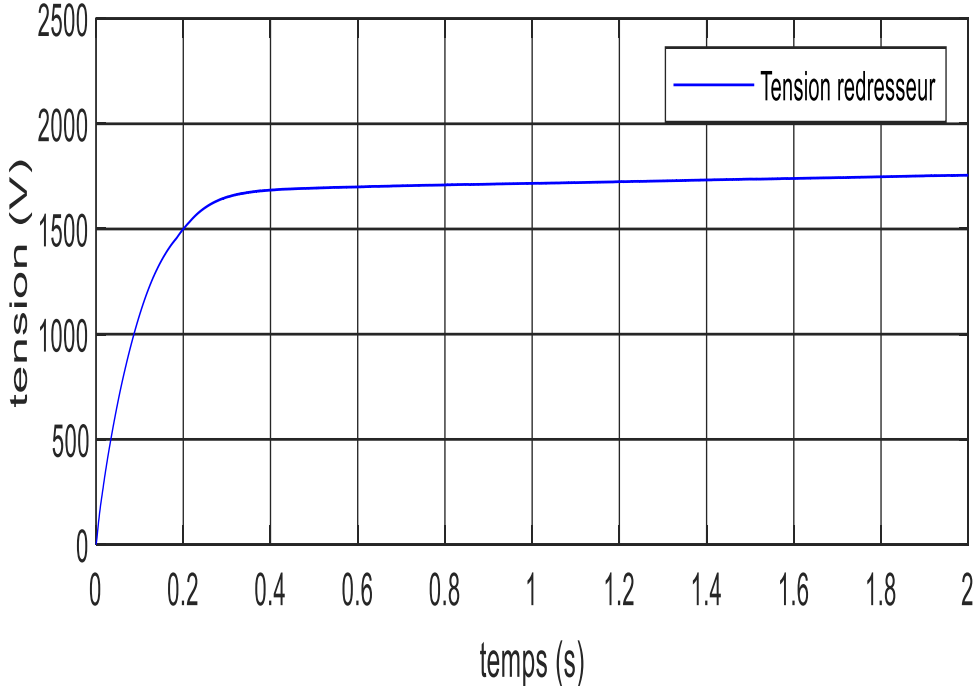


Fig III.8 : Allure de la couple électromagnétique.

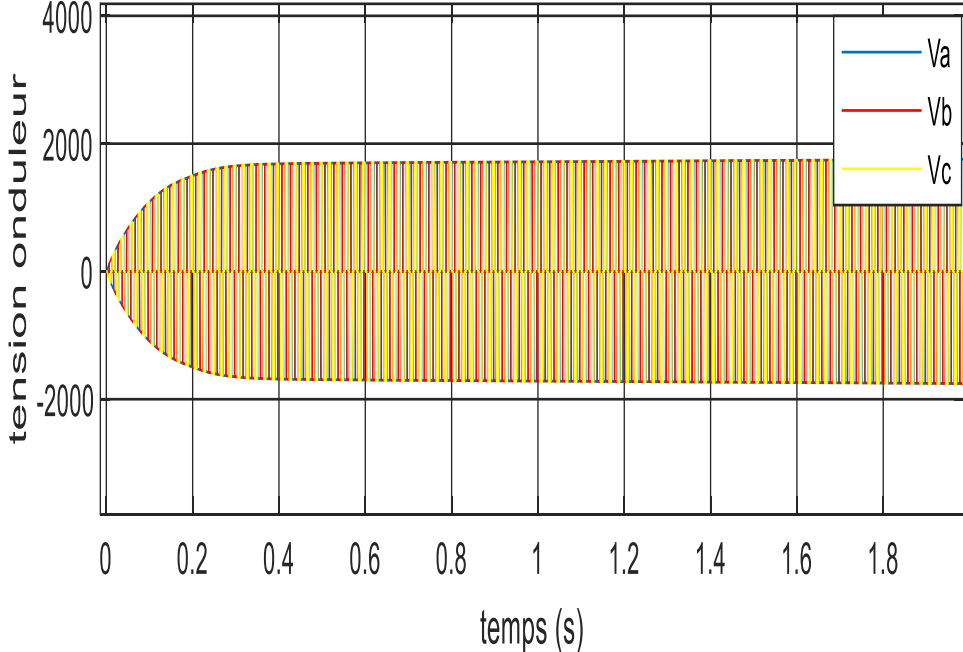
**Chapitre 3 : .....Simulation de la chaine de conversion éolienne**

Tension de redresseur :



**Fig III.9 :** Allure de la tension redresseur.

Tension de l'onduleur :



**Fig III.10 :** Allure de tensions de l'onduleur.

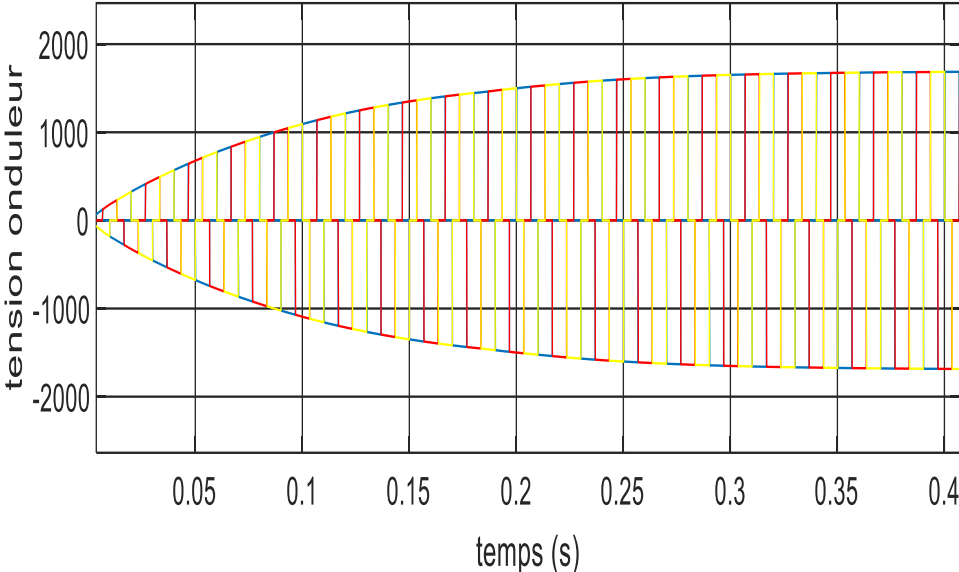


Fig III.11 : Zoom de l'Aller de tensions de l'onduleur.

Courante de l'onduleur :

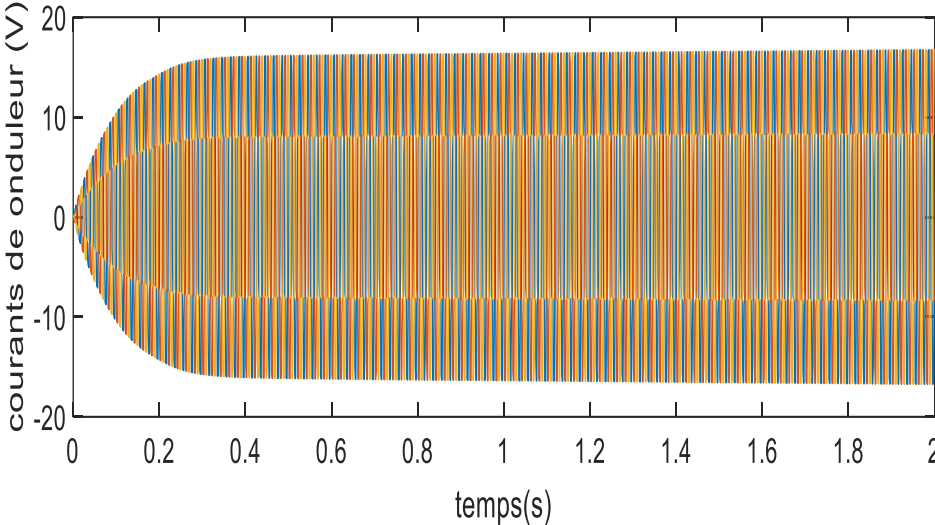


Fig III.12 : Aller de courant de l'onduleur.

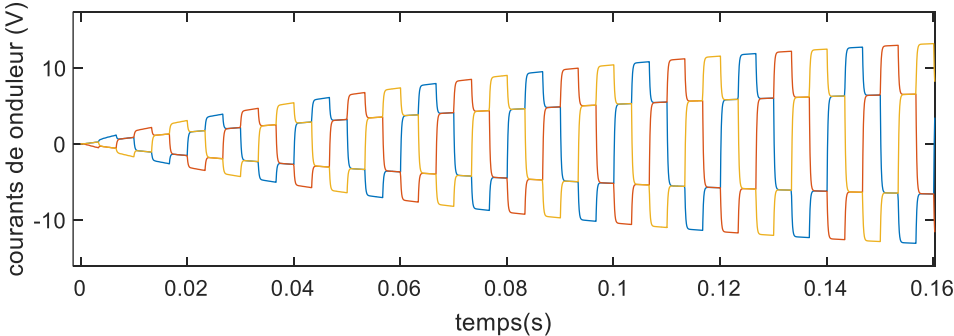


Fig III.13 : Zoom de l'Aller de tensions de l'onduleur.

# Chapitre 3 : .....Simulation de la chaine de conversion éolienne

Tension d'alimentation :

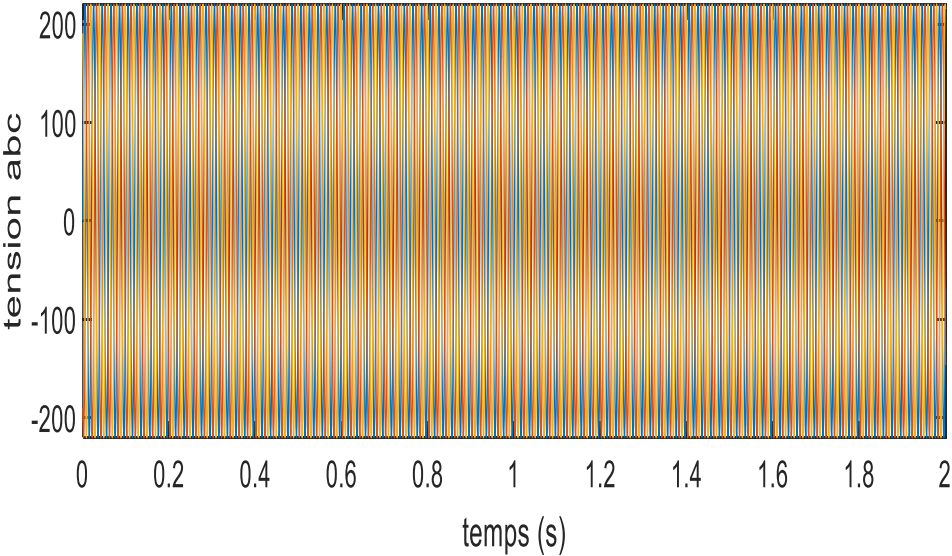


Fig III.14 : Allure de tensions de d'alimentation.

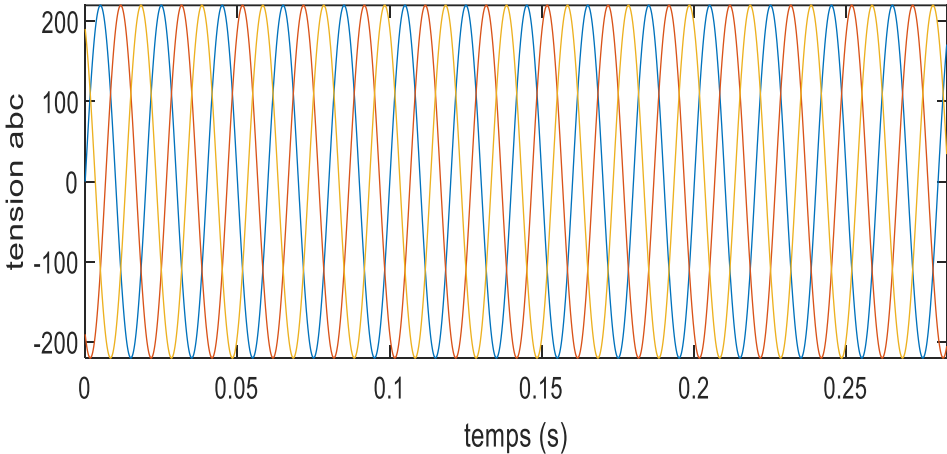


Fig III.15 : Zoom d'Allure de tensions de d'alimentation.

Courant statorique :

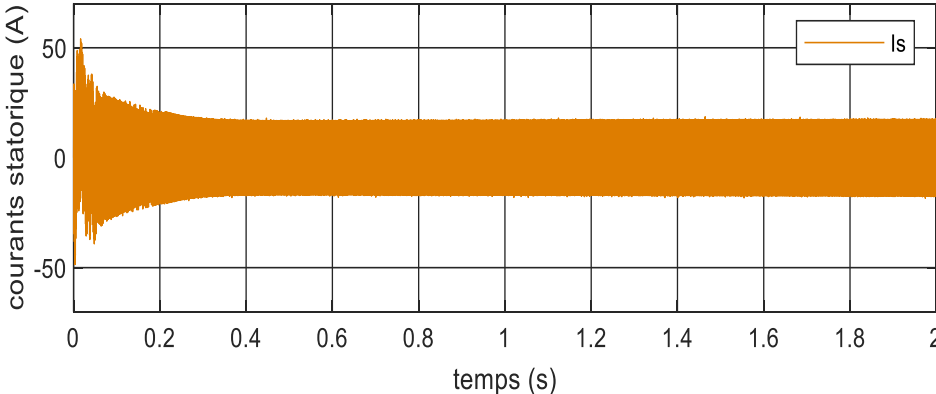


Fig III.16 : Allure de courant de stators.

### Chapitre 3 : .....Simulation de la chaine de conversion éolienne

Pour une vitesse de rotation de la machine constante on regarde :

Fig III.7 : présente la vitesse de turbine ,on remarque la vitesse stable de la valeur 4000 rad/s.

La Figure III.8 présente le couple électromagnétique, on remarque des ondulations importantes pendant le régime transitoire, ainsi un régime établi de -20 N.m.

Fig III.9 : L'allure de la tension de sortie du redresseur  $V_{dc}$  commence à augmenter avec une forme une valeur supérieure à zéro puisque la machine convient un flux, l'allure de  $V_{dc}$  suit la tension de référence.

Fig III.10 : L'allure la tension de l'onduleur, obtenu une forme n'est pas sinusoïdale pure puisque l'état de commutation de redresseur influe sur l'allure de tensions  $V$ .

Fig III.12 : L'allure la courant de l'onduleur, obtenu une forme n'est pas sinusoïdale pure puisque l'état de commutation de redresseur influe sur l'allure de courant  $I=12A$ .

Fig III.14 : sur un temps de simulation de 5 sec et via un algorithme de résolution ODE4 (Runge kutta), la référence de la tension à la sortie du redresseur étant prise égale à 220V

Fig III.16 : Courants statorique d'une phase générée par la Sabc (A). Après redressement de ce courant statorique, en obtient le courant de la Fig III.7.

### Chapitre 3 : .....Simulation de la chaine de conversion éolienne

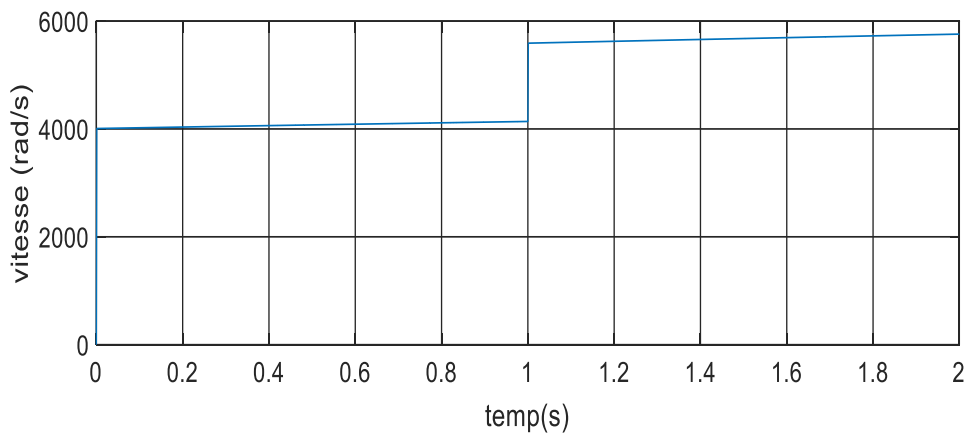
Pour une vitesse de rotation de la machine variable :

Parametre de output a step :

Step time	Initial value	Final value	Sample time
1	5	8	0

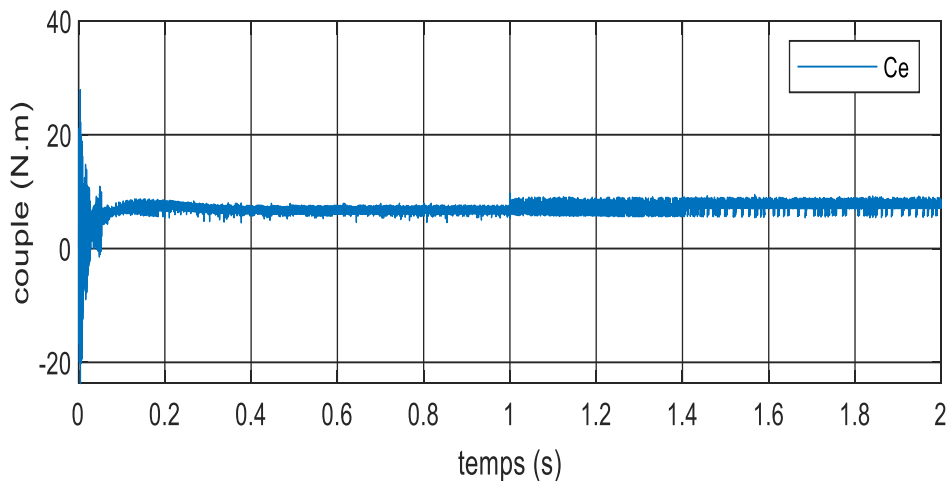
**Tableau III.2** : parametre de vitesse de rotation de la machine variable.

Vitesse de turbine :



**Fig III.17** : vitesse de la turbine (rad /s).

Couple moteur :



**Fig III.18** : Allure de la couple électromagnétique.

# Chapitre 3 : .....Simulation de la chaine de conversion éolienne

Tension redresseur :

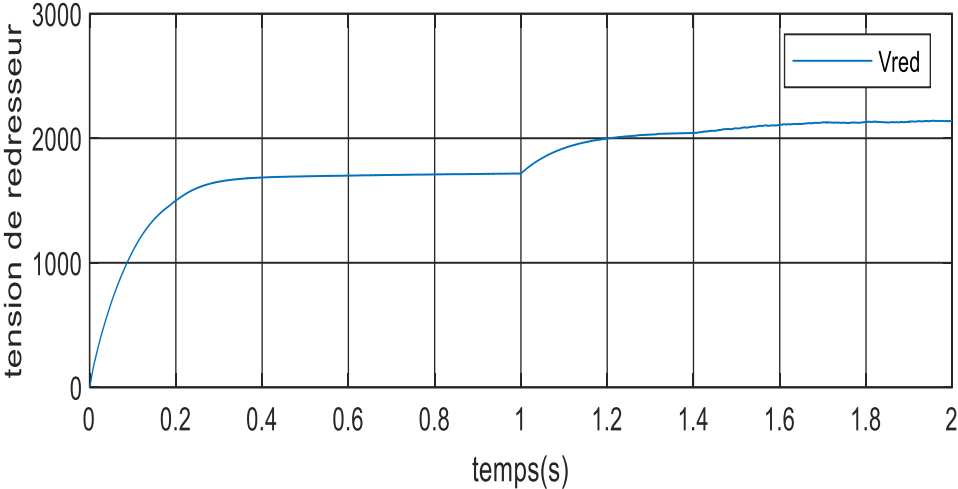


Fig III.19 : Allure de la tension redresseur.

Tension d'onduleur :

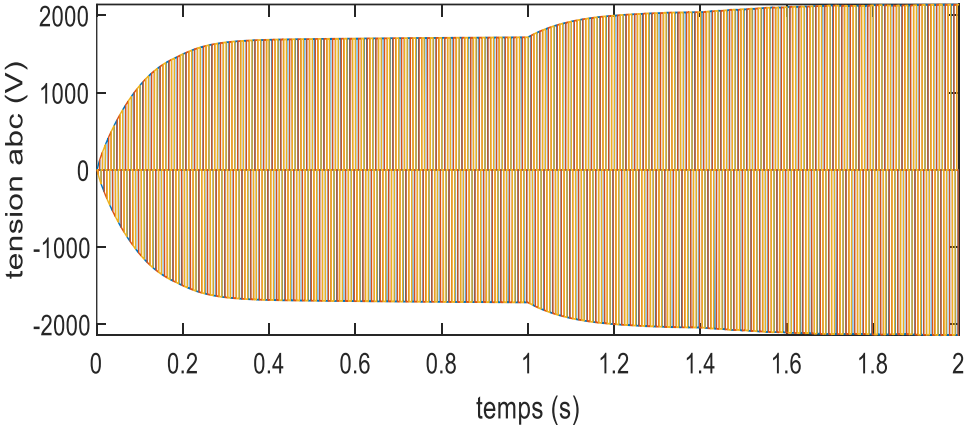


Fig III.20 : Allure de la tension issue de l'onduleur.

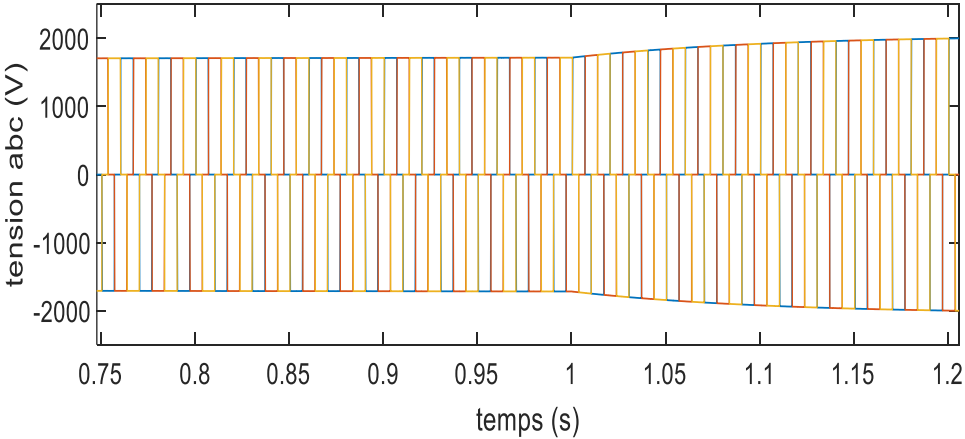


Fig III.21 : Zoom d'Allure de la tension issue de l'onduleur.

# Chapitre 3 : .....Simulation de la chaine de conversion éolienne

Courante onduleur :

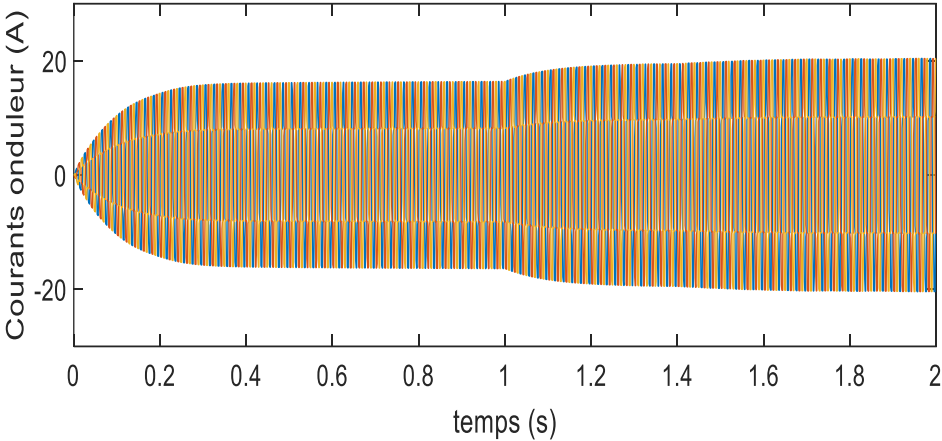


Fig III.22 : Allure de la courante issue de l’ondeur.

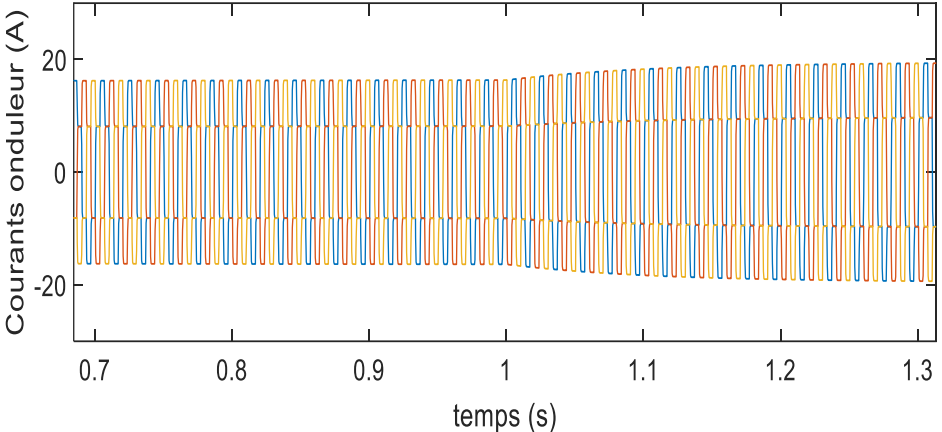


Fig III.23 : Zoom d’Allure de la courante issue de l’ondeur.

Tension d’alimentation :

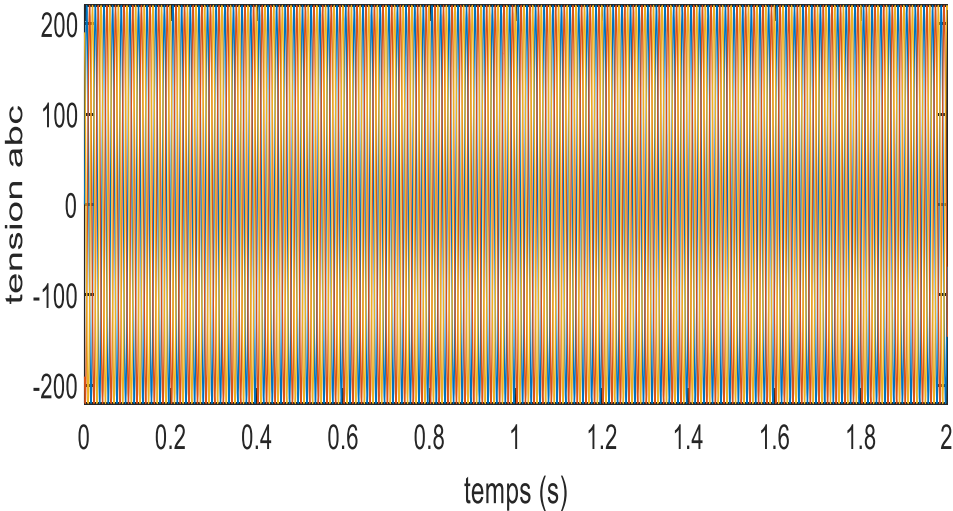
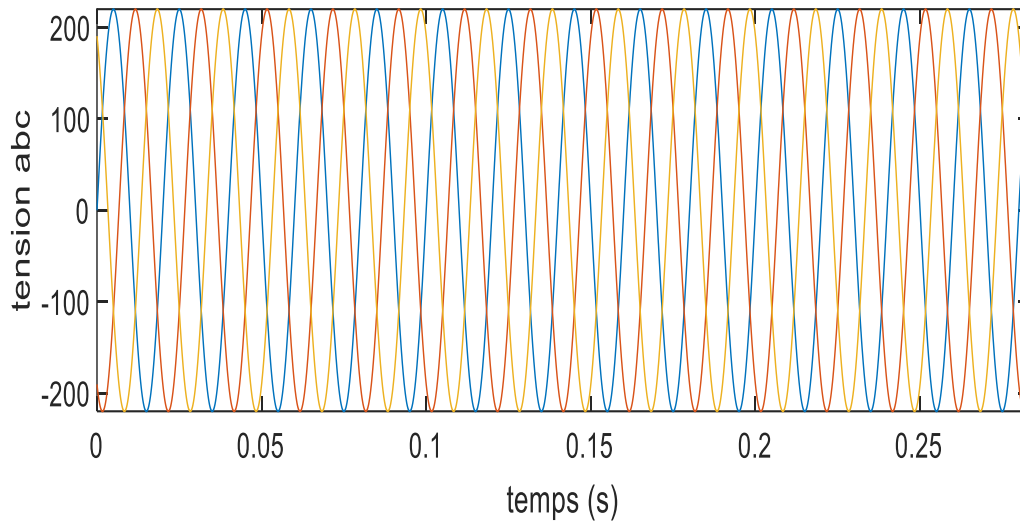
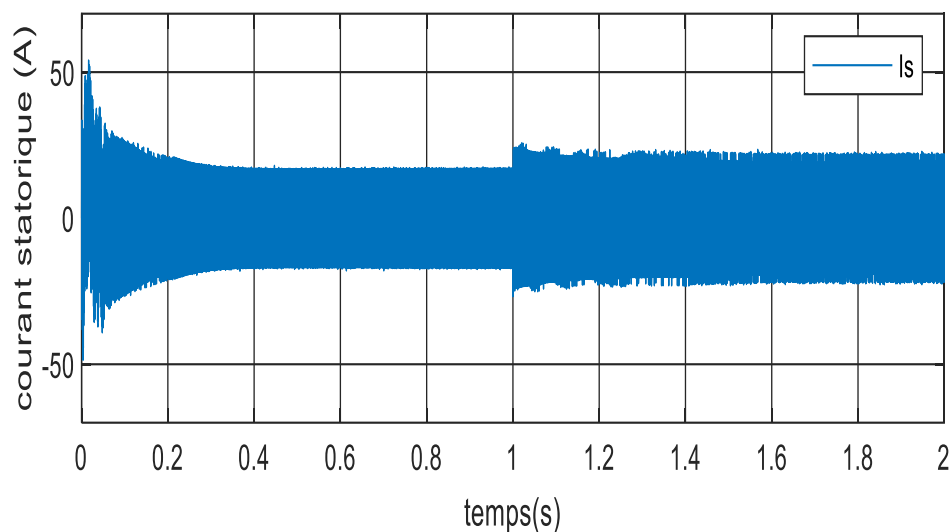


Fig III.24 : Allure de tensions d’alimentation.



**Fig III.25** : Zoom d'Aller de tensions d'alimentation.

Courant statorique :



**Fig III.26** : Aller de courant de stators.

Pour une vitesse de rotation de la machine variable on a regardée :

Fig III.17 : présente la vitesse de turbine (vitesse variable) ,on remarque la vitesse stable a la valeur 4000 rad/s ,dans l'instant  $t=1s$  on remarque augmentation directe de la valeur 5900rad/s

La Figure III.18 présente le couple électromagnétique, on remarque des ondulations importantes pendant le régime transitoire, ainsi un régime établi de -20 N.m. dans l'instant  $t=1s$  amplitude de couple augmente car la tension de référence est changer.

### **Chapitre 3 : .....Simulation de la chaine de conversion éolienne**

Fig III.19 : L'allure des tensions de redresseur, obtenue n'est pas sinusoïdale pure puisque l'état de commutation influe sur l'allure des tensions  $V$ . dans l'instant  $t=1s$  l'amplitude des tensions  $V$  augmente car la tension de référence est changée.

Fig III.20 : L'allure de la tension  $V$  d'après l'onduleur inverse est obtenue par une forme sinusoïdale pure à une amplitude. à  $t=1 s$  l'amplitude de  $V$  est changée.

Fig III.22 : L'allure du courant  $I_a$  d'après l'onduleur inverse est obtenue par une forme sinusoïdale pure à une amplitude égale à 20 A. à  $t=1 s$  l'amplitude de  $I_a$  est changée.

Fig III.24 : sur un temps de simulation de 5 sec et via un algorithme de résolution ODE4 (Runge kutta), la référence de la tension à la sortie du redresseur est prise égale à 220V

Fig III.26 : Courants statoriques d'une phase générés par la Sabc (A). Après redressement de ce courant statorique, à  $t=1 s$  l'amplitude de courant est changée. on obtient le courant de la Fig III.18.

### **VII. Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons mis au point pour prédire le comportement du système étudié. En présentant les résultats de simulation avec des commentaires pour chaque courbe obtenue. On va conclure que, si on varie la vitesse du vent, la tension de sortie du redresseur ne change pas car la commande vectorielle est précise et rapide (robuste).

*CONCLUSION  
GENERALE*

# Conclusion Générale

L'objectif principal de ce mémoire était la modélisation et la commande optimisée d'une machine Synchrones à Aimant Permanent, ainsi que l'apport qu'elle pourrait apporter dans un système éolien à vitesse variable. Pour cela on a traité les aspects qui englobent le développement d'un tel système : l'état de l'art des systèmes de conversion d'énergie éolienne, la modélisation, l'analyse de fonctionnement et la commande.

Pour cela, nous avons pris pour objectif l'étude et la simulation d'une chaîne de conversion éolienne constituée d'une turbine de moyenne puissance associée à une génératrice synchrone à aimants permanents connectée au réseau électrique MT. Cet ensemble de conversion de l'énergie éolienne est complété par un dispositif d'électronique de puissance afin de transmettre l'énergie électrique produite vers le réseau. Cette étude est complétée par la mise en place des stratégies de commande nécessaires au bon fonctionnement de chaque partie.

Au cours du premier chapitre, nous avons présenté brièvement ; des notions générales sur l'énergie éolienne, un peu d'histoire, les statistiques de l'éolien dans le monde. La technologie des éoliennes avec leurs différentes structures à savoir les éoliennes à axe vertical et à axe horizontal à vitesse fixe et à vitesse variable ainsi que les différentes machines électriques utilisées pour la conversion éolienne. Après cela aperçu sur les avantages et les inconvénients que présente le domaine de l'éolien. En fin Nous avons mentionné les convertisseurs de puissances.

Dans le deuxième chapitre nous avons présenté la modélisation de vent, Puis décrit les trois parties essentielles du système de conversion éolienne, la première représente la partie mécanique qui contient la turbine et l'arbre de la machine. Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous avons étudié la modélisation de la machine synchrone à aimant permanent, fonctionnement en machine. En se basant sur quelques hypothèses simplificatrices, un modèle mathématique a été établi. Nous avons constaté que le modèle de la machine synchrone à aimant permanent est un système à équations différentielles dont les coefficients sont des fonctions périodiques du temps, la transformation de Park nous a permis de simplifier ce modèle. Des résultats de simulation sont présentés. Et dans la dernière partie nous avons présenté le modèle du convertisseur statique, son principe de fonctionnement et la technique de commande MLI. Aussi nous avons tiré la puissance extraite d'une éolienne ainsi que son modèle dynamique et le modèle électrique de redresseur MLI et l'onduleur.

Dans le dernier chapitre Notre approche pour la simulation du contrôle de la chaîne éolienne s'avère satisfaisant du point de vue de la convergence et de la stabilité .La méthode proposée donne des

## Conclusion Générale

résultats de simulation qui garantissent une production sans interruption de l'énergie électrique, même pour des vitesses de vent faibles.

En effet, les tensions au borne du filtre du couplage au réseau sont d'une parfaite sinusoïde et l'utilisation du redresseur à diodes et du l'onduleur confère à notre dispositif un caractère fiable et bon marché. Il n'empêche que l'adoption des caractéristiques électriques standards, aussi bien de la génératrice que des composants de puissance soit source de dissipation considérable d'énergie en relation directe avec la quantité de puissance récupérée.

# *Bibliographie*

## **BIBLIOGRAPHIE**

- [1] Cherifa Naim « Etude d'une chaîne de conversion de l'énergie éolienne », thèse de doctorat, université des frères mentouri de Constantine, 2018, p12.
- [2] <https://www.power-and-beyond.com/what-is-wind-energy-definition-types-and-more-a-e95f3c16c898e889f0757f62ee91038d/>.
- [3] Akrabou Omar et Aichaoui Belkheir « Etude des paramètres météorologiques intervenant dans la simulation d'un parc éolien - Cas du site d'Adrar » mémoire de fin master, 2017, p21.
- [4] B. Multon, O. Gergaud, H. Ben Ahmed, X. Roboam, S. Astier, B. Dakyo, C. Nichita « état de l'art dans les aérogénérateurs électriques » paru mai en 2002, p18.
- [5] <https://www.iea.org/reports/wind-electricity>.
- [6] Li Zhang « Wind energy development : history and current status » chapitre 01, the university of leeds, leeds, uk, p02.
- [7] Islam Jar Allah Boulegroune « Etude et réalisation d'une turbine éolienne », Mémoire de Fin d'Etudes master, Université Mohamed Khider Biskra, 2020, p 06.
- [8] M. Adeline, <https://www.totalenergies.fr/particuliers/parlons-energie/dossiersenergie/energie-renouvelable/les-avantages-et-inconvenients-de-l-energie-eolienne>.
- [9] <https://www.linquip.com/blog/types-of-wind-turbines/>.
- [10] [https://energyeducation.ca/encyclopedia/Types\\_of\\_wind\\_turbines](https://energyeducation.ca/encyclopedia/Types_of_wind_turbines).
- [11] <https://www.ablison.com/types-of-wind-turbines/>.
- [12] <https://www.eepowerschool.com/wind/wind-turbine-working-principle/>.
- [13] [https://www.researchgate.net/publication/268352644\\_Alternative\\_configurations\\_for\\_inductiongenerator\\_based\\_geared\\_wind\\_turbine\\_systems\\_for\\_reliability\\_and\\_availability\\_improvement/figures?lo=1](https://www.researchgate.net/publication/268352644_Alternative_configurations_for_inductiongenerator_based_geared_wind_turbine_systems_for_reliability_and_availability_improvement/figures?lo=1).
- [14] <https://www.choisir.com/energie/articles/158984/leolienne-horizontale>.
- [15] <https://electricalacademia.com/renewable-energy/vertical-axis-wind-turbine-vawt-working-types-advantages-disadvantages/>.
- [16] <https://eolienneshop.com/products/eolienne-a-axe-verticale-pour-particulier>.
- [17] Hooman Peimani, Appropriate technologies for removing barriers to the expansion of renewable energy in Asia: vertical axis wind turbines, Asian development bank institute, April 2021, p07.
- [18] <https://blog.arcadia.com/vertical-axis-wind-turbines-advantages-disadvantages/>.
- [19] Hamecha Samira, Ep. Bourekache « Etude et Commande d'une Eolienne à base d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents » Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2013, P40, 41.
- [20] Laiadi Ramzy, Ataoua Youcef « Commande de la machine synchrone à aimant permanent par backstepping » mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra, 2021/2022, P 06.
- [21] Kadri Nadjib « Conception et commande d'un moteur synchrone à aimants permanents » mémoire master académique, université kasdi merbah ouargla, 2019, p 08.

## *Bibliographie*

- [22] Bouakrif Mouad, Sayad Sebti, «Etude d'un système éolien à base d'une machine synchrone à aimant permanent » mémoire de master, université badji mokhtar –Annaba, juin 2021, p27.
- [23] <https://www.theengineeringknowledge.com/permanent-magnet-synchronous-generator/>.
- [24] <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/wound-rotor-induction-generator>.
- [25] Moteur\_cage\_d\_cureuil.pdf
- [26] <https://www.electricalpowerengineering.nl/Electrical-Machines-and-Drives/The-synchronous-machine>.
- [27] Boumaza Ahlem, Bouali Fatima Zahraa « Étude et Simulation de la Machine Asynchrone Double Alimentée (MADA) » mémoire de master, université larbi ben m'hidi d'Oum elbouaghi, 2012, p08, p09.
- [28] René le doeuff « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne » thèse de doctorat de l'université de nantes, 2003, p 26.
- [29] <https://www.electricalpowerengineering.nl/Electrical-Machines-and-Drives/The-synchronous-machine>.
- [30] <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/wound-rotor-induction-generator>.
- [31] [https://www.google.com/search?q=G%C3%A9n%C3%A9rateur+Synchrone+%C3%A0+Aimants+Permanents+\(GSAP\)&sxsrf=AJOqlzWfWGHHjvnxeBS30eEHsLwqRj2Q5A:1678393738911&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwjs9eb018\\_9AhUnXaQEHQsZAEoQ\\_AUoAXoECAEQAw&biw=1366&bih=606&dpr=1#imgrc=59oQylHwoi4FzM](https://www.google.com/search?q=G%C3%A9n%C3%A9rateur+Synchrone+%C3%A0+Aimants+Permanents+(GSAP)&sxsrf=AJOqlzWfWGHHjvnxeBS30eEHsLwqRj2Q5A:1678393738911&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwjs9eb018_9AhUnXaQEHQsZAEoQ_AUoAXoECAEQAw&biw=1366&bih=606&dpr=1#imgrc=59oQylHwoi4FzM).
- [32] <https://www.deepakkumaryadav.in/2021/05/Wound%20Rotor%20Synchronous%20Generation%20in%20Wind%20Power%20Plant.html>.
- [33] Halim Chennoufi, L. Lamri, Ahmed Lokmane Nemmour et Abdelmalek Khezzer « Contrôle d'une génératrice synchrone à aimants permanents dédiée à la conversion de l'énergie éolienne par la commande directe du couple » Université Mentouri, Constantine, Algérie, 2010, P01.
- [34] Ziraoui Salah Eddine « Modélisation et étude d'un système d'énergie éolienne relié au réseau » Mémoire de Fin d'Etudes master, université badji mokhtar- ANNABA, 2017, P 12\_13.
- [35] Islam Jar Allah Boulegroune « Etude et réalisation d'une turbine éolienne » Mémoire de Fin d'Etudes master, Université Mohamed Khider Biskra, 2020, p14.
- [36] <https://www.hindawi.com/journals/mpe/2013/982597/>.
- [37] Abdelkader Berhail « Commande d'une éolienne à base de gsap connectée au réseau électrique par convertisseur multiniveau » mémoire présenté comme exigence partielle de la maîtrise en génie électrique, université du québec à trois-rivières, 2020, p09.
- [38] [https://www.researchgate.net/figure/Tube-de-courant-autour-dune-turbine-eolienne\\_fig26\\_338007588](https://www.researchgate.net/figure/Tube-de-courant-autour-dune-turbine-eolienne_fig26_338007588).
- [39] A. Mirecki, 'Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance', thèse de doctorat, institut national polytechnique de toulouse, avril 2005, p16
- [40] Keddouri Kouider « Génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP) utilisée dans la conversion de l'énergie éolienne » mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra, 2020 P 47.

## *Bibliographie*

- [41]\_Abdelkader Berhail « commande d'une éolienne à base de gsap connectée au réseau électrique par convertisseur multiniveaux » mémoire présenté comme exigence partielle de la maîtrise en génie électrique, université du québec à trois-rivières, 2020, P32.
- [42]\_Mayouf Messaoud « Contrôle d'un aérogénérateur synchrone à aimants permanents autonome » mémoire de fin d'études de master, université mohamed boudiaf - m'sila, 2020, p52.
- [43]\_Gasmi Mohammed, Mediani Abdelkader « Modélisation et simulation d'un système éolien basé sur la machine asynchrone à double alimentation » mémoire de fin d'étude master, université d'Adrar, 2014, P54.
- [44]\_Benchikh le hocine Adem, Moulai sarra « Commande par DTC de la machine synchrone a aiment permanents-application pour un système éolien » memoire de fin d'étude master, université djilali liabes de Sidi-Bel-Abbès, 2017, p37.
- [45] BADDOOU MOHAMMED ABBAS, KERFOUH ABDERRAZAK « LES PERTES MAGNETIQUES DANS LES MATERIAUX MAGNETIQUES DOUX A BASE DE FER »mémoire de master, UNIVERSITE KASDI-MERBAH-Ouargla,2020,P30.
- [46] Jaouad Diouri « Actionneurs électriques 2. Circuits magnétiques » Faculté des Sciences de Tétouan.
- [47] Mayouf Messaoud « Contrôle d'un aérogénérateur synchrone à aimants permanents autonome » mémoire de fin d'étude master, université Mohamed Boudiaf - m'silla, 2020, p33.
- [48] Nouari Aissa Akkouche Bellal « Commande d'une msap dédié éolienne par la méthode de backstepping »mémoire de master, université akli mohand oulhadj- bouira-
- [49] Messaadi Mouna,Commande backstepping appliquée à la machine synchrone a aimants permanents, Département d'électrotechnique, université hadj lakhdar - Batna, 2006.
- [50] B. Robyns, Y.Fu, F.Labrique, H.Buyse, «Commande numérique de moteurs synchrones à aimants permanents de faible puissance, J.Phys. » III France 5 (1995) 1255-1268,
- [51] Tebbal Abderezzak, Sekhri Miloud « Commande Prédictive d'un Système éolien à base d'une Machine Synchrone à Aimant Permanent » mémoire de fin d'étude master, Université Mohamed Seddik Ben Yahia – Jijel, 2019, P 28.
- [52] Chettout abdelhak, Brachouche yacine « Etude et maximisation d'un système éolienne à base d'une machine synchrone à aimants permanents » mémoire de fin d'étude master, Université Abderrahmane Mira de Bejaia, 2019, P 29.
- [53] Bounadja Elhadj « Modélisation des machines électriques » Destiné aux étudiants, première année Master, option : Machines électriques selon le programme officiel. Université Hasiba ben Boualli, Chlef, P24, 25.
- [54] Laadjali Mohamed, « identification des paramètres de la machine asynchrone tréphase » mémoire master, université Saad Dahlab de Blida, 2012, P14, 15.
- [55] Mazouz Farida, « Commande d'un système éolien à base d'un générateur synchrone à aimants permanents » diplôme de magister, l'université Hadj Lakhdar Batna, 2013, p 55, 56,57 onduleurs.
- [56] Mayouf Messaoud, « étude comparative des architectures et stratégies de contrôle d'un aérogénérateur synchrone a aimants permanents » doctorat en science en électrotechnique, l'université Hadj Lakhdar Batna, 2014, p 77.

## *Bibliographie*

- [57] S. Belakehal, A. Bentounsi, M. Merzoug et H. Benalla « Modélisation et commande d'une génératrice Synchrone à aimants permanents dédiée à la conversion de l'énergie éolienne » Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université Mentouri de Constantine, 2010, P154, 155.
- [58] S. Belakehal, A. Bentounsi, M. Merzoug et H. Benalla « Modélisation et commande d'une génératrice Synchrone à aimants permanents dédiée à la conversion de l'énergie éolienne » Université Mentouri de Constantine, 2010, P 154, 155
- [59] [https://www.researchgate.net/figure/Schema-de-lassociation-MSAP-Redresseur-MLI\\_fig4\\_228353964](https://www.researchgate.net/figure/Schema-de-lassociation-MSAP-Redresseur-MLI_fig4_228353964).
- [60] Allali Loubna « Commande vectorielle de la génératrice synchrone à aimants permanents » mémoire master, université Larbi Ben M'hidi d'Oum El Bouaghi, 2016, P30, 31.

