

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET  
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE DE BATNA  
FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR  
DEPARTEMENT D'ÉLECTROTECHNIQUE

## MEMOIRE

Pour l'Obtention du Diplôme de Magister en Electrotechnique

Option : Maîtrise d'énergie

Présenté par :

**Mr : DOUADI TAREK**

Ingénieur d'État en Électrotechnique de l'Université de BATNA

## THEME

---

---

**Etude et Commande d'un Système Eolien à Base d'une  
Génératrice Asynchrone**

---

---

Soutenu le : ...../...../.....devant le jury composé de :

Dr. Abdessemed Rachid	Professeur	U. BATNA	Président
Dr : Sellami Said	M.C.A	U. BATNA	Rapporteur
Dr : Naceri Farid	Professeur	U. BATNA	Co-Rapporteur
Dr : Chikhi Khaled	M.C.A	U. BATNA	Examineur
Dr : Dib A/Rahmane	M.C.A	U.O.E.BOUAGHI	Examineur

## REMERCIEMENTS

*Je tiens à présenter mes sincères remerciements à toute personne ayant contribué à la réalisation de ce travail.*

*Je remercie Monsieur Dr SELLAMI .Saïd, pour avoir accepté d'être le rapporteur de ce mémoire.*

*J'exprime mes vifs remerciements à mon Co rapporteur*

*Pr NACERI. Farid, professeur de l'enseignement supérieur à l'université de Batna, pour son aide, ses conseils précieux et de ses encouragements incessant durant la réalisation de ce travail.*

*Je tiens, à remercier profondément :*

*Pr Abdessemed. Rachid, professeur de l'enseignement supérieur à l'université de Batna, pour sa participation au jury de ce présent mémoire en tant que président de jury de soutenance de ce mémoire.*

*Dr Dib A/Rahmane Maître de conférences à l'université de Oum El Bouaghi , pour m'avoir honoré de sa présence en acceptant d'être membre de jury. Dr Chikhi. Khaled Maître de conférences à l'université de Batna, pour l'intérêt qu'il a bien voulu manifester à ce mémoire en acceptant d'être membre de jury.*

# Sommaire

Liste des abréviations et symboles

## Introduction générale

1. Généralités .....	1
2. Objectif du projet.....	1
3. Structure du projet.....	2

## Chapitre 1 : Énergie renouvelable

Introduction.....	3
I.1 énergie renouvelable.....	3
I.2 Énergie renouvelable dans le monde .....	4
I.2.1 Énergie hydraulique.....	4
I.2.2 Énergie solaire.....	4
I.2.3 Énergie géothermie .....	5
I.2.4 Énergie de la biomasse .....	6
I.2.5 Énergie éolienne .....	6
I.3 Constituions d'une éolienne .....	7
I.3.1 principe .....	7
I.3.2 Constituions.....	8
I.4 Technique d'une éolienne.....	10
I.4.1 Les caractéristique mécanique .....	10
I.4.2 Les caractéristiques électrotechniques .....	12
I.4.2.1 différents types de génératrice peuvent être rencontrés.....	12
I.4.2.2 configurations électroniques utilisant la machine asynchrone .....	13
I.4.2.3 configurations électroniques utilisant la machine asynchrone.....	14
I.5 Différente type d'éoliennes .....	15
I.5.1 Les éoliennes à axes horizontal.....	15
I.5.2 Les éoliennes à axe vertical.....	15
I.6 Application des éoliennes.....	16
I.6.1 Systèmes isolés .....	16
I.6.2 Systèmes hybrides .....	16
I.6.3 Systèmes liés au réseau .....	17
I.7 Avantage et inconvénients de l'énergie éolienne .....	17
I.7.1 Les inconvénients .....	17
I.7.2 Les avantage.....	18
I.7.2.1 L'énergie éolienne a d'autre part des atouts économiques certains	18
Conclusion.....	20

## Chapitre 2 : Conversion de l'énergie éolienne et contrôle au niveau de la turbine

Introduction .....	21
<b>II.1</b> Fonctionnement d'une éolienne.....	21
<b>II.1.1</b> Contrôle de la conversion d'énergies .....	21
<b>II.1.2</b> Au niveau de la turbine .....	22
<b>II.1.3</b> Au niveau du générateur .....	22
<b>II.1.4</b> Le système de commande d'une générateur .....	23
<b>II.2</b> Système mécanique transmission de la puissance pour la modélisation mécanique de la turbine.....	23
<b>II.2.1</b> Les éléments complets du système mécanique complet .....	23
<b>II.2.2</b> Modèle mécanique de la turbine .....	23
<b>II.3</b> Énergie du vent récupérable .....	24
<b>II.3.1</b> Théorie de betz.....	25
<b>II.3.2</b> Théorème d'éluier .....	26
<b>II.4</b> Modélisation de la ressource .....	26
<b>II.4.1</b> Potentiel de la ressource .....	27
<b>II.5</b> Modèle du multiplicateur .....	29
<b>II.5.1</b> Choix du rapport de multiplicateur .....	29
<b>II.6</b> Modèle d'arbre .....	30
<b>II.6.1</b> Graphe d'information du modèle de la turbine .....	30
<b>II.7</b> Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne .....	31
<b>II.7.1</b> Les quatre zones principales de fonctionnement.....	31
<b>II.8</b> Principes de contrôle de la puissance.....	32
<b>II.8.1</b> Graphe information du modèle de la turbine de contrôle de la vitesse en boucle fermée.....	34
<b>II.8.2</b> Fonction la turbine applique GADA à la zone (2) .....	34
<b>II.8.3</b> modèle de la turbine en zone 2 .....	35
<b>II.8.4</b> Modèle de la turbine avec régulation de la vitesse .....	35
<b>II.9</b> Résultats de simulation .....	36
Conclusion.....	37

## Chapitre 3 : Commande du système éolien à base de la GADA

Introduction.....	38
<b>III.1</b> choix du générateur .....	38
<b>III.2</b> Modélisation de la machine asynchrone à double alimente .....	39
<b>III.2.1</b> Modèle mathématique de M A D A .....	39
<b>III.2.1.1</b> hypothèses simplificatrices .....	39
<b>III.2.2</b> Modèle de la M A D A .....	39
<b>III.2.3</b> Équations électrique de la machine asynchrone à double alimentation	40

<b>III.3</b> Application de la transformation de Park à la MADA .....	41
-Choix du référentiel.....	41
<b>III.4</b> Mode de fonctionnement d'une GADA dans un système éolien.....	41
<b>III.5</b> Variation de la vitesse de MADA .....	43
<b>III.6</b> Modèle mathématique de la GADA dans le référentiel synchrone.....	44
<b>III.6.1</b> Modèle biphasé de la GADA .....	44
<b>III.7</b> Stratégie de commande de la GADA .....	46
<b>III.7.1</b> Commande de la génératrice asynchrone double alimentation.....	46
<b>III.7.2</b> Commande vectorielle de la GADA.....	46
<b>III.7.3</b> Modèle de la GADA avec orientation du flux statorique.....	46
<b>III.8</b> Relation du processus et de la commande vectorielle de la GADA.....	50
<b>III.9</b> Représentation GADA sous la forme graphe information.....	51
<b>III.9.1</b> Modèle de GADA à réguler.....	51
<b>III.10</b> Graphe d'information de modèle de la commande.....	52
<b>III.11</b> Systèmes de commande d'une GADA .....	52
<b>III.12</b> Modelé de commande d'une GADA .....	53
<b>III.13</b> Résultats de simulation .....	53
Interprétation des résultats .....	55
Conclusion.....	55

## **Chapitre 4 : Association onduleur-SVM de la GADA**

Introduction.....	56
<b>IV.1</b> Onduleur de tension .....	57
<b>IV.2</b> Modélisation de l'onduleur de tension .....	57
<b>IV.3</b> Principe de l'onduleur de tension a MLI .....	59
<b>IV.4</b> Les états de commutation MLI de la SVM .....	60
<b>IV.5</b> Technique de la (space vector modulation) S V M .....	61
<b>IV.5.1</b> table de l'onduleur de tension .....	63
<b>IV.6</b> Principe de le (space vector modulation) SVM .....	65
<b>IV.6.1</b> Les temps d'application du vecteur d'état pour chaque secteur.....	66
<b>IV.6.2</b> Détermination de $a_{P\text{PWM}}$ , $b_{P\text{PWM}}$ et $c_{P\text{PWM}}$ .....	67
<b>IV.7</b> Résultats de simulation .....	69
Interprétation des résultats .....	70
Conclusion.....	71
Conclusion générale .....	72
Bibliographie.	
Annexe.	
Paramètres de simulation.	

## LISTE DES ABREVIATIONS ETSYMBOLS

MAS	Machine asynchrone
GADA	Génératrice asynchrone à double alimenté
MADA	machine asynchrone à double alimenté
MLI	modulation de largeur d'impulsion
SVM	Space Vector Modulation
$\Omega_{tur}$	vitesse tournant d'arbre
$(f_{b1}, f_{b2}, f_{b3})$	Les forces qui dépendent de la vitesse de vent
$J_{pal}$	La même élasticité
$d_a$	Le coefficient de frottement par rapport à l'aire
$J_a$	Inertie d'arbre
$K_a$	San élasticité
$D_a$	Coefficient de fortement par rapport au multiplicateur $d_a$
$J_G$	Une inertie
$D_G$	Un coefficient de fortement $D_G$
$F_{rot}$	Force de rotation
$m$	Quantité de mouvement
$p_v$	Puissance contenue dans le vent sous forme d'énergie cinétique
$\rho$	Densité volumique de l'aire
$s_b$	Surface balayée par les pales ( $m^2$ )
$v$	vitesse filtrée du vent au moyeu de la turbine
$\beta$	Angle de calage des pales
$P_{aer}$	Puissance captée par la turbine
$c_p$	Coefficient de puissance ( <b>sans unité</b> )
$\lambda$	Rapport de vitesse ( <b>sans unité</b> )
$r_t$	Rayon de la turbine en mètre ( <b>m</b> )
$c_{aer}$	Couple aerogenerateur
$c_g$	Couple de la machine
$c_{mec}$	Couple mécanique
$j$	L'inertie totale qui apparait sur le rotor de la génératrice
$c_r$	Couple ristance
$P_n$	puissance nominale
$V_n$	vitesse nominale du vent
$V_m$	vitesse maximale du vent
$V_d$	vitesse démarrage du vent
$c_{PID}$	est le régulateur de vitesse
$\Omega_{ref}$	est la vitesse mécanique de référence
$c_{pmax}$	Coefficient de puissance maximal
$r_s$	Résistance d'une phase statorique
$r_r$	Résistance d'une phase rotorique
$\omega_r$	pulsation de fréquence rotorique

$\omega_s$	pulsation de fréquence
$(x, y)$	Axes correspondant au référentiel lié au rotor
$(\alpha, \beta)$	Axes correspondant au référentiel lié au stator
$(d, q)$ :	Axes correspondant au référentiel lié au champ tournant
$\varphi_{sd}, \varphi_{sq}$	Flux stator instantané selon l'axe (d,q)
$\varphi_{rd}, \varphi_{rq}$	Flux rotor instantané selon l'axe (d,q)
$v_{rd}, v_{rq}$	tension rotor instantanée selon l'axe (d,q)
$v_{sd}, v_{sq}$	tension stator instantanée selon l'axe (d,q)
S	opérateur dérivée de Laplace d/dt
$L_s$	Inductance cyclique propre statorique
$L_r$	Inductance cyclique propre rotorique
M	L'inductance mutuelle
$i_{sd}, i_{sq}$	courant stator instantané selon l'axe (d,q)
$i_{rd}, i_{rq}$	courant rotor instantané selon l'axe (d,q)
$p$	Nombre de paire de pôles
$\Omega$	vitesse de rotation de la machine
$j$	Moment d'inertie de l'ensemble machine et turbine éolienne
$f_r$	Coefficient de frottement
$P_s$	Puissance active transmise par le stator de la machine électrique
$P_r$	Puissance active transmise par le rotor de la machine électrique
$P_m$	Puissance mécanique
$Q_s$	Puissance réactive statorique
$Q_r$	Puissance réactive rotorique
$g$	Glissement
$\sigma$	Coefficient de dispersion de Blondel ou coefficient de fuit total
PI	Correcteur proportionnelle-intégral
$T_s$	Constante de temps statorique
$(u_{an_0}, u_{bn_0}, u_{cn_0})$	tension de entrée de l'onduleur
$(u_{an}, u_{bn}, u_{cn})$ :	Tension de sortie de l'onduleur
$s_j: (j=a, b, c)$	Grandeur booléennes de commande (des interrupteur de l'onduleur)
$U_c$	Tension continue
[T]	matrice assurant le passage continu-alternatif
$\vec{U}_{Srf}$	La tension de phase du vecteur d'espace
$T_s$	Temps d'application
$(\vec{U}_{Srf\alpha}, \vec{U}_{Srf\beta})$	Vecteur tension de référence
$(\vec{U}_1, \vec{U}_7)$	Vecteur d'espace
$(a^*, b^* \text{ et } c^*)$	rapport cyclique résultant

## **1. Généralités**

Les énergies propres et renouvelables tels que la biomasse, l'hydraulique, le solaire et l'éolienne sont par fois présentés comme l'une des solutions au problème du réchauffement climatique puisqu'elles n'émettent aucun gaz à effet de serre.

Il faudrait pour cela pouvoir développer suffisamment l'énergie renouvelable pour pouvoir diminuer la consommation de l'énergie fossile.

Aujourd'hui, le développement et la multiplication des éoliennes ont conduit les chercheurs en génie électrique à mener des investigations de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie.

C'est dans ce cadre que le présent mémoire que nous vous présentons décrit une étude sur l'utilisation de la machine asynchrone dans un système éolien.

## **2. Objectif du projet**

-Montrer la modélisation de ressource de la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique par la turbine, expliciter les différents éléments constitutifs de la turbine et montre le modèle de la turbine où on tient compte de (MPPT) dans le but d'extraire le maximum de puissance.

-Etablissement d'un modèle diphasé de la GADA ,et mise en place d'une stratégie de commande permettant le fonctionnement en génératrice dans le contexte d'un système éolien.et appliquer cette commande pour contrôler indépendamment la puissance active et réactive générées par la machine asynchrone.

-Evaluation des performances par l'association avec un modèle de turbine.

-Appliquer la technique de la modulation vectorielle SVM pour minimiser les ondulations de tensions et de courant.

## **3. Structure du mémoire**

Dans le premier chapitre, on va présenter l'état des énergies renouvelables où on présentera l'étude des aérogénérateurs, leurs constitutions et leur principe.

Le deuxième chapitre, après un rappel des notions élémentaires à la compréhension de la chaîne de conversion de l'énergie du vent en énergie électrique, sera consacré à la description et la modélisation de la turbine, des systèmes éoliens à travers les équations et les concepts physiques régissant son fonctionnement en présentant le modèle de la turbine avec régulateur PI appliqué pour asservissement de la vitesse de l'arbre.

Dans le troisième chapitre nous traiterons la génératrice asynchrone à double alimentation ; Cette dernière sera modélisée et simulée dans l'environnement MATLAB, en

se basant sur la transformation de PARK, ainsi que les grandeurs de commande utilisées lorsqu' elle est intégrée à un système éolien, une modélisation dans un repère biphasé lié au champ statorique et une stratégie de commande vectorielle en puissance active et réactive statorique sont proposées

Dans ce même chapitre nous proposerons, une synthèse du régulateur proportionnel-intégral (PI), ainsi que des résultats obtenus par simulation.

Le quatrième chapitre sera consacré à l'étude de l'association machine asynchrone – convertisseur. Nous présenterons la modélisation de l'onduleur de tension, et également la technique de la modulation vectorielle SVM (*Space Vector Modulation*). Par cette technique seront notamment présentés des résultats de la simulation de la GADA qui est Alimentée par un onduleur.

# CHAPITRE 1

## Énergie renouvelable

### Généralités sur l'énergie renouvelable

#### **Introduction**

Après un bilan des ressources énergétiques renouvelables nous nous intéressons à l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique. En effet, il existe deux types d'éoliennes à savoir les éoliennes à axe vertical et les éoliennes à axe horizontal. Ainsi dans ce qui suit nous allons énoncer en première partie une généralité sur les différents éléments constitutifs d'une éolienne et les différents types d'éoliennes, ensuite nous allons intéresser plus particulièrement à l'application des éoliennes.

#### **I.1 Energies renouvelables**

Les énergies renouvelables (soleil, vent, eau, biomasse) sont des sources d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérées comme inépuisables à l'échelle de l'homme. D'une façon générale, les énergies renouvelables sont des modes de production d'énergie utilisant des forces ou des ressources dont les stocks sont illimités. On peut dire alors qu'une source d'énergie est renouvelable si le fait d'en consommer ne limite pas son utilisation future. En plus de leur caractère illimité, ces sources d'énergie sont peu ou pas polluantes. Le solaire, l'éolien, l'eau, et la biomasse génère certains gaz polluants, mais en bien moindre quantité que des carburants fossiles, [1].

Pour autant, ces énergies ne couvrent encore que 20% de la consommation mondiale d'électricité en notant que l'hydroélectricité représente 92,5% de l'électricité issue des ER (biomasse 5,5%, éolien 1,5%, géothermie 0,5% et le solaire 0,05%). Ainsi, la capacité totale de production d'électricité issue d'énergies renouvelables (hors grande hydraulique) s'élève à 160 gigawatts (GW), soit 4% de la capacité mondiale du secteur énergétique. Les pays en développement produisent 44% de cette capacité, soit 70 GW, [2].

## I.2 Energies renouvelables dans le monde

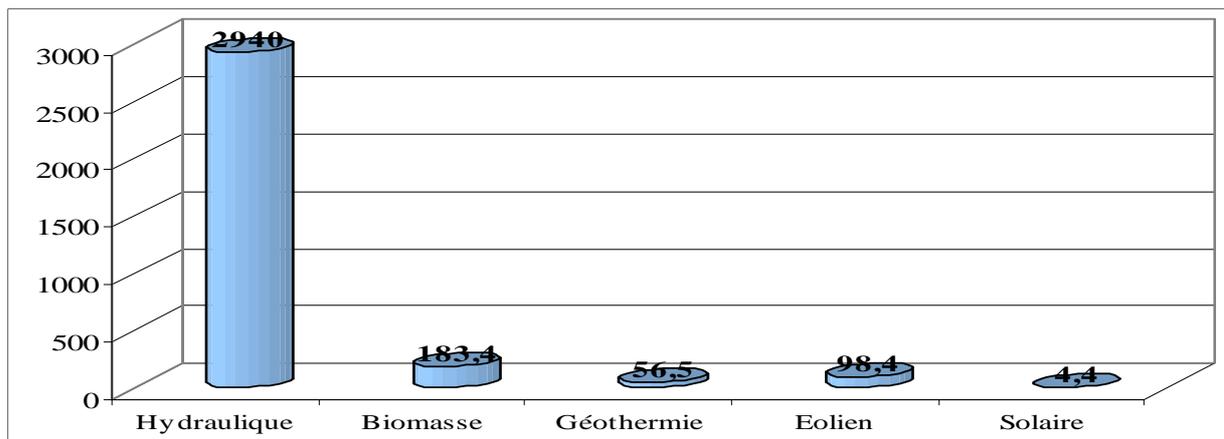


Figure (1.1) la production mondiale d'électricité en 2005

### I.2.1 Energie hydraulique

De nombreuses civilisations se sont servies de la force de l'eau, qui représentait une des sources d'énergie les plus importantes avant l'ère de l'électricité. Un exemple connu est celui des moulins à eau, placés le long des rivières. Aujourd'hui, bien que de nombreux sites aient été parfaitement équipés, cela ne suffit plus à compenser l'augmentation vertigineuse de la consommation. De nos jours l'énergie hydraulique est utilisée au niveau des barrages et sert principalement à la production d'électricité,

Le principe en est simple : La force motrice de l'eau fait tourner une turbine qui entraîne un générateur électrique (système comparable à une dynamo). Ensuite, l'électricité obtenue peut être soit utilisée directement ou stockée en batteries, soit injectée dans le réseau de distribution. La puissance disponible dépend de deux facteurs la hauteur de la chute d'eau et le débit de l'eau.

### I.2.2 Energie solaire

L'énergie solaire est une énergie qui dépend du soleil, bien que cette dernière distante de plus de 150 millions de kilomètres de nous, demeure notre plus grande source d'énergie même si elle est intermittente.

Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité à partir des panneaux photovoltaïques ou des centrales solaires thermiques, grâce à la lumière du soleil captée par des panneaux solaires qui permet de récupérer l'énergie du soleil et de produire de l'électricité, sans pièces tournantes et sans bruit et elle n'émet aucun gaz à effet de serre. L'électricité produite peut être soit stockée dans des batteries pour les installations autonomes, soit injecté dans le réseau.

Par sa souplesse et sa facilité d'installation et de maintenance, l'énergie solaire est une solution technique et économique pour l'électrification des sites isolés

On peut distinguer trois types d'énergie solaire : le solaire photovoltaïque, le solaire passif et le solaire thermique.

#### ❖ **Energie solaire photovoltaïque**

L'effet photovoltaïque, décrit par le physicien français Antoine Becquerel (le grand père du découvreur de la radioactivité) en 1839, dont le principe est simple : La lumière du soleil (les photons) est transformée directement en électricité (les électrons) par des cellules photovoltaïque. Ces cellules sont reliées entre-elles sur un module solaire photovoltaïque. Plusieurs modules sont regroupés pour former une installation solaire, qui alimente un réseau de distribution électrique.

L'énergie solaire photovoltaïque est la seule filière qui peut être installée n'importe où, y compris en centre ville, permettant d'économiser d'autant les besoins de fourniture par le réseau des bâtiments équipés. Elle est surtout utilisée pour la fourniture d'électricité dans les sites isolés, électrification rurale et pompage de l'eau (50%), télécommunications et signalisation (40%), applications domestiques (10%),

#### ❖ **Energie solaire thermique**

A la différence du solaire photovoltaïque, on désigne par énergie solaire thermique la transformation du rayonnement solaire en énergie thermique. La production de cette énergie peut être soit utilisée directement (pour chauffer un bâtiment par exemple) où indirectement (comme la production de vapeur d'eau pour entraîner des alternateurs et ainsi obtenir une énergie électrique). Le principe général est de concentrer les rayons solaires en un seul endroit. Le solaire thermique se décline de différentes façons : centrales solaires thermodynamiques, chauffe-eau solaire, cuisinières et sécheurs solaires,

### **I.2.3 Energie géothermie**

Du grec *Gé* (terre) et *thermos* (chaud) l'énergie géothermique est une source d'énergie qui dépend de la chaleur de la terre. Elle provient principalement de la désintégration des éléments radioactifs naturellement présents dans les roches du sous-sol, Dans certaines roches et à certaines profondeurs circule, sous forme de vapeur et d'eaux chaudes. La température des roches augmente en moyenne de 1°C tous les 30m de profondeur. En certains points du globe, en particulier dans les régions volcaniques, qui correspondent à des intrusions de magma dans la croûte terrestre, cela peut aller jusqu'à 100 °C par 100m, A la surface de la terre, cette énergie est en moyenne 10000 fois plus faible que l'énergie fournie par le soleil.

L'énergie géothermique n'est donc utilisable que dans des zones particulières où elle s'est accumulée.

### **I.2.4 Energie de la biomasse**

L'énergie de la biomasse est la forme d'énergie la plus ancienne utilisée par l'homme depuis la découverte du feu à la préhistoire, c'est l'ensemble de la matière organique d'origine biologique, qu'elle soit végétale ou animale par exemple, les plantes et les animaux sont de la biomasse, ainsi que les matériaux qu'ils produisent, tel le bois et les déchets. La biomasse est une énergie renouvelable tant que sa consommation ne dépasse pas l'accroissement biologique.

Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité grâce à la chaleur dégagée par la combustion de ces matières (bois, végétaux, déchets agricoles, ordures ménagères organiques) ou du biogaz issu de la fermentation de ces matières, ou bien après de nouvelles transformations chimiques biocarburants. La biomasse est une énergie qui peut être polluante ; comme le biocarburant et le bois qui donne, quand on le brûle, des gaz à effet de serre.

### **I.2.5 Energie éolienne**

L'énergie du vent ou l'énergie éolienne est le résultat des déplacements de l'air et plus spécifiquement, l'énergie tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur comme une éolienne ou un moulin à vent. Elle peut être utilisée de deux manières : directe et indirecte.

- ❖ **Direct** : Conservation de l'énergie mécanique : le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (navire à voile ou char à voile), pour pomper de l'eau (moulins de Majorque, éoliennes de pompage pour abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin,
  
- ❖ **Indirect** : Transformation en énergie électrique : l'éolienne est accouplée à un générateur électrique pour fabriquer un courant continu ou alternatif, le générateur est relié à un réseau électrique ou bien il fonctionne de manière autonome avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène) ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie.

## I.3 Constitution d'une éolienne

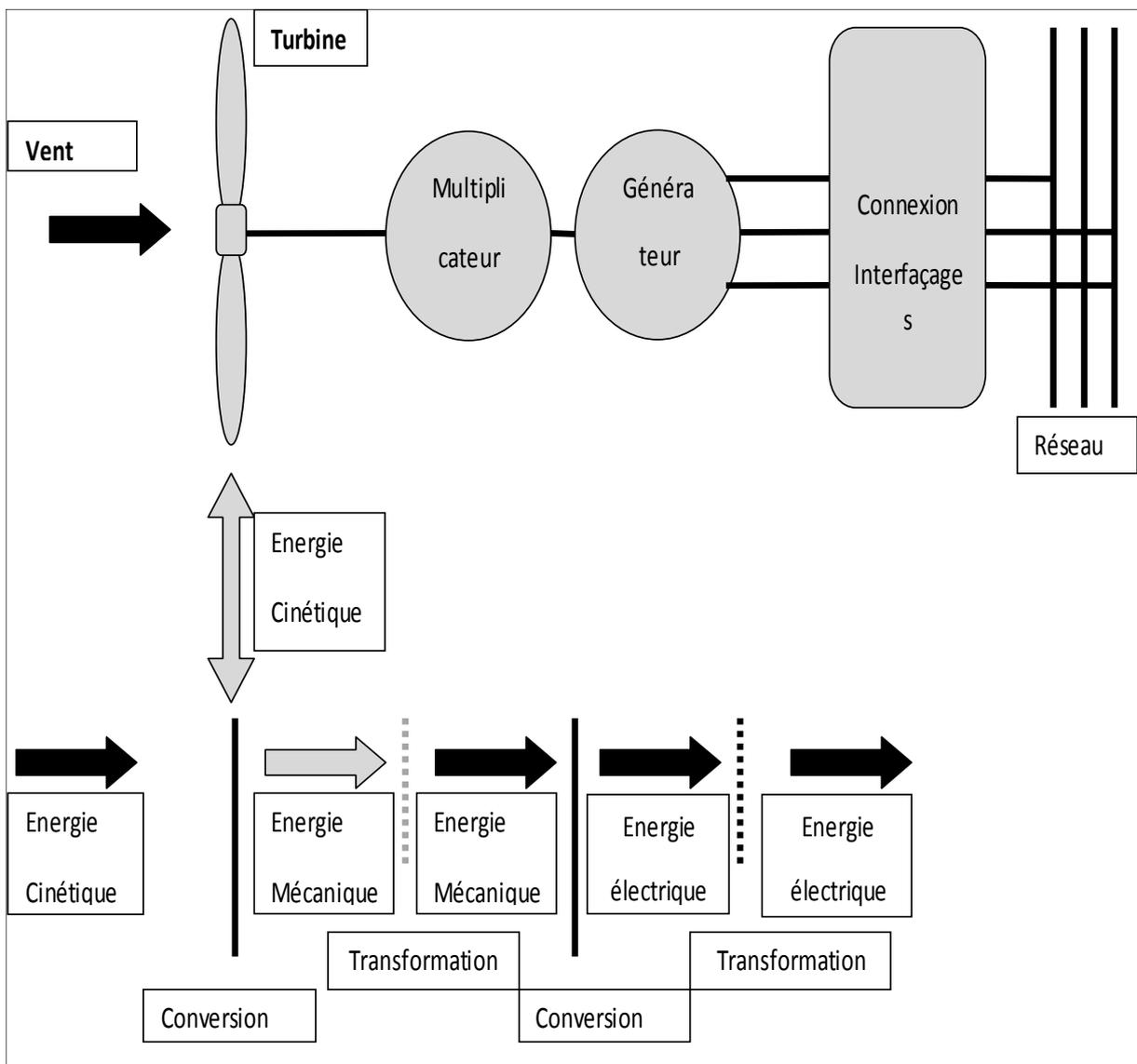
### I.3.1 Principe

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique[5]. Cette conversion se fait en deux étapes :

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

Il doit donc y avoir des conversions et des transmissions régulières de l'énergie, la seule possibilité de stockage étant inertielle au prix d'une accélération de la turbine.

Ce fonctionnement général est illustré par la **figure (1.2)**

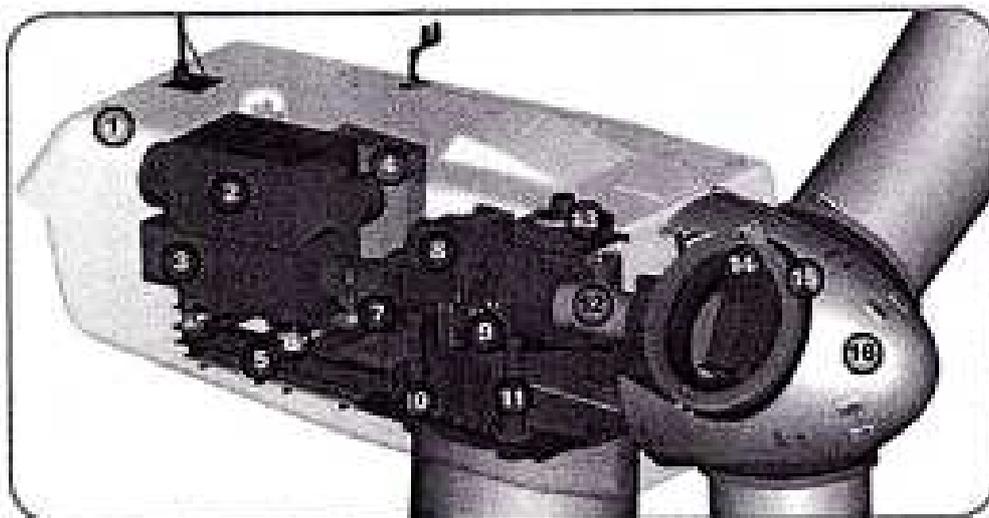


**Figure (1.2)** principe de conversion d'énergie

### I.3.2 Constitution

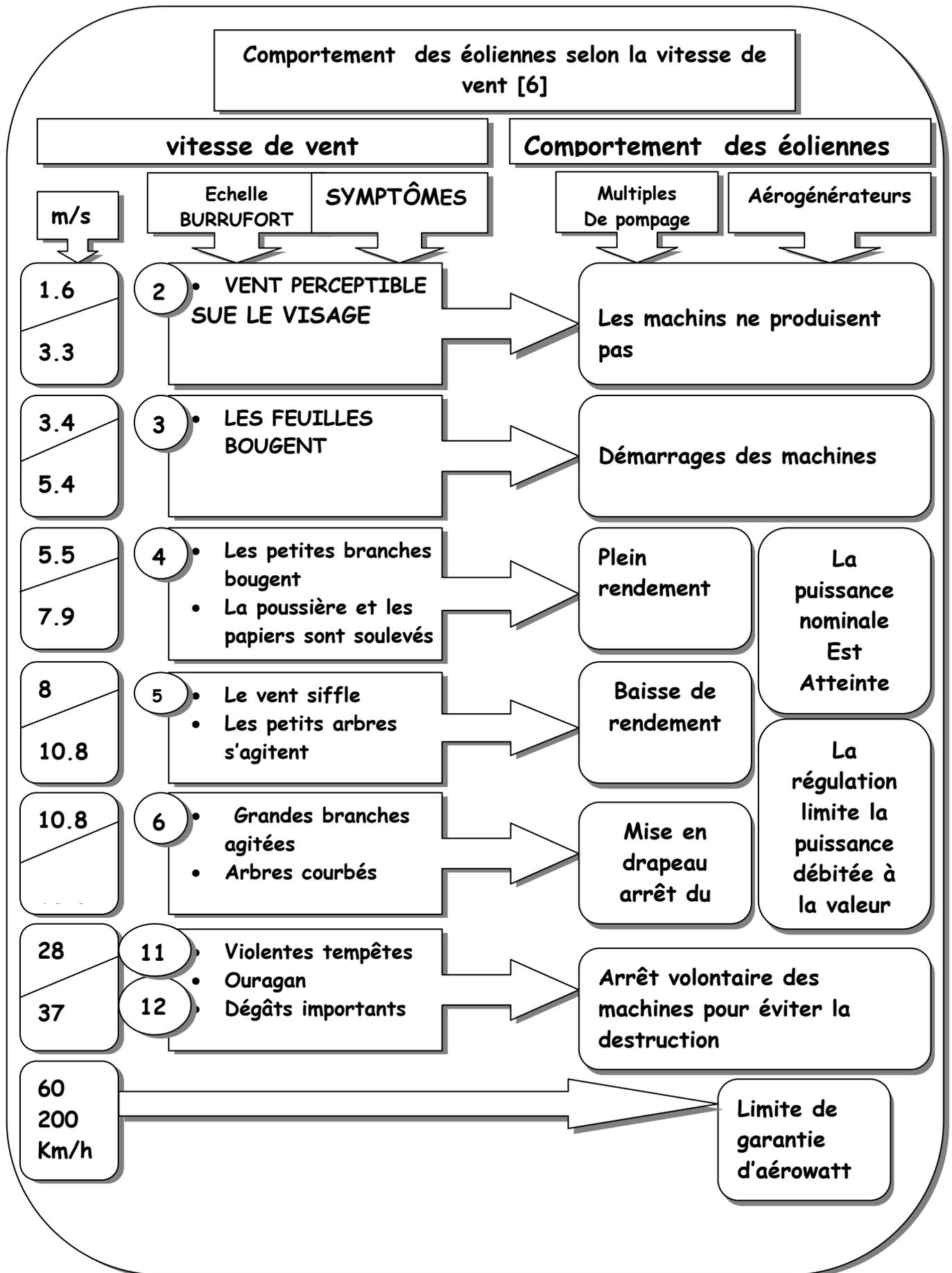
Une éolienne typique est composée de plusieurs éléments qui sont présentés sur la figure (1.3) un mât, ou tour, supporte la nacelle (1) et la turbine (16). Il est important qu'il soit haut du fait de l'augmentation de la vitesse du vent avec la hauteur. Il est tubulaire et accueille une échelle voire un ascenseur. La nacelle (1) partiellement insonorisée (6), (9), avec une armature métallique (5), accueille la (3) et son système de refroidissement (2), le multiplicateur de vitesse (8) et différents équipements électroniques de contrôle (4) qui permettent de commander les différents mécanismes d'orientation ainsi que le fonctionnement global de l'éolienne.

Le multiplicateur de vitesse comporte un arbre lent (12) supportant la turbine (16) et un arbre à grande vitesse (1000 à 2000 trs/min) il est équipé d'un frein mécanique à disque (7), auquel est accouplé le générateur (3). Le multiplicateur de vitesse est pourvu d'un système de refroidissement (13) pour l'huile.



**Figure (1.3)** exemple de système éolien [5]

La turbine (16) possède en générale trois pales (15) qui permettent de capter l'énergie du vent et de la transférer à l'arbre lent. Un système électronique (14) permet généralement d'orienter les pales et ainsi de contrôler le couple de la turbine et réguler sa vitesse de rotation. Les pales fournissent également un frein aérodynamique par « mise en drapeau » ou seulement par rotation de leurs extrémités. Un mécanisme utilisant des servomoteurs électriques (10), (11) permet d'orienter la nacelle face au vent. Un anémomètre et une girouette situés sur le toit de la nacelle fournissent les données nécessaires au système de contrôle pour orienter l'éolienne et la déclencher ou l'arrêter selon la vitesse du vent.



## I.4 La Technique d'une éolienne

Une éolienne, accouplée à un générateur électrique ou à une dynamo, fabrique du courant continu qui peut soit alimenter des batteries, soit être relié au secteur (courant alternatif obtenu grâce à un onduleur) .on la nomme alors aérogénératrice.

Pour comprendre comment marche une éolienne, il faut connaître ses caractéristiques mécaniques, électrotechniques et aérodynamiques [7]

### I.4.1 Les caractéristiques mécaniques :

Une éolienne est principalement composée de 3 éléments qui sont :

Le mât (tour ou pylône), le rotor (moyeu et pales) et la nacelle

#### ❖ Tour ou mât

Son rôle est d'une part de supporter l'ensemble (rotor, nacelle) pour éviter que les pales ne touchent le sol, mais aussi de placer le rotor à une hauteur suffisante, pour améliorer la captation de l'énergie, [8]. Le mât peut être réalisé en acier roulé ou plié, protégé contre la corrosion ou bien en béton armé, [9].

#### ❖ Le rotor (moyeu et pales)

Est composé des pales qui sont montées sur un moyeu et nez de l'éolienne .c'est la partie mobile du système.

Il transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique .il est couplé à une pompe ou à un générateur électrique .il est relié à la nacelle par le moyeu. Le diamètre du cercle formé par les pales du rotor détermine la quantité d'énergie pouvant être extraite du vent et par conséquent la puissance générée par le système,

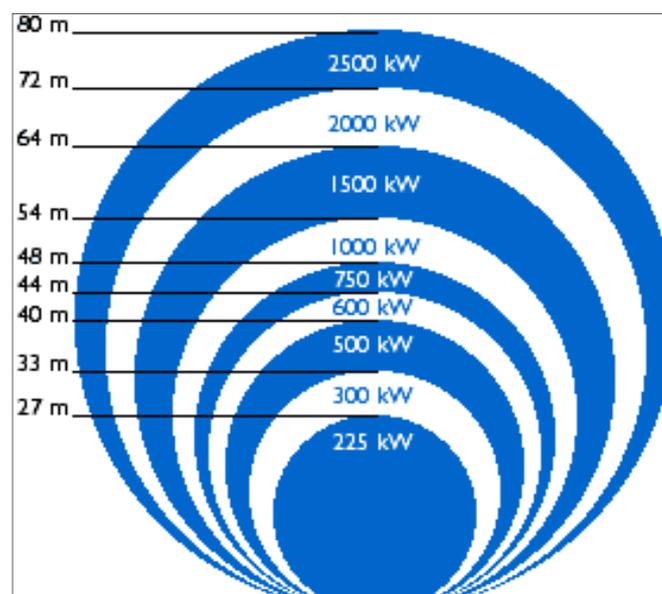


Figure (1.4) Puissance suivant le diamètre de l'éolienne

### a) Moyeu

En générale c'est une pièce d'acier moulé, il reçoit les pales sur des brides normalisées et se monte sur l'arbre lent (primaire) du multiplicateur. Sa conception utilise les éléments finis. Il est souvent protégé par une coupe en polyester forme d'obus qui lui donne une forme aérodynamique (plus esthétique que fonctionnelle).[11]

### b) les Pales

Les pales sont une partie très importante des éoliennes, le nombre de pales influence directement l'efficacité de conversion du rotor, plus le nombre de pales est élevé, plus le couple transmis à l'arbre du rotor sera grand.[9]

### ❖ la Nacelle

Qui relie le mat et le rotor. Elle abrite les composants électriques et électroniques, ainsi que, sur les grandes éoliennes, le calculateur qui permet l'orientation du rotor de l'éolienne et la modification de l'angle d'incidence des pales en fonction de la direction du vent .un aileron arrière dirige les petites éoliennes à la manière d'une girouette.

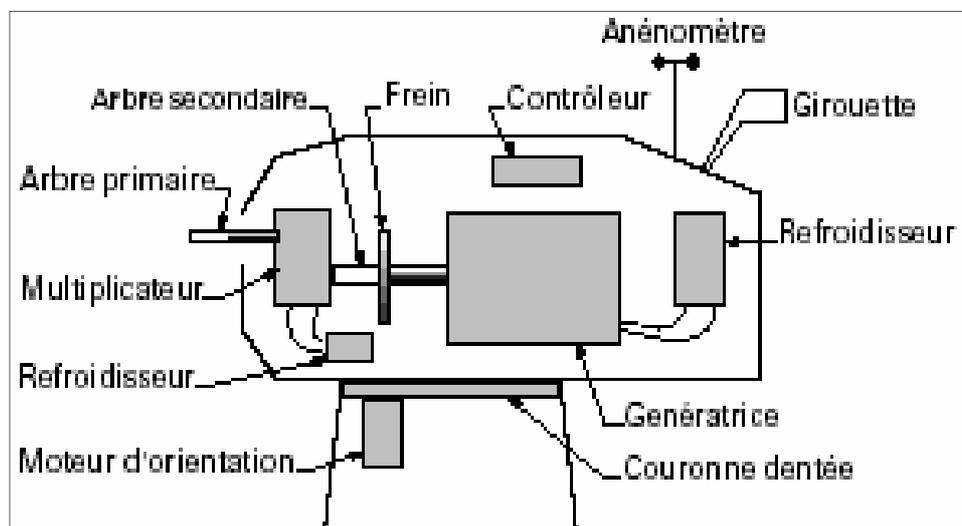


Figure (1.5) Eléments d'une nacelle [8]

## I.4.2 Les caractéristiques électrotechniques

Les composantes électriques et électronique (**modulateur, commande multiplicateur, générateur, etc.**) sont généralement placés dans la nacelle ou dans le haut du mat. Ce sont l'élément les plus emportons d'une éolienne, ceux qu' l'on doit choisir en premier.

### ❖ Le générateur

Le générateur transforme l'énergie mécanique fournie par le rotor en énergie électronique. C'est la pièce la plus importante de l'aérogénérateur puisque c'est lui qui fabrique le courant. Il existe entraîne l'alternateur par l'intermédiaire d'un système d'engrenages (transmission). Le générateur exploite le principe de l'induction électromagnétique c'est –dire que l'on fait bouger un fil de cuivre émaillé dans un champ magnétique produit par des aimants

### I.4.2.1 Différents types de génératrice peuvent être rencontrés

#### a) Génératrice à courant continu

Ce type de machine n'est utilisé que sur les éoliennes de très faible puissance (inférieur à 500W) pour charger des batteries et alimenter des installations de type station de mesure.

#### b) Génératrice synchrone

Ce type de machine est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité, notamment dans ceux de très grande puissance (centrales thermiques, hydrauliques ou nucléaires). Les générateurs synchrones utilisés dans le domaine éolien, ceux de 500 kW à 2 MW sont bien plus chers que les générateurs à induction de la même taille. De plus, lorsque ce type de machine est directement connecté au réseau, sa vitesse de rotation est fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion générateur-réseau, les fluctuations du couple capté par l'aéroturbine se propagent sur tout le train de puissance, jusqu'à la puissance électrique produite. C'est pourquoi les machines synchrones ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs directement connectés au réseau. Elles sont par contre utilisées lorsqu'elles sont connectées au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance. Dans cette configuration, la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine sont découplées. Cette vitesse peut par conséquent varier de sorte à optimiser le rendement aérodynamique de l'éolienne et amortir les fluctuations du couple dans le train de puissance,[12]

### c) Génératrice asynchrone

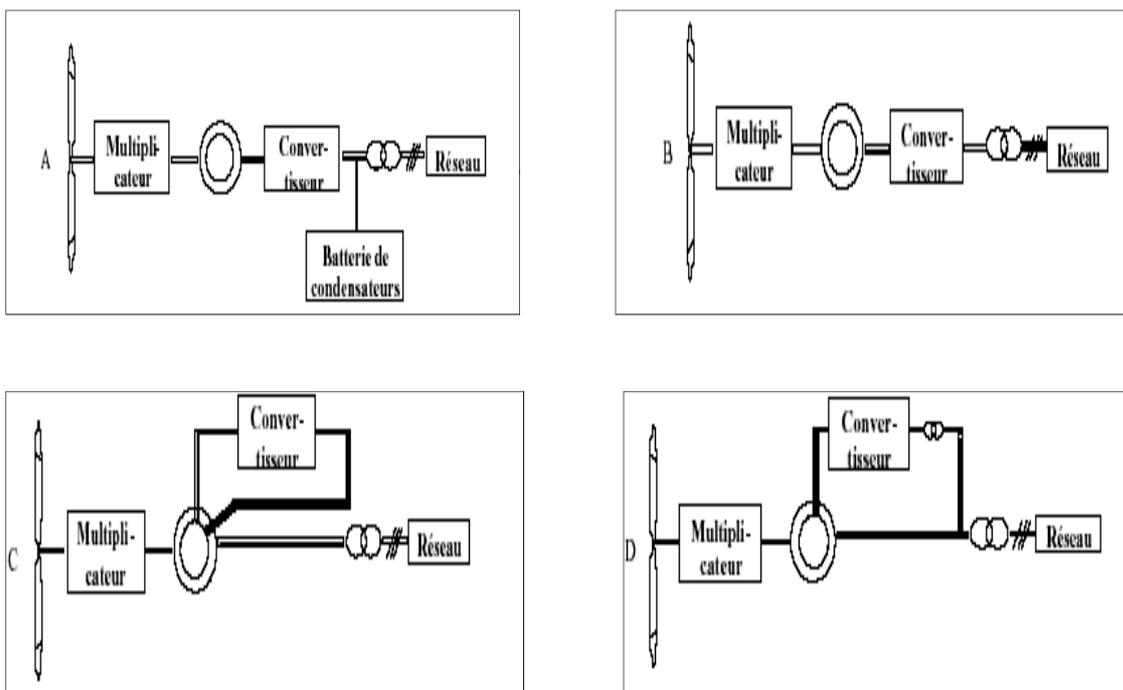
Les machines électriques asynchrones sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses. Elles ont l'avantage d'être standardisées, fabriquées en grande quantité et dans une très grande échelle des puissances. Elles sont aussi les moins exigeantes en termes d'entretien et présentent un taux de défaillance très peu élevé.

La constitution du stator est la même que pour la machine synchrone et le rotor comporte soit un système d'enroulements triphasés (si le stator est triphasé é lui aussi) ou une cage d'écurueil en court circuit

Les configurations illustrées sur les différentes figures représentent les topologies les plus courantes rencontrées dans les aérogénérateurs et faisant intervenir les deux types de machines dont on a décrit les caractéristiques principales.

Le terme « Convertisseur » apparaissant dans ces figures se réfère à différents types de composants d'électronique de puissance.

#### I.4.2.2 Configurations électriques utilisant la machine asynchrone



**Figure (1.6)** Configurations électriques utilisant la machine asynchrone.

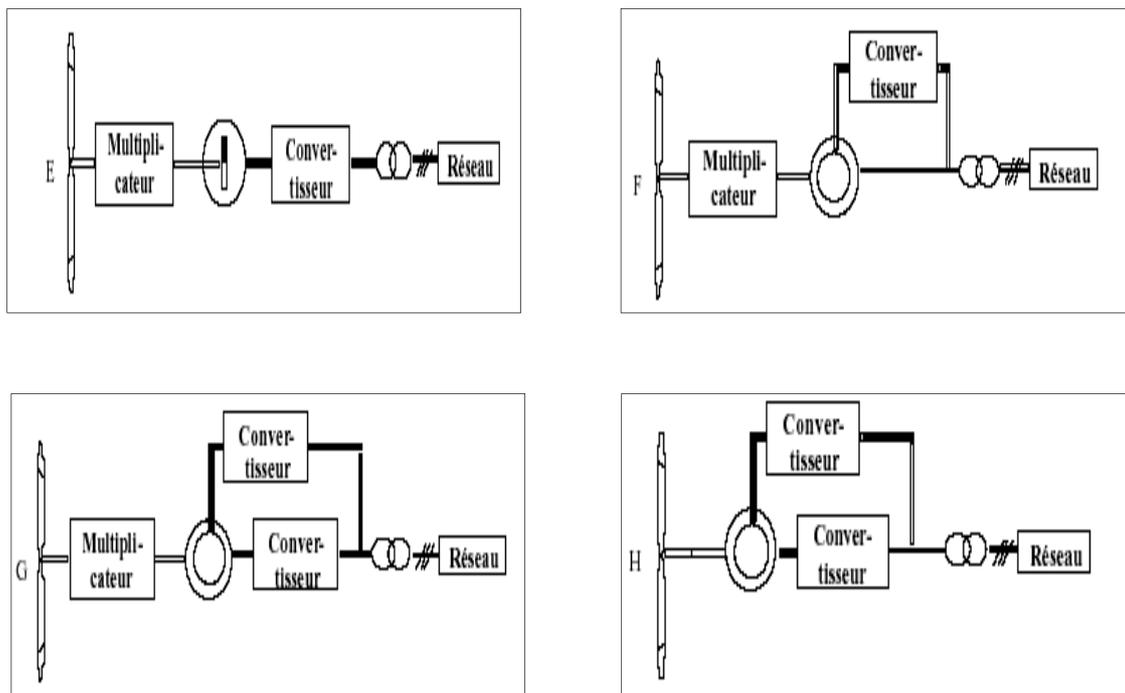
**A)** Sous cette forme, l'éolienne fonctionne à vitesse fixe, avec un générateur asynchrone à cage d'écurueil. Les bancs de condensateurs sont utilisés pour la compensation de la puissance réactive et les convertisseurs pour un démarrage plus doux.

**B)** Les bancs de condensateur sont remplacés par des convertisseurs de fréquence soit de grande échelle, soit utilisés seulement pour compenser la puissance réactive à des vitesses de vent élevées. La première configuration a l'avantage de pouvoir faire varier la vitesse de rotation de l'éolienne pour toutes les vitesses du vent.

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

**D)** Cette configuration contient un Générateur Asynchrone Doublement Alimenté. Un convertisseur de fréquence commande directement les courants dans les enroulements du rotor. Ceci permet de contrôler la puissance de sortie du générateur en utilisant des convertisseurs dimensionnés à 20 voir 30% de la puissance nominale du générateur. La puissance traversant les convertisseurs dans le cas D étant moindre que celle du cas B, les harmoniques sont nettement plus faibles.[13]

### I.4.2.3 Configurations électriques utilisant la machine synchrone



**Figure (1.6)** Configurations électriques utilisant la machine synchrone

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

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

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

**H)** Cette configuration contient un générateur synchrone multipolaire, évitant ainsi l'utilisation d'un multiplicateur, [12].

## **I.5 Différent type d'éoliennes**

Le vent a toujours excité l'imagination de l'inventeur qui ont enfanté sur le papier une foule de projets éoliens.

Les éoliennes se rangent en deux grandes familles, selon qu'elles tournent autour d'un axe horizontal ou vertical.

### **I.5.1 Les éoliennes à axes horizontal**

Sont le plus connues car elles comprennent la quasi-totalité principalement en détail sur ces deux types d'appareils aux performances très détail sur ces deux type d'appareils aux performances très différentes.

- le multiple est une machine adapté aux vents faibles et au pompage.
- l'hélice d'aérogénérateur tourne beaucoup plus vite ce qui est un avantage l'orque' il s'agit d'animer une génératrice, fournit du courant même par vents très forts, atteints les meilleurs rendements aérodynamiques de l'ordre de 80%).

### **I.5.2 Les éoliennes à axes vertical**

Le caractère omni directionnel des éoliennes modernes à axe vertical constitue leur principal avantage sur capter le vent, quelle que soit sa direction.

Cette caractéristique permet d'obtenir des systèmes simples et d'éliminer le problème des forces gyroscopiques sur le rotor d'un éliminer classique lorsque celle – ci s'oriente en fonction du vent. L'axe verticale de rotation permet également d'installer le générateur et transmissions sur niveau du sol.

Ce type d'éoliennes est très peu répandu et assez mal connue. Elles peuvent avoir un intérêt dans certains secteurs d'application. Il existe principalement trois technologies VAWT (Vertical Axis Wind turbine) : les turbines Darrieus classique ou à pales droites (H-type) et la turbine de type Savonius, comme montré à la figure (2.10), toutes ces voilures sont à deux ou plusieurs pales, [14].



a) Darrieus



b) Darrieus de type H



c) Savonius

## I.6 Application des éoliennes

Un système éolien peut être utilisé en trois applications distinctes :

- ❖ Systèmes isolés.
- ❖ Systèmes hybrides.
- ❖ Systèmes reliés au réseau.

Les systèmes obéissent à une configuration de base : ils ont besoin d'une unité de contrôle de puissance et, dans certains cas, d'une unité de stockage

### I.6.1 Systèmes Isolés

L'énergie éolienne est aussi utilisée pour fournir de l'énergie à des sites isolés, par exemple pour produire de l'électricité dans les îles, pour le pompage de l'eau dans des champs, ou encore pour alimenter en électricité des voiliers, des phares et des balises, [15].

Les systèmes isolés en général, utilisent quelque forme de stockage d'énergie. Ce stockage peut être fait par des batteries : il faut alors un dispositif pour contrôler la charge et la décharge de la batterie. Le contrôleur de charge a comme principal objectif d'éviter qu'il y ait des dommages au système de batterie par des surcharges ou des décharges profondes.

Pour l'alimentation d'équipements qui opèrent avec un réseau alternatif (AC), il est nécessaire d'utiliser un onduleur.

### I.6.2 Systèmes Hybrides

Les systèmes hybrides sont ceux qui présentent plus d'une source d'énergie comme, par exemple, turbines éoliennes, génératrices Diesel, modules photovoltaïques, entre eux. L'utilisation de plusieurs formes de génération d'énergie électrique augmente la complexité du système et exige l'optimisation de l'utilisation de chacune des sources. Dans ces systèmes, il faut réaliser un contrôle de toutes les sources pour maximiser la livraison de l'énergie à l'utilisateur.

En général, les systèmes hybrides sont employés dans des petits systèmes destinés à desservir un nombre plus grand d'utilisateurs. Pour travailler avec des charges à courant alternatif, le système hybride aussi a besoin d'un onduleur.

### **I.6.3 Systèmes Liés au Réseau**

Les systèmes liés au réseau n'ont pas besoin de systèmes de stockage d'énergie ; par conséquent, toute la génération est livrée directement au réseau électrique.

Les systèmes éoliens liés au réseau nécessitent un convertisseur statique

## **I.7 Avantage et inconvénients de l'énergie éolienne**

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

Enfin, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.

L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite que n'importe quelle source d'énergie traditionnelle [16].

### **I.7.1 Les inconvénients**

Même s'il s'en ne sont pas nombreux, l'éolienne a quelques désavantages :

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

concurrence la plupart des sources d'énergie classique, son coût reste encore plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés.

### **I.7.2 Les Avantages**

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

- L'exploitation d'énergie éolienne ne produit pas directement de CO<sub>2</sub>
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est à dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier.
- Chaque unité d'électricité produite par un aérogénérateur supplante une unité d'électricité qui aurait été produite par une centrale consommant des combustibles fossiles.
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs dont on connaît la durée de vie
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermique et des centrales nucléaires.

#### **I.7.2.1 L'énergie éolienne a d'autre part des atouts économiques certains**

- C'est une source d'énergie locale qui répond au besoin locaux en énergie ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales.
- C'est l'énergie la moins chère entre l'énergie renouvelable.
- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement .elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple.
- Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles.

Enfin, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà

- L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite que n'importe quelle source d'énergie traditionnelle.

**Conclusion :**

L'énergie électrique est l'énergie la plus importante et la plus noble parmi toutes les autres formes d'énergies. Ainsi la proportion électrique par rapport à l'énergie totale consommée, ne cesse pas de croître, il faudrait pour cela pouvoir développer suffisamment les énergies renouvelables pour pouvoir diminuer la consommation absolue (et non relative) d'énergie fossiles; les énergies renouvelables sont aussi parfois présentées comme une solution au problème de l'environnement.

Dans ce chapitre nous avons mentionné que les énergies renouvelables peuvent être issues de ressource hydraulique, solaire, géothermie, biomasse et éolienne, et nous avons analysé la technique d'une éolienne avec les applications, les avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.

# CHAPITRE 2

## Conversion de l'énergie éolienne et contrôle au niveau de la turbine

### Introduction

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

- ❖ Un système qui permet de la contrôler mécaniquement au niveau de la turbine, essentiellement pour limiter la puissance pour les vents forts.
- ❖ Un système qui permet de la contrôler électriquement au niveau du générateur associé à l'électronique de commande.

Dans cette partie, on reverra la modélisation d'un système d'éolienne dans le but de montrer le modèle de la turbine et celui en tenant compte de M.P.P.T afin d'extraire le maximum de puissance.

### II.1 Fonctionnement d'une éolienne

#### II.1.1 Contrôle de la conversion d'énergie

Les conditions de fonctionnement d'une turbine éolienne dépendent essentiellement des conditions de vent sur lesquelles aucune action n'est possible.

On ne peut agir qu'en limitant, parfois de manière optimale dans certaines conditions, l'énergie effectivement convertie par la turbine puis par le générateur électrique avant le transfert vers le réseau.

Le contrôle de puissance fournie par le système peut se faire; à chacun des deux niveaux de conversions de l'énergie; de manière suivant les conditions de fonctionnement (voir le paragraphe (2.1) [5]).

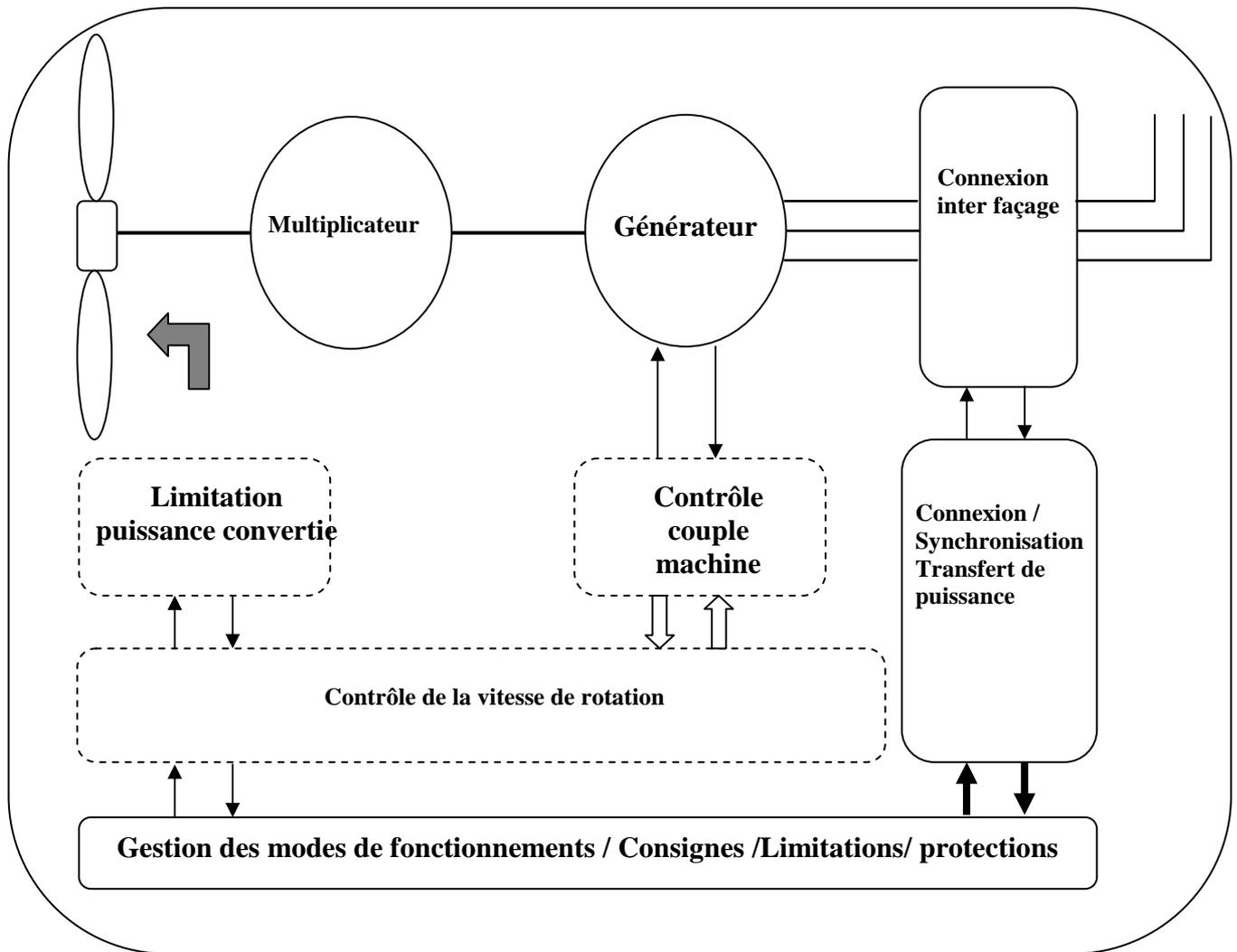


Figure (2.1): Structure générale de contrôle d'une éolienne

### II.1.2 Au niveau de la turbine :

Essentiellement pour limiter la puissance pour les vents forts

### II.1.3 Au niveau du générateur :

En particulier pour les structures à vitesse variable que l'on verra plus loin. Ceci permet par exemple d'optimiser le captage de l'énergie pour les vents faibles et moyens, et de contrôler les grandeurs affectant directement le fonctionnement du générateur (courant, vitesse), ou les contraintes de fonctionnement du système (tension de base continu, courant dans un système d'interfaçage au réseau).

### II.1.4 Le système de commande d'un générateur :

Il peut être décomposé en deux niveaux fonctionnels

- ❖ Les systèmes de contrôle des grandeurs physiques et les surveillances et protection.

Il s'agit d'assurer la régulation et l'asservissement de la grandeur des valeurs des consignes délivrées par le niveau de commande supérieur.

❖ Le système de gestion des modes de fonctionnement, d'élaboration des lois consigne et de gestion des protections.

## II.2 Système mécanique transmission de la puissance pour la modélisation mécanique de turbine :

La puissance captée par la turbine est transmise à la génératrice dans le cas où cette génératrice est un machine, un multiplicateur de vitesse est inséré dans la transmission afin d'effectuer l'adaptation de vitesse.

### II.2.1 Les éléments complets du système mécanique complet :

- ❖ Les pales (généralement au nombre trois)
- ❖ Le moyeu sur lequel sont montées les pales avec une possibilité de rotation dans le cas où l'angle de calage est réglable.
- ❖ L'axe lent sur lequel est fixé le moyeu
- ❖ Le multiplicateur de vitesse (sauf pour les systèmes à attaque directe) de rapport  $N$
- ❖ L'axe rapide dans le cas où le multiplicateur est présent sur lequel est couplé le rotor de la génératrice.

### II.2.2 Modèle mécanique de la turbine

Le modèle qui sera étudiée comprend trois pales orientables et de longueur  $R$ . elles sont fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse  $\Omega_{tur}$  qui est relie à un multiplicateur de gaine  $M$ , ce multiplicateur entraîne génératrice électrique.

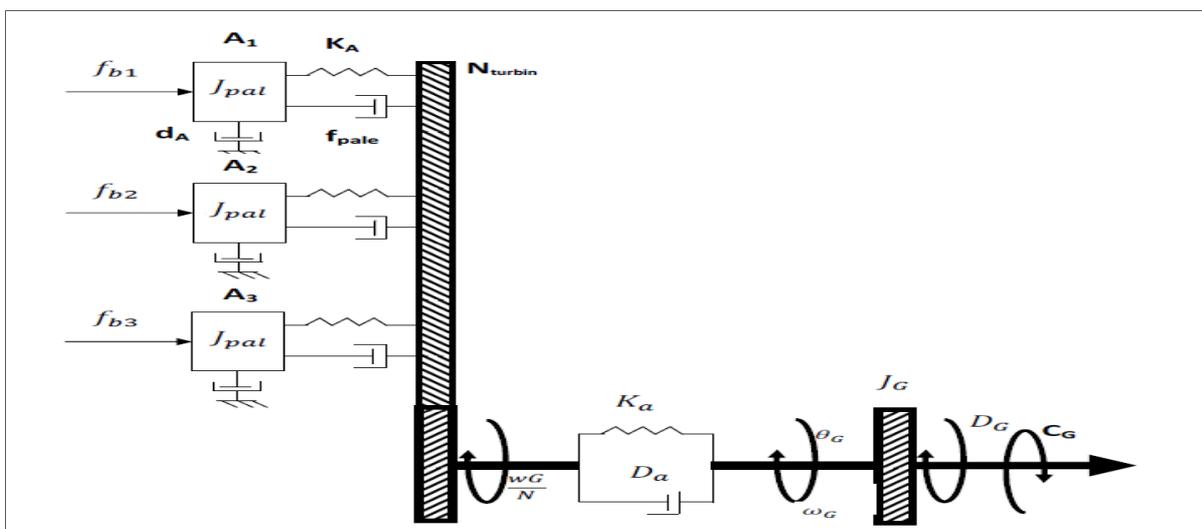


Figure (2.2):Système mécanique de l'éolienne

- ❖  $(f_{b1}, f_{b2}, f_{b3})$  : les forces qui dépendent de la vitesse de vent
- ❖  $(A_1 A_2 A_3)$  : les vitesses d'orientation de chaque pale
- ❖  $J_{pal}$  : la même élasticité
- ❖  $d_a$  : le coefficient de frottement par rapport à l'aire

L'arbre d'entraînement des pales est caractérisé par :

- ❖  $J_a$  : inertie d'arbre
- ❖  $K_a$  : Sa rigidité
- ❖  $D_a$  : coefficient de frottement par rapport au multiplicateur  $d_a$

Le rotor de la génératrice :

- ❖ Une inertie  $J_G$
- ❖ Un coefficient de frottement  $D_G$

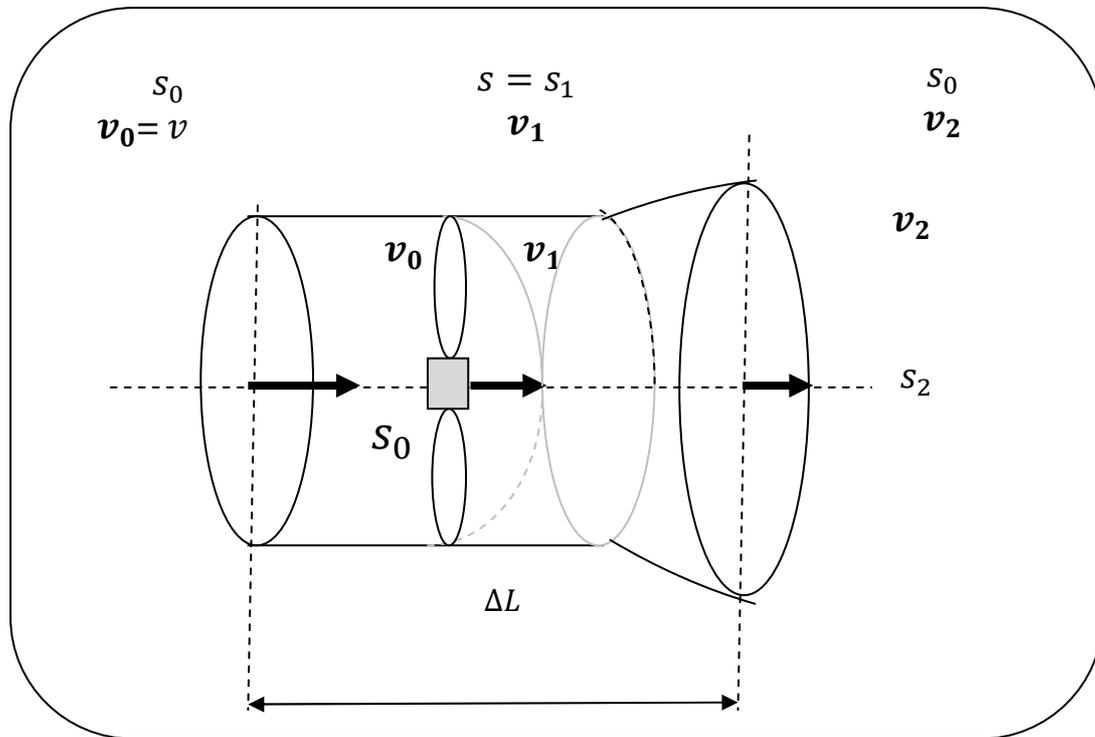
### II.3 Énergie du vent récupérable

Malgré la divergence très importante des données, il semble que l'on puisse considérer que l'énergie éolienne récupérable est de l'ordre de grandeur de la consommation d'énergie éolienne de l'humanité si non dans l'état actuel, au moins dans un avenir proche. Si l'énergie éolienne est avec celle des courants des fleuves et rivières, une forme d'énergie naturelle utilisée le plus tôt dans l'histoire de l'humanité, c'est sans doute par ce qu'elle est facile à utiliser et a cause de la disponibilité assez bonne et cela a peu près pour tout. Avant même de parler de disponibilité et de répartition d'énergie, il faut d'abord savoir comment chiffrer cette énergie. Celle-ci est disponible sous forme d'énergie cinétique qu'on peut espérer récupérer au détriment de la vitesse de la veine de l'air, à la traversée de l'éolienne perd de sa vitesse en s'élargissant.

### II.3.1 Théorie de Betz

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la fig.(2.3).

La théorie globale du moteur éolien à axe horizontal a été établie par Betz. Il suppose que les pales sont placées dans l'air animé à l'infini amont d'une vitesse  $v_1$  et à l'infini aval d'une vitesse  $v_2$ .



**Figure (2.3)** Cylindre d'air (théorie de Betz)

La production d'énergie ne peut se faire qu'au préjudice de l'énergie cinétique du vent, la vitesse  $v_2$  est nécessairement inférieure à  $v_1$ .

Il en résulte que la veine fluide traverse les pales en s'élargissant désignons par  $v$ , la vitesse de l'air à la traversée de l'aéromoteur et par  $s$  la surface balayée par les pales.

L'égalité qui traduit l'incompressibilité de l'air et la permanence de l'écoulement s'écrit :

$$s_1 v_1 = s v = s_2 v_2 \quad (2.1)$$

### II.3.2 Théorème d'éluer

D'après le théorème d'éluer, la force  $F_{rot}$  est exercée par l'hélice sur l'air en mouvement est égale la variation de la quantité de mouvement entre l'amont et l'aval de l'hélice

$$F_{rot} = m\Delta v$$

La force exercée par les pales sur l'air en mouvement est dirigé vers l'avant et égale en valeur absolue à :

$$F_{rot} = \rho * Q * (v_1 - v_2) = \rho * s * v(v_1 - v_2) \quad (2.2)$$

### II.4 Modélisation de la ressource

Le modèle est basé sur les caractéristiques de puissance en état d'équilibre de la turbine. La rigidité de l'arbre d'entraînement est supposée infinie, les coefficients de frottement et l'inertie de la turbine doivent être combinés avec ceux du générateur couplé à la turbine.

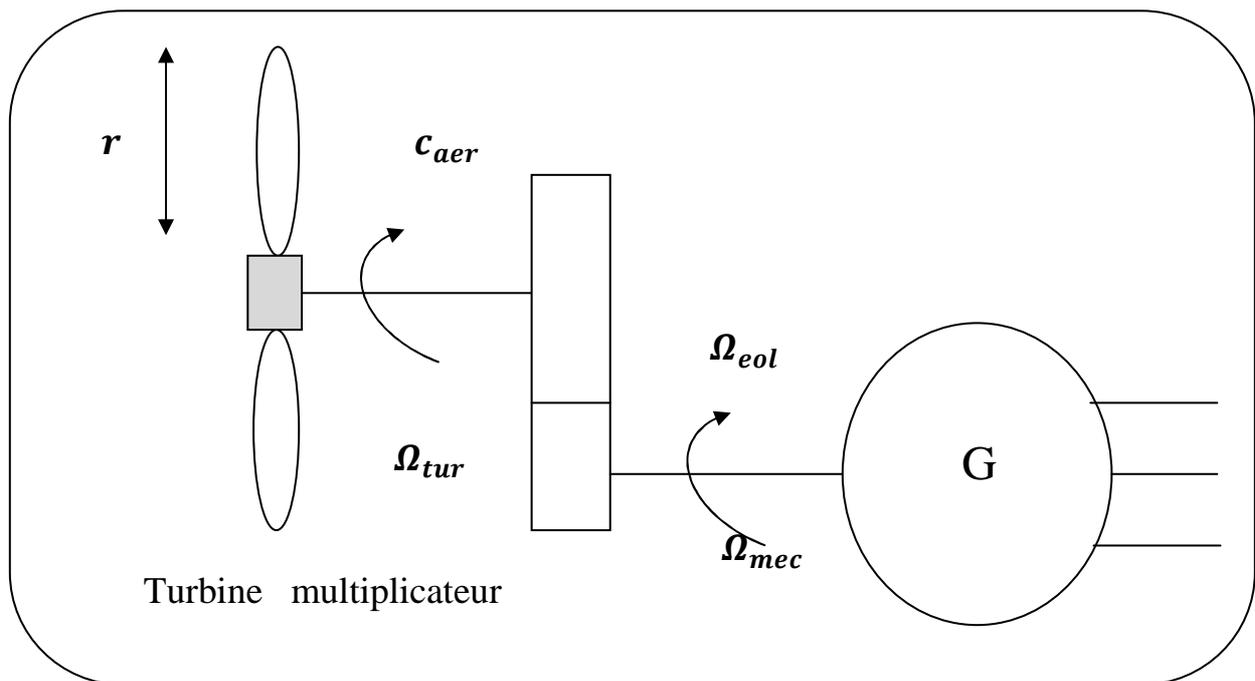


Figure (2.4) schéma de la turbine éolienne

### II.4.1 Potentiel de la ressource

La puissance absorbée par l'hélice est :

$$P_v = F_{rot} v_1 = \rho * S * v_1^2 (v_0 - v_2)$$

Cette puissance est égale à la variation de l'énergie cinétique par unité de temps Soit :

$$\rho * S * v_1^2 (v_0 - v_2) = \frac{1}{2} \rho * S * v_1 (v_0^2 - v_2^2)$$

La puissance cinétique totale disponible sur la turbine d'une éolienne est donnée par La courbe de variation de la puissance du vent disponible sur l'ensemble de la surface balayée par les pales de la turbine.

Cette puissance s'exprime :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S_b v^3 \quad (2.3)$$

Avec :

$\rho$ :Densité volumique de l'air (1.225 kg/m<sup>3</sup> à 15°C et 1013mbar)

$S_b$ : Surface balayée par les pales (m<sup>2</sup>)

$v$  : vitesse filtrée du vent au moyeu de la turbine

Ou vitesse moyenne du vent à travers la surface  $S_b$  (m/s)

Cependant, seule une partie de l'énergie disponible peut être captée par l'éolienne La puissance captée par la turbine peut s'exprimer en fonction de cette puissance disponible en introduisant un facteur dépendant des conditions aérodynamiques des pales.

Donc de la vitesse du vent  $v$  et de la vitesse de rotation  $\Omega_{tur}$  et de la l'angle de calage  $\beta$  qui pourrait être calculé en partant d'une étude complète sur l'action du vent sur les pales [17].

$$P_{aer} = \frac{1}{2} \rho S_b v^3 c_p(\lambda, \beta) = c_p P_v \quad (2.4)$$

$$S = \pi * r^2$$

$$\lambda = \frac{\Omega_{tur}}{v} r_t \quad (A_0) \quad (2.5)$$

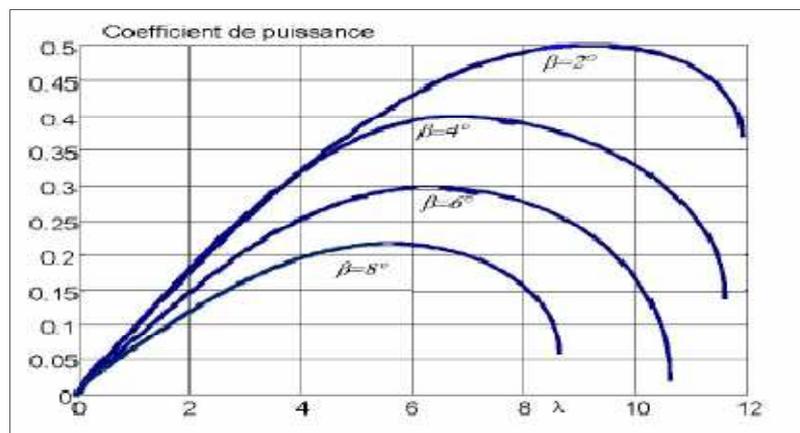
avec:

$c_p$  : Coefficient de puissance (**sans unité**)

$\lambda$  : Rapport de vitesse (**sans unité**) entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent.

$\Omega_{tur}$  : vitesse de rotation de l'éolienne (**rd/s**)

$r_t$  : Rayon de la turbine en mètre (**m**)



**Figure (2.5)** coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine ( $\lambda$ )[18]

Il faut noter que la puissance est proportionnelle au cube de la vitesse du vent, et c'est là ce qu'il est essentiel de garder toujours présent dans l'esprit la vitesse du vent et en effet, à notre échelle, une grandeur essentiellement aléatoire, et de la légère brise de **2 m/s** au fort de vent (**20 m/s**) la puissance mise en jeu varie alors dans le rapport **1 à 1000**

Pour les éoliennes, le coefficient d'extraction d'énergie  $C_p$  qui dépend à la fois de la vitesse du vent et de la vitesse de rotation de la turbine est généralement défini dans l'intervalle **0.35- 0.5**.

Cette puissance récupérée sur l'arbre de l'éolienne est maximale pour  $\frac{dp}{dt} = 0$ .

Alors dans ces conditions  $P_{aer} = \frac{8}{27} \rho * S * v^3$ , et le rendement théorique maximal sera défini par :

$$c_p = \frac{P_{aer}}{P_v} = \frac{16}{27} = 0.593$$

L'expression du coefficient de puissance a été approchée, pour ce type de turbine (Éolienne de 1.5 MW), par l'équation suivante :

$$C_p = 0.5 - 0.00167 \cdot (\beta - 2) \sin \frac{\pi(\lambda + 0.1)}{18.5 - 0.3(\beta - 2)} - 0.0018(\lambda - 3)(\beta - 2) \quad (2.6)$$

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

$$c_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{tur}} = c_p(\lambda, \beta) \frac{\rho v^3 S_b}{2} * \frac{1}{\Omega_{tur}} \quad (2.7) (A_1)$$

## II.5 Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur de vitesse permet, autre l'adaptation de vitesse d'avoir une certaine élasticité entre ce qui se passe côté entrée (source primaire fluctuante) et côté sortie (générateur et réseau) et des oscillations mécaniques peuvent en résulter comme nous le verrons plus loin. Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice. Cet élément définit aussi le couple du multiplicateur à partir du couple de la machine  $c_g$

$$\begin{cases} c_{aer} = M c_g \\ c_g = \frac{1}{M} c_{aer} \end{cases} \quad (2.8) (A_2)$$

$$\begin{cases} \Omega_{mec} = M \Omega_{tur} \\ \Omega_{tur} = \frac{\Omega_{mec}}{M} \end{cases} \quad (2.9) (A_3)$$

### II.5.1 Choix du rapport de multiplicateur :

Déterminations des conditions de fonctionnement, on reporte sur même graphique les caractéristiques puissances –vitesse de l'éolienne et les caractéristiques  $P_n$ .

Si l'on accouplait directement l'éolienne et le générateur, la première tournerait en moulinet et la génératrice aurait un débit nul.

Pour éviter cette situation, il est nécessaire d'accroître la vitesse du générateur.

Doit : 
$$M = \frac{\text{Vitesse de rotation du générateur}}{\text{vitesse de rotation de l'éolienne}}$$

## II.6 Modèle d'arbre

Equation dynamique de l'arbre est définie entre la pale et le multiplicateur. L'équation fondamentale permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total ( $c_{mec}$ ) appliqué au rotor :

$$c_{mec} = j \frac{d\Omega_{mec}}{dt} \quad (A_4) \quad (2.10)$$

$j$  l'inertie total qui apparait sur le rotor de la génératrice  $c_{mec}$  couple mécanique prend en compte, le couple électromagnétique  $c_e$  produit par la génératrice, le couple des frottement visqueux  $c_r$ , et le couple issu du multiplicateur.

$$\begin{cases} c_{mec} = c_g - c_{em} - c_r \\ c_r = f\Omega_{mec} \end{cases} \quad (A_5, A_6) \quad (2.11)$$

Le couple résistant dû aux frottements est modélisé par coefficient de frottement visqueux  $f$ .

### II.6.1 Graphe information du modèle de la turbine

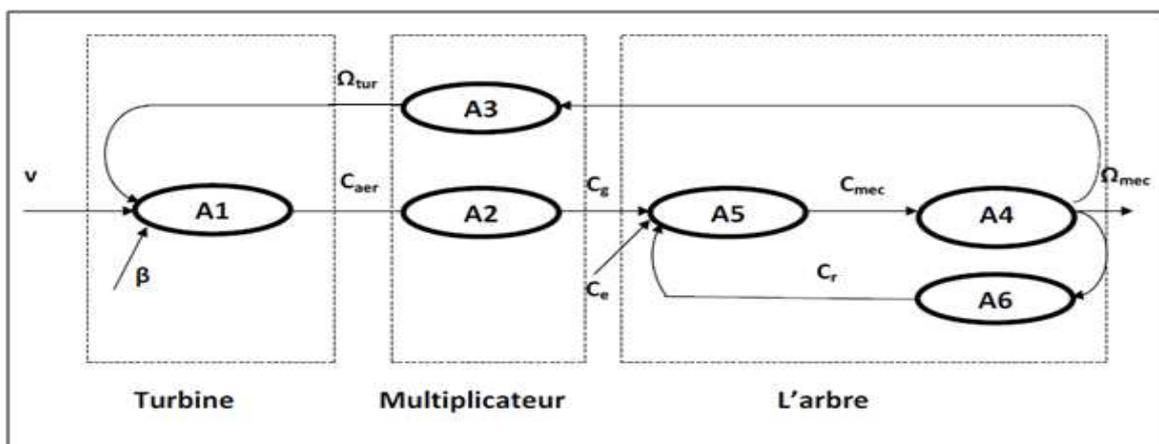


Figure (2.6) Représentation globale du modèle turbine

Le graphe information du modèle de la turbine montre que la vitesse de la turbine peut être contrôlée par action sur deux entrées l'angle de la pale et le couple électromagnétique de la génératrice. la vitesse du vent est considérée comme une entrée perturbatrice a ce système.

## II.7 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne

Une turbine éolienne est dimensionnée pour développer sur son arbre une puissance dénommée puissance nominale  $P_n$  obtenue à partir d'une vitesse du vent  $V_n$ , dénommée vitesse nominale.

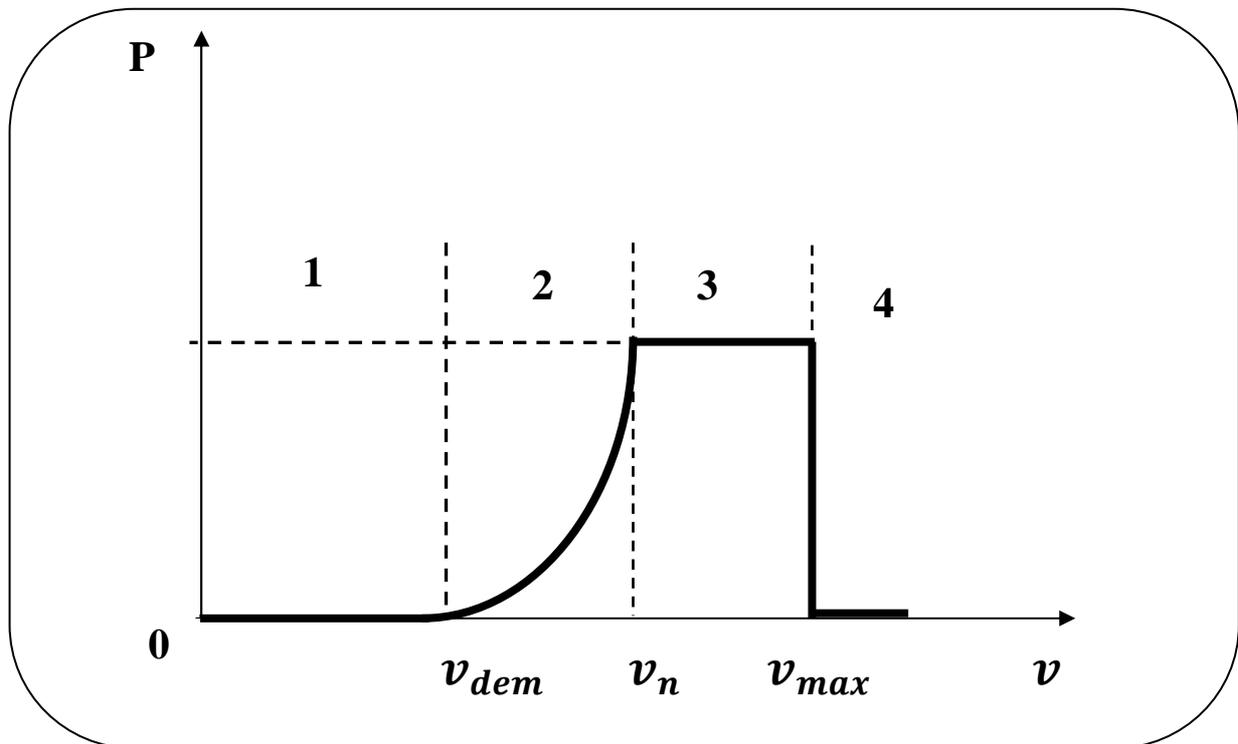
Lorsque la vitesse du vent est supérieure à  $V_n$ , la turbine éolienne doit modifier ses paramètres afin d'éviter la destruction mécanique, de sorte que sa vitesse de rotation reste pratiquement constante [10,18].

A côté de la vitesse nominale  $V_n$ , on spécifie aussi :

- ❖ la vitesse de démarrage, à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie
- ❖ la vitesse maximale du vent  $V_m$ , pour laquelle la turbine ne convertit plus l'énergie éolienne, pour des raisons de sûreté de fonctionnement.

Les vitesses  $V_n$ ,  $V_d$  et  $V_m$  définissent quatre zones sur le diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent :

### II.7.1 Les quatre zones principales de fonctionnement



**Figure (2.7)** Diagramme de la puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse mécanique

La zone équivalente mesurée sur l'éolienne de Schelle de 1.5MW est représentée :

- ❖ **Zone (1)** : où  $P = 0$ , la turbine ne fonctionne pas.

C'est la zone de démarrage de la machine. elle commence lorsque la vitesse mécanique est supérieur à certain

- ❖ **Zone (2)** : dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent  $v$ . Pour extraire le maximum de la puissance, l'angle de calage des pales  $\beta$  reste constante à sa valeur minimale afin d'obtenir un  $c_p$  maximal.

Ce processus continue jusqu'à atteindre une certaine valeur de la vitesse mécanique.

- ❖ **Zone (3)** : où la vitesse de rotation est maintenue constante et où la puissance  $P$  fournie reste égale à  $P_n$

La puissance de la génératrice atteint des valeurs plus importantes jusqu'à 90 de la puissance nominale  $P_{nom}$

Lorsque la vitesse du vent augmente encore, l'angle de calage des pales devient important afin de conserver la puissance électrique constante et nominale [10,18].

- ❖ **Zone (4)** : dans laquelle le système de sûreté de fonctionnement arrête le transfert de l'énergie

## II.8 Principes de contrôle de la puissance:

Il existe deux principes de contrôle aérodynamique pour limiter la puissance extraite de la turbine à la valeur de la puissance nominale de la génératrice [10,18]:

- ❖ système « *pitch* » ou « à pas variable » qui permet d'ajuster la portance des pales à la vitesse du vent pour maintenir une puissance sensiblement constante dans la **zone (3)** de vitesse
- ❖ système « *stall* » ou à « décrochage aérodynamique », le plus robuste car c'est la forme des pales qui conduit à une perte de portance au-delà d'une certaine vitesse du vent, mais la courbe de puissance chute plus vite: il s'agit donc d'une solution passive.

Au premier principe est associé un mécanisme d'orientation des pales, permettant la variation de l'angle de calage au cours du fonctionnement de l'éolienne afin de lui permettre de s'adapter aux différentes conditions devant.

L'intérêt de ce contrôle apparaît en observant les caractéristiques de la fig. (2.8) qui Représentent la puissance de la turbine en fonction de la vitesse de rotation pour différentes vitesses de vent.

Dispositif d'étude, on supposera que la machine électrique et son variateur sont idéaux et donc, quelle que soit la puissance générée, le couple électromagnétique développé est à tout instant égal à sa valeur de référence

$$c_{em} = c_{em-ref} \quad (2.12)$$

La vitesse est influencée par l'application de trois couples :

Un couple éolien, un couple électromagnétique et un couple résistant.

$$\frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \frac{1}{j} (c_g - f\Omega_{mec} - c_{em}) \quad (A_7) \quad (2.13)$$

Par cette relation le couple électromagnétique de référence  $c_{em-ref}$  permettant d'obtenir une vitesse mécanique de la génératrice égale à la vitesse de référence  $\Omega_{ref}$ .

$$c_{em-ref} = c_{PI}(\Omega_{ref} - \Omega_{mec}) \quad (A_8) \quad (2.14)$$

- ❖  $c_{PI}$  : est le régulateur de la vitesse
- ❖  $\Omega_{ref}$  : est la vitesse mécanique de référence

En tenant compte le gain du multiplicateur, on a donc :

$$\Omega_{ref} = M\Omega_{tur-ref} \quad (A_9) \quad (2.15)$$

### II.8.1 Graphe information du modèle de la turbine de contrôle de la vitesse en boucle fermée

Cette structure de commande consiste à régler le couple sur l'arbre de la turbine de manière à fixer sa vitesse à une référence

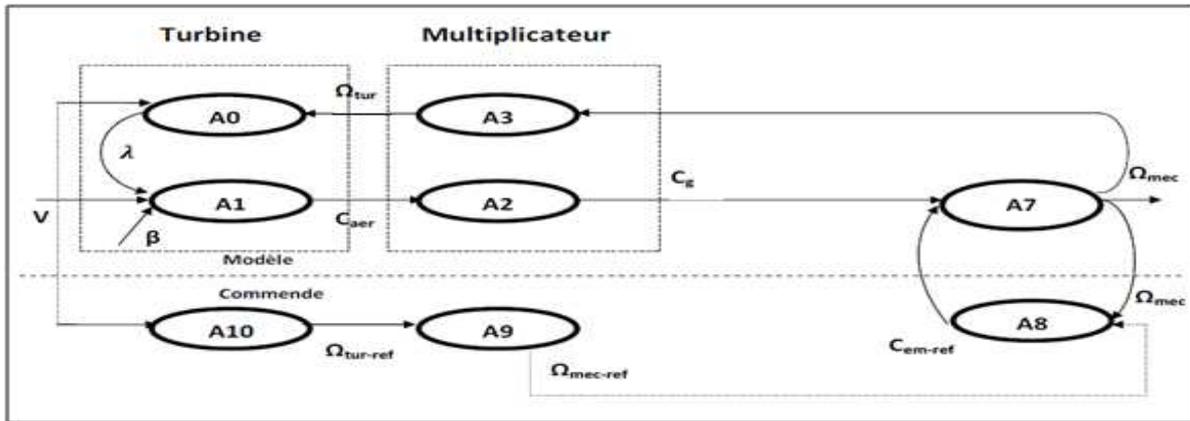


Figure. (2.8) Modèle de la turbine de contrôle de la vitesse en boucle fermée

### II.8.2 Fonction la turbine applique GADA à la zone (2)

Les techniques d'extraction du maximum de puissance consistent à déterminer la vitesse de la turbine qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée.

La valeur optimale du ratio de vitesse  $\lambda$ ,  $c_{pmax}$  (à  $\beta$  constant et égal à 2) Permettant d'obtenir la valeur maximale du  $c_p$  [19]

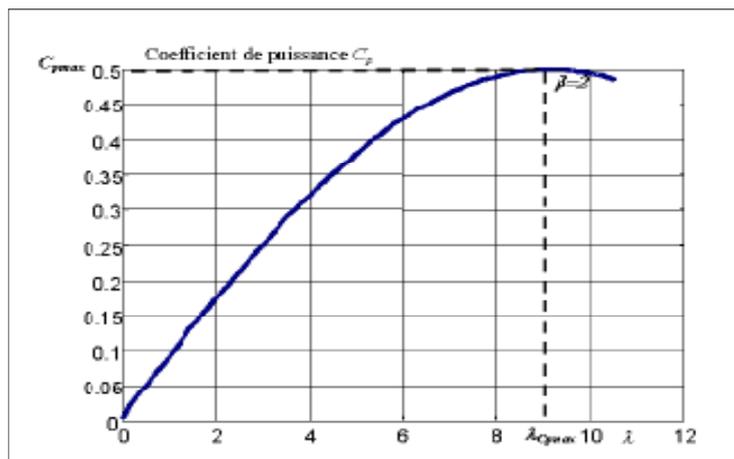


Figure (2.9) Fonction optimal de la turbine.

Elle est obtenue à partir l'inversion de l'équation

$$\Omega_{tur-ref} = \frac{\lambda c_{pmax} v}{r} \tag{A10}$$

### II.8.3 Modèle de la turbine en zone 2

La représentation simplifiée sous forme de schéma blocs se déduit facilement du graphe d'information

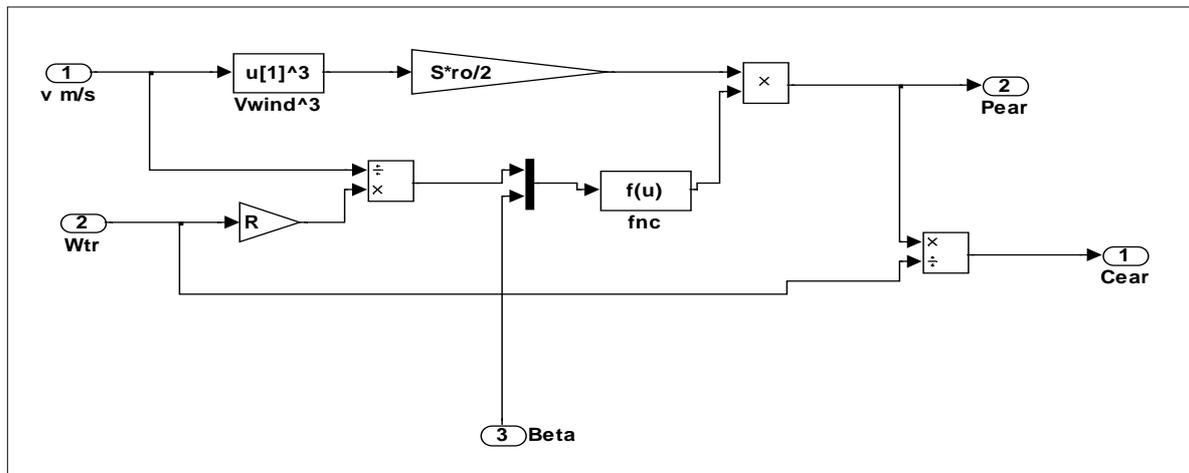


Figure (2.10) Modèle de la turbine sans régulation de la vitesse

### II.8.4 Modèle de la turbine avec régulation de la vitesse

La modélisation de la turbine est orienté sur la zone de fonctionnement à vitesse variable (zone 2). Le schéma de simulation ci-dessus représente le modèle de la turbine avec régulateur PI appliqué pour asservissement de la vitesse de l'arbre.

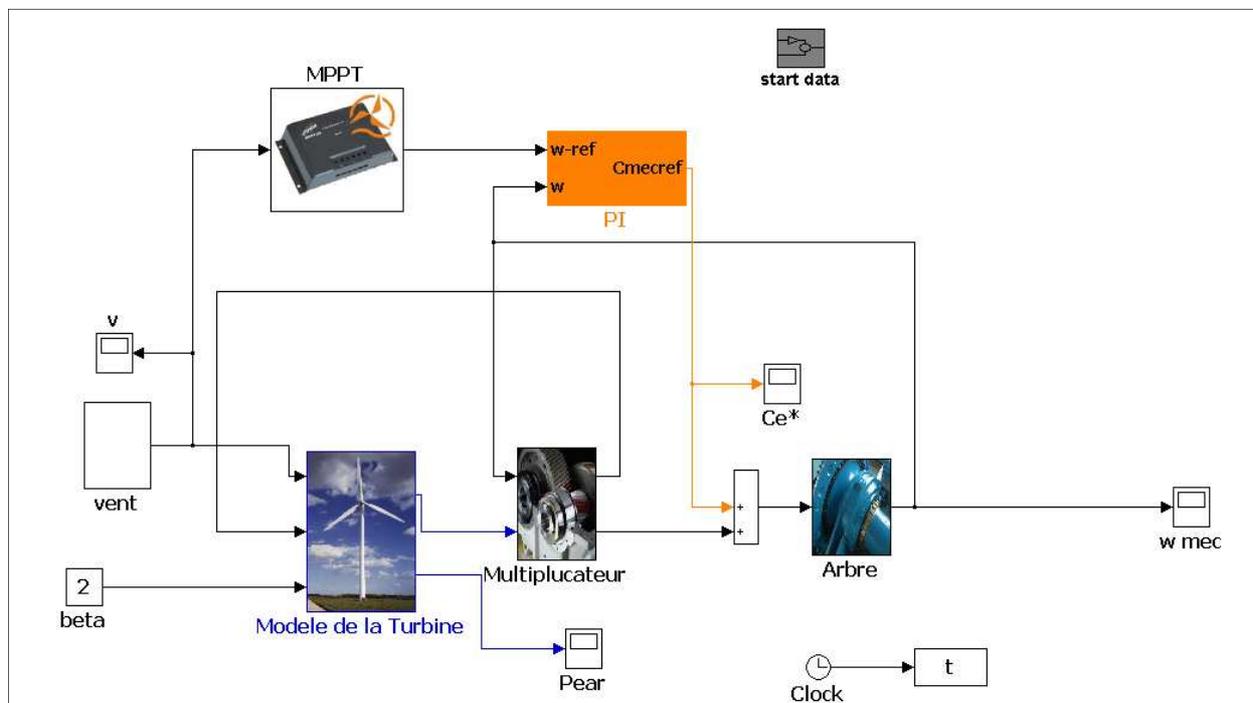
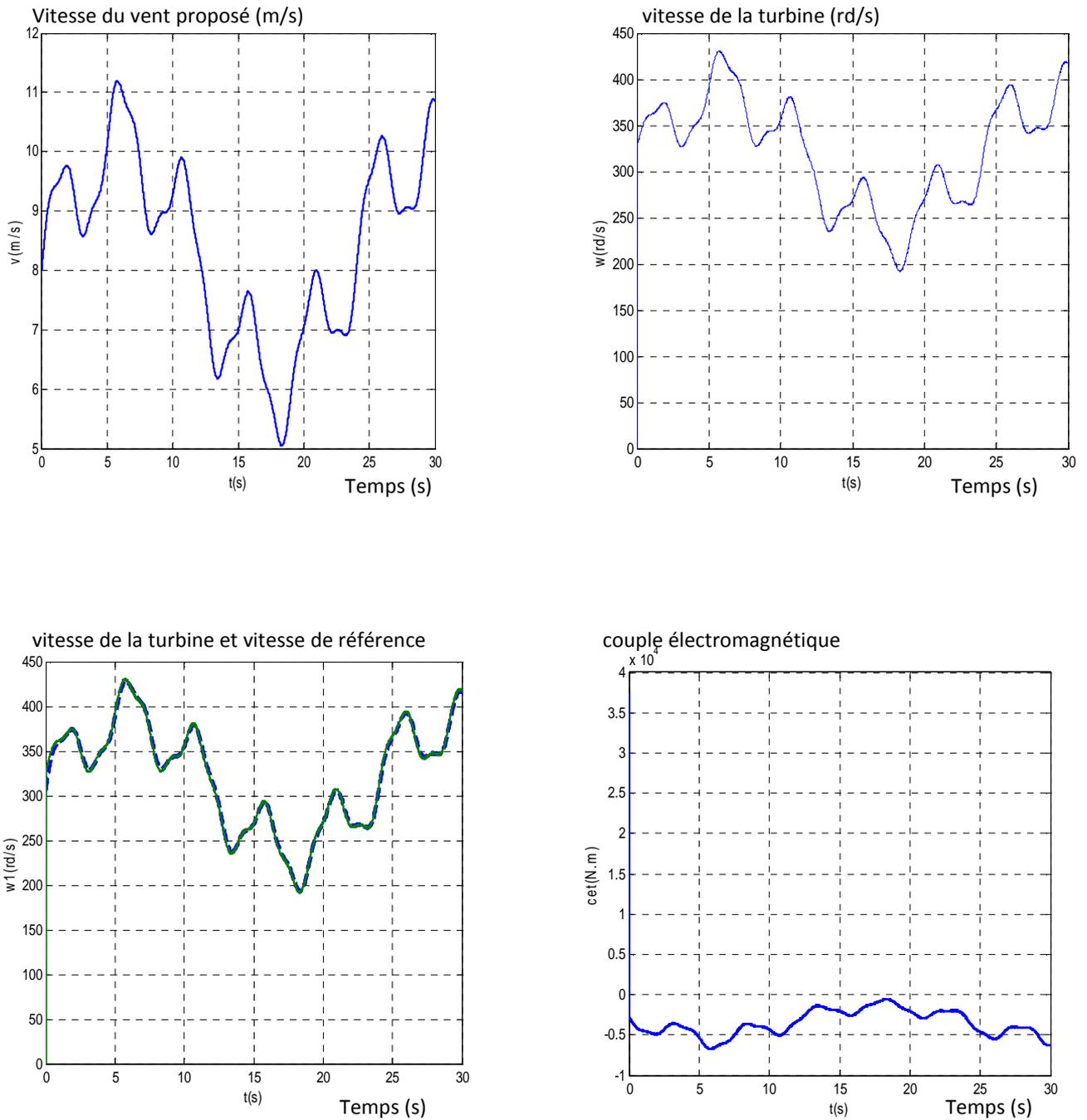


Figure. (2.11) Schéma bloc de la turbine Avec régulateur de la vitesse et MPPT

### II.9 Résultats de simulation



**Figure. (2.12)** Résulta de simulation de la turbine Avec régulateur de la vitesse

## **Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons donné une vue d'ensemble de la turbines éoliennes Utilisées dans l'industrie moderne pour la production d'énergie électrique.

Afin d'arriver à une Meilleure compréhension du fonctionnement des turbines éoliennes, partant de la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique par la turbine (Loi de Betz), nous avons décrit d'une façon explicite les différents éléments constitutifs de la turbine ainsi que le mode de régulation de la vitesse de rotation. Enfin nous avons établi un modèle mathématique de la turbine à partir de ses équations caractéristiques.

Dans ce qui suit nous allons étudier les générateurs les plus utilisés dans la conversion de L'énergie mécanique de la turbine éolienne en énergie électrique, notamment les génératrices asynchrones.

## CHAPITRE 3

# Commande du système éolien à base de la GADA

### Introduction

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) avec rotor bobiné présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants.

Ce type de machine est utilisé comme génératrice dans la plupart des projets de centrale éolienne, car il offre de grands avantages de fonctionnement.

Intégrée dans un système éolien, la génératrice asynchrone à double alimentation permet de fonctionner sur une large plage de vitesses de vent, et d'en tirer le maximum de puissance possible, pour chaque vitesse de vent. Son circuit statorique est connecté directement au réseau électrique. Un second circuit placé au rotor est également relié au réseau mais par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance.

Etant donné que la puissance rotorique transitée est moindre, le coût des convertisseurs s'en trouve réduit en comparaison avec une éolienne à vitesse variable alimentée au stator par des convertisseurs de puissance. C'est la raison principale pour laquelle on trouve cette génératrice pour la production en forte puissance. Une seconde raison est la possibilité de régler la tension au point de connexion de cette génératrice [4].

Dans cette partie nous allons développer la commande vectorielle de la machine asynchrone double alimentée dans un objectif de contrôler la puissance active et réactive indépendamment.

### III.1 Choix du générateur

On dit souvent que l'alternateur est un générateur à courant alternatif, pour le distinguer du générateur à courant continu ou dynamo.

Il s'agit d'une erreur d'appellation : les deux types de générateurs produisent alternatif [20].

❖ **Le générateur dit à courant continu :** produit en fait du courant alternatif qui est transformé en courant continu par le collecteur et les balais (schémas de la dynamo).

❖ **Le générateur dit à courant alternatif :** produit du courant alternatif transformé en courant continu par une ou plusieurs diodes (sorts d'électroniques, qui autorisent un flux de courant que dans un seul sens, ce qui correspond à la définition du courant continu)

### III.2 Modélisation de la machine asynchrone double alimentée

Le modèle de la MADA reste le même modèle de la machine à cage, à une différence près L'enroulement rotoriques ne sont plus en court-circuit et sont accessibles via des collecteurs, par conséquent des tensions diphasées rotoriques du modèle ne sont plus nulles.

#### III.2.1 Modèle mathématique de MADA

##### III.2.1.1 Hypothèse simplificatrices :

On adopte l'hypothèse de simplification qui permettent de simplifier notablement les calculs, conduisent à des résultats suffisamment précis pour la plupart des applications.

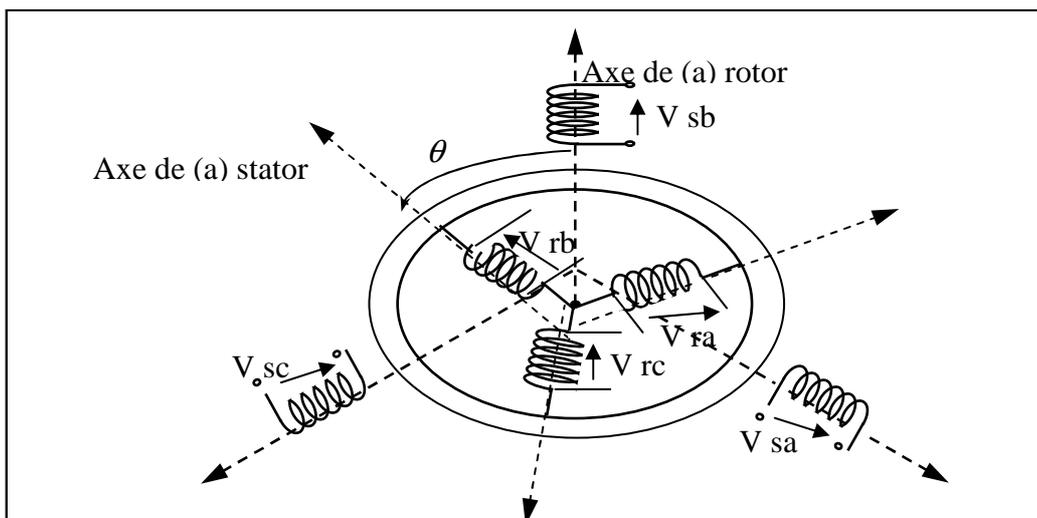
Ces hypothèses sont les suivantes :

- ❖ L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encoche est négligeable.
- ❖ La saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables.
- ❖ Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et on néglige l'effet de peau
- ❖ On admet, de plus, que la FMM créée par chacune des phases des deux armatures est à répartition sinusoïdale [21]

#### III.2.2 Modèle de la MADA

La machine asynchrone à double alimentation peut être modélisée par six équations électriques et une seule équation mécanique qui concerne la dynamique du rotor.

Elle peut être schématisée par la figure (3.1)



**Figure (3.1)** Représentation schématique d'une MAS

### III.2.3 Équations électriques de la machine asynchrone double alimentation

Les enroulements illustrés par la figure (3.1) obéissent aux équations électriques qui s'écrivent sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{cases} [\mathbf{u}_s(abc)] = \mathbf{r}_s[\mathbf{i}_s(abc)] + \frac{d[\varphi_s(abc)]}{dt} \\ [\mathbf{u}_r(abc)] = \mathbf{r}_r[\mathbf{i}_r(abc)] + \frac{d[\varphi_r(abc)]}{dt} \end{cases} \quad (3.1)$$

$\mathbf{r}_s$ : Est la résistance d'une phase statorique

$\mathbf{r}_r$ : Est la résistance d'une phase rotorique

### III.3 Application de la transformation de Park à la MADA

La machine asynchrone est une machine fortement couplée, sa représentation dans le système triphasé est par conséquent particulièrement complexe.

Pour mieux représenter le comportement d'une machine asynchrone, il est nécessaire de faire appel à un modèle précis et suffisamment simple.

Le schéma de la figure (3.2) montre le principe de la transformation de Park appliquée à la machine asynchrone à double alimentation [22]

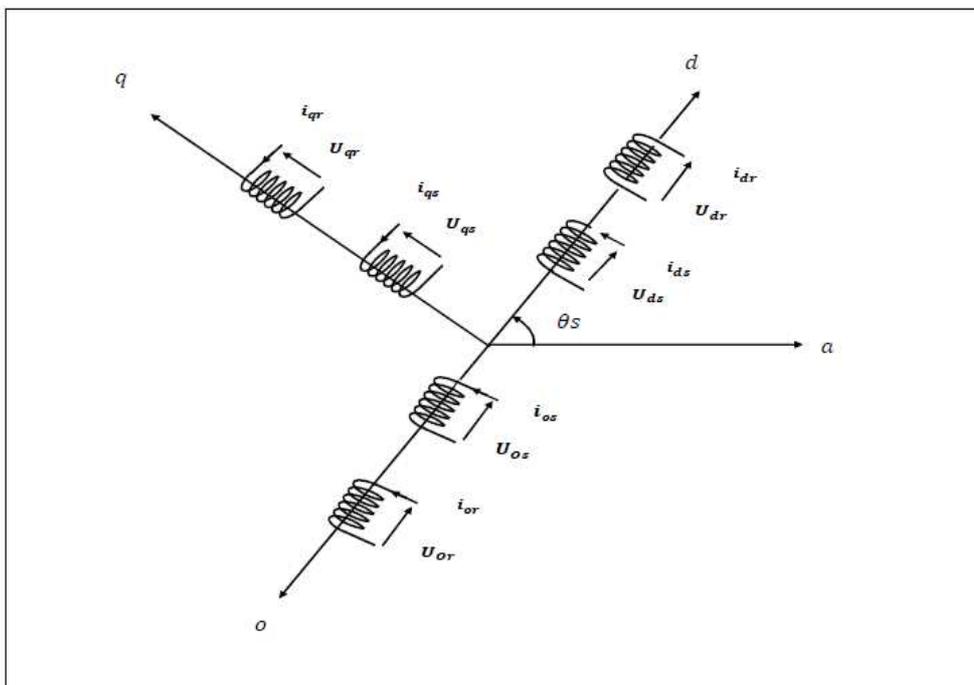


Figure (3.2) Transformation de Park

## Choix du référentiel

En général, l'étude du comportement dynamique des machines électriques peut se faire suivant la transformation de Park pour différents référentiels.

Le choix du référentiel s'effectue suivant le phénomène à étudier et les simplifications offertes par ce choix [23]. Trois types de référentiels sont intéressants en pratique :

❖ **Référentiel lié au stator** : Ce référentiel est appelé aussi système d'axes  $(\alpha, \beta)$ .

Dans ce cas,  $(\omega a = 0)$ . Ce système est utilisé pour étudier les régimes de démarrage et de freinage des machines électriques

❖ **Référentiel lié au rotor** : Dans ce cas, le système d'axes  $(d, q)$  est immobile par rapport au rotor et tourne avec la vitesse  $(\omega a = \omega r)$ .

Ce système d'axes est utile pour étudier les processus transitoires dans les machines synchrones et asynchrones avec une connexion non symétrique des circuits du rotor

❖ **Référentiel lié au champ tournant** : Ce référentiel est appelé aussi système d'axes  $(X, Y)$ , il tourne avec la vitesse du champ électromagnétique, c'est-à-dire  $(\omega a = \omega s)$ .

## III.4 Modes de fonctionnement d'un GADA dans un système éolien

### Fonctionnement hypo synchronisme

$$P_s = 2P_{mec}, P_r = P_{mec}$$

❖ **Cas générateur  $g > 0$**

En mode de fonctionnement hypo synchrone, la vitesse mécanique est faible alors le réseau reçoit une puissance statorique  $P_s$  et envoyé une puissance rotorique vers la machine.

❖ **Cas moteur :  $g > 0$**

Pour ce cas la machine en mode fonction moteur, qui tourne à une vitesse faible inférieure de la vitesse de synchronisme.

La puissance  $P_s$  fournie par le réseau au stator, la puissance de glissement transite par le rotor été réinjecte aux réseaux.

### Fonctionnement hyper synchronisme

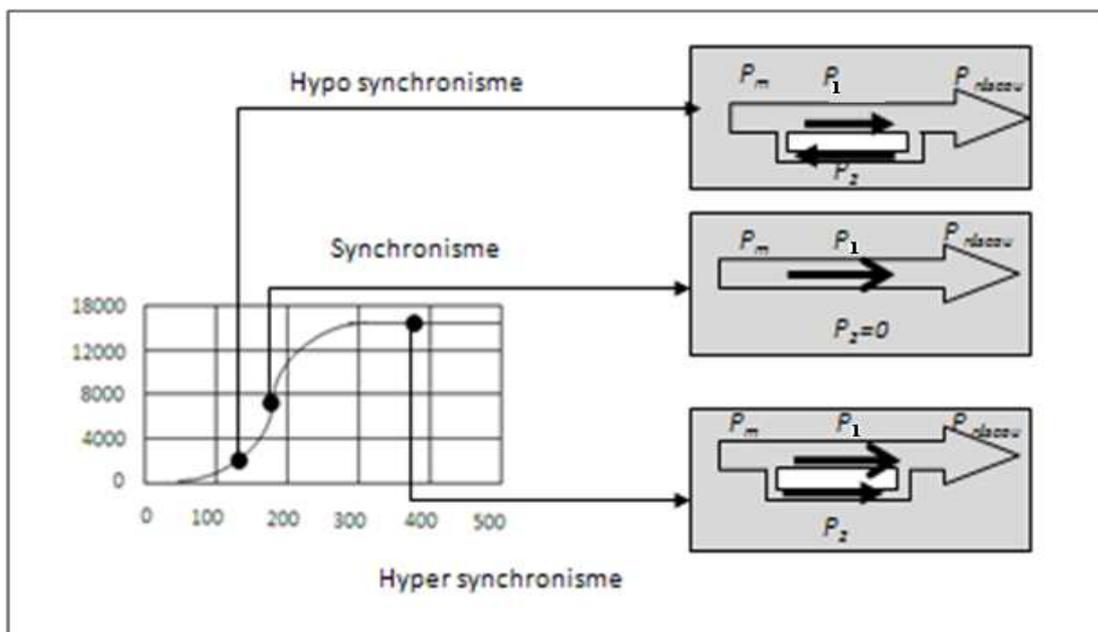
$$P_s = \frac{2}{3}P_{mec}, P_r = \frac{1}{3}P_{mec}$$

#### ❖ Cas générateur $g < 0$

En mode de fonctionnement hyper synchrone, la vitesse mécanique augmente jusqu'à une vitesse supérieure à celle du synchronisme, dans ce cas les deux puissances sont envoyées de la machine vers le réseau.

#### ❖ Cas moteur $g < 0$

La puissance est fournie par le réseau au stator on a donc un fonctionnement à vitesse supérieur aux vitesses de synchronisme.



**Figure (3.3)** Mode de fonctionnement d'une GADA

### III.5 Variation de la vitesse de MADA

Dans ce cas, le stator de la génératrice est directement couplé au réseau alors que l'enroulement rotorique triphasé bobiné avec bagues collectrices est connectée ce même réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance généralement d'un transformateur [5].

La machine asynchrone à rotor bobiné à double alimentation (MADA) peut se représenter par le schéma équivalent (3.3)

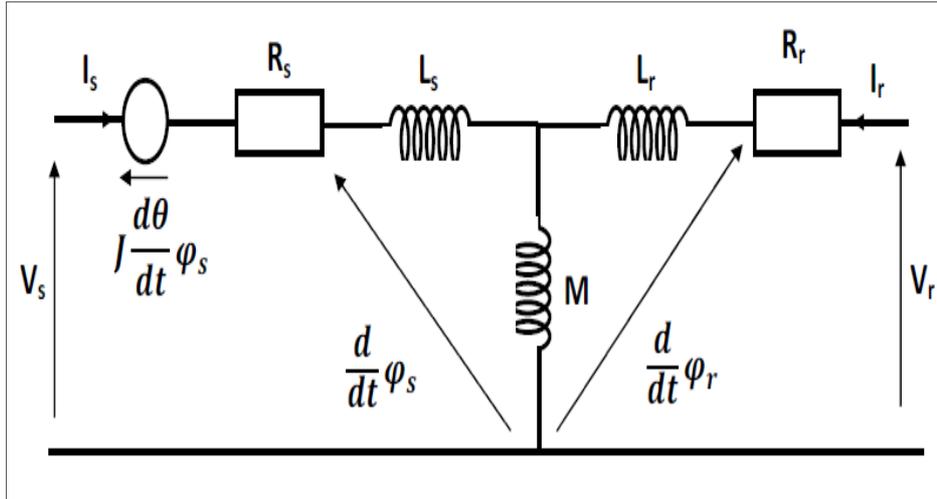


Figure (3.4) Schéma équivalent de La machine asynchrone à rotor bobiné à double alimentation

Le modèle ramené au rotor dans un référentiel lié au rotor s'écrit

$$\begin{cases} v_s = r_s i_s + \frac{d\varphi_s}{dt} + j \frac{d\theta}{dt} \varphi_s \\ v_r = r_r i_r + \frac{d\varphi_r}{dt} \end{cases} \quad (3.2)$$

L'expression des flux:

$$\begin{cases} \varphi_s = L_s i_s + M i_r \\ \varphi_r = M i_s + L_r i_r \end{cases} \quad (3.3)$$

L'expression du couple

$$c_{em} = c_r + j \frac{d\Omega}{dt} + f_r \quad (3.4)$$

$\Omega$ : vitesse de rotation de la machine

$j$ : Moment d'inertie de l'ensemble machine et turbine éolienne

$f_r$ : Coefficient de frottement.

### III.6 Modèle mathématique de la GADA dans le référentiel synchrone

La théorie de la machine asynchrone à double alimenté en basée sur la transformation de park Qui rapporte les équations statorique et rotorique triphasé à deux axes perpendiculaires (Biphasés) appelés l'axe direct d et axe quadrature q.

#### III.6.1 Modèle biphasé de la GADA

La transformation de Park appelée souvent transformation des deux axes ,fait correspondre aux variable réelles leur composantes

- homopolaire (indice 0).
- D'axe directs (indice d).
- d'axe en quadrature (indice q).

Le passage au système biphasé révient géométriquement à exprimer les composantes (d,q) en fonctions (Xa,Xb,Xc),de plus cette transformation triphasé doit obligatoirement Conserver les F.e.m ,c'est-à-dire le champs dans la machine ne doit pas être altéré[13].

la projection des courant réels sur le système d'axes (d,q) s'écrit sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_h \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Avec :

$\theta$  : angle de position de l'axe (d,q) par rapport à l'axe réel ( $x_a, x_b, x_c$ )

$\omega = \frac{d\theta}{dt}$  : vitesse de cordonné de l'axe (d,q)

Où sera :

$$[u] = P[\theta] * [u_c] \quad (3.6)$$

Le nouveau modèle est obtenu en multipliant les équations des flux et des tensions par la matrice de Park qui s'exprime par :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{u}_d \\ \mathbf{u}_q \\ \mathbf{u}_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_a \\ \mathbf{u}_b \\ \mathbf{u}_c \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

On obtient :

$$[\mathbf{u}_c] = \mathbf{P}[\theta]^{-1} * [\mathbf{u}] \quad (3.8)$$

Les équations électriques :

$$\begin{cases} v_{sd} = -r_s i_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{sq} \\ v_{sq} = -r_s i_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \varphi_{sd} \end{cases} \quad (3.9)$$

$$\begin{cases} v_{rd} = r_r i_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \omega_r \varphi_{rq} \\ v_{qr} = r_r i_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \varphi_{rd} \end{cases} \quad (3.10)$$

Les équations de flux

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = -L_s i_{sd} + M_{sr} i_{rd} \\ \varphi_{sq} = -L_s i_{qs} + M_{sr} i_{rq} \end{cases} \quad (3.11)$$

$$\begin{cases} \varphi_{rd} = L_r i_{rd} - M_{sr} i_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r i_{rq} - M_{sr} i_{qs} \end{cases} \quad (3.12)$$

### III.7 Stratégie de la commande de la GADA

#### III.7.1 Commande de la génératrice asynchrone double alimentation

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

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

#### III.7.2 Commande vectorielle de la GADA

dans le cadre de cette thèse .nous développons la commande vectorielle de la génératrice asynchrone à double alimentation avec orientation du repère (d,q)

Suivant le flux statorique.

Cette dernière se décompose en trois parties :

- le contrôle du flux
- le contrôle des courants statoriques
- le découplage ou compensation

Pour établir la commande vectorielle de la génératrice, on considère l'hypothèse simplificatrice que les enroulements statoriques ou rotorique de la machine sont supposés triphasés équilibrés, donc, toutes les composant homopolaire sont annulées.

#### III.7.3 Modèle de la GADA avec orientation du flux statorique

La particularité de GADA est qu'elle possède deux courants à contrôler directement à savoir  $\dot{i}_{rd}$ ,  $\dot{i}_{rq}$  et deux courants contrôlés indirectement  $\dot{i}_{sd}$ ,  $\dot{i}_{sq}$

On rappelle d'abord le système d'équation différentielle de la machine :

$$\begin{cases} v_{sd} = -r_s \dot{i}_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{sq} \\ v_{sq} = -r_s \dot{i}_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \varphi_{sd} \end{cases} \quad (3.13)$$

$$\begin{cases} v_{rd} = r_r \dot{i}_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \omega_r \varphi_{rq} \\ v_{qr} = r_r \dot{i}_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \varphi_{rd} \end{cases} \quad (3.14)$$

En orientant un des flux, le modèle obtenu de GADA se simplifie et le dispositif de commande qui en résulte l'est également. Un contrôle vectoriel de cette machine a été conçu en orientant le repère de park pour que le flux statorique l'axe  $q$  soit constamment

nulles :  $\varphi_{sq} = \mathbf{0}$ .

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

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_{sd}}{dt} = v_{sd} + r_s i_{sd} \\ v_{sq} = -r_s i_{sq} + \omega_s \varphi_{sd} \end{cases} \quad (3.15)$$

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_{rd}}{dt} = v_{rd} + r_r i_{rd} + \omega_r \varphi_{rq} \\ \frac{d\varphi_{rq}}{dt} = v_{rq} + r_r i_{rq} - \omega_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (3.16)$$

A partir des équations des composantes directes et quadrature du flux satorique, on obtient les expressions suivantes des courants statoriques :

$$\begin{cases} i_{sd} = -\frac{\varphi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} i_{rd} \\ i_{sq} = -\frac{M}{L_s} i_{rq} \end{cases} \quad (3.17)$$

Ces courants statoriques sont remplacés dans les équations des composantes directes et quadrature des flux rotoriques

$$\begin{cases} \varphi_{rd} = L_r \left(1 - \frac{M^2}{L_s L_r}\right) + \frac{M}{L_s} \varphi_{sd} = L_r \sigma i_{rd} + \frac{M}{L_s} \varphi_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r \left(1 - \frac{M^2}{L_s L_r}\right) i_{rq} = L_r \sigma i_{rq} \end{cases} \quad (3.18)$$

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

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_r L_s} \quad (3.19)$$

Pour le contrôle de la génératrice, des expressions sont établies montrant la relation entre les courants et les tensions rotoriques qui lui seront appliquées :

$$\begin{cases} \frac{di_{rd}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_r} (-v_{rd} - r_r i_{rd} + \omega_r \sigma L_r i_{rq} + \frac{M}{L_s} \frac{d\varphi_{sd}}{dt}) \\ \frac{di_{rq}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_r} (-v_{rq} - r_r i_{rq} - \omega_r \sigma L_r i_{rd} + \omega_r \frac{M}{L_s} \varphi_{sd}) \end{cases} \quad (3.20)$$

En notant les f.e.m suivantes :

$$\begin{cases} e_d = -\omega_r \sigma L_r i_{rq} \\ e_q = \omega_r \sigma L_r i_{rd} \\ e_\varphi = -\omega_r \frac{M}{L_s} \varphi_{sd} \end{cases} \quad (3.21)$$

Avec :  $\varphi_s = \frac{v_s}{\omega_s} = \text{cst}$

On obtient :

$$\frac{di_{rq}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_r} (-v_{rq} - r_r i_{rq} - e_q - e_\varphi) \quad (3.22)$$

$$\frac{di_{rd}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_r} (-v_{rd} - r_r i_{rd} - e_d) \quad (3.23)$$

Le couple a pour expression :

$$c_{em} = p(\varphi_{sd} i_{sq} - \varphi_{sq} i_{sd}) \quad (3.24)$$

Avec une orientation du flux statorique telle que  $\varphi_{sq} = \mathbf{0}$ , on obtient une expression simplifiée :

$$c_{em} = p(\varphi_{sd} i_{sq}) \quad (3.25)$$

Le courant  $i_{sq}$  ne pouvant être directement contrôlé, en utilisant l'équation (3.17), on fait apparaître la composante en quadrature du courant rotorique dans l'expression du couple électromagnétique :

$$c_{em} = -p * \frac{M}{L_s} (\varphi_{sd} i_{rq}) \quad (3.26)$$

❖ L'équation mécanique est donnée par l'expression suivant :

$$c_{mec} = c_r + j \frac{d\Omega}{dt} + f_r \Omega \quad (3.27)$$

❖ Relation de découplage :

$$e_{d-ref} = \omega_r \sigma i_{rq-ref} \quad (3.28)$$

$$e_{q-ref} = -L_r \omega_r \sigma i_{rd-ref} \quad (3.29)$$

❖ Les régulateurs des courants rotoriques

$$v_{d-ref} = PI(i_{rd-ref} - i_{rd}) \quad (3.30)$$

$$v_{q-ref} = PI(i_{rq-ref} - i_{rq}) \quad (3.31)$$

Estimation de  $\varphi_{sd-est}$  à partir de l'équation différentielle (3.15), on peut déterminer une estimation dynamique du flux statorique d'axe d

$$\varphi_{sd-est} = \frac{1}{1+T_s S} (T_s v_{sd} + M i_{rd}) \quad (3.32)$$

Où  $T_s = \frac{L_s}{r_s}$  est le constant de temps statorique et S est la grandeur de la place.

Le flux de référencé est déterminé par :

$$\varphi_{s-ref} = -\frac{M}{1+T_s S} i_{dr-ref}$$

Les principales grandeurs statoriques peuvent être contrôlées par l'intermédiaire des courants rotoriques dans un cas comme dans l'autre du fait des approximations possibles [5] :

$$\begin{cases} P_S \cong v_{sq} i_{sq} \\ Q_S \cong v_{sq} i_{sd} \end{cases} \quad (3.33)$$

en remplacent les courants statoriques par leurs valeurs de l'équation (3.17) dans l'équation (3.33) nous obtenons les expressions suivantes pour les puissances actives et réactives :

$$\begin{cases} P_S = -\frac{M}{L_s} v_{sq} i_{rq} \\ Q_S = -v_{sq} \frac{\varphi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} v_{sq} i_{rd} \end{cases} \quad (3.34)$$

Avec :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = \frac{v_{sq}}{\omega_s} \\ \omega_r = \omega_s - p\Omega_g \end{cases} \quad (3.35)$$

En tirant  $\varphi_s = \frac{v_s}{\omega_s}$  de l'équation (3.33), l'expression de la puissance réactive devient :

$$Q_s = -\frac{1}{L_s} \frac{v_{sq}^2}{\omega_s} - \frac{M}{L_s} i_{rd} v_{sq} \quad (3.36)$$

On peut constater que le couple et la puissance active statorique sont contrôlés par le courant  $i_{rq}$  tandis que la puissance réactive statorique peut être contrôlée par le courant  $i_{rd}$ .

Les régulateurs des puissances statoriques :

$$i_{dr-ref} = PI(Q_{s-ref} - Q_s) \quad (3.37)$$

$$i_{qr-ref} = PI(P_{s-ref} - P_s) \quad (3.38)$$

### III.8 Relations du processus et de la commande vectorielle de la GADA

Pour la conception de la commande, on suppose que les courants mesurés ainsi que la vitesse mesurée ou estimée sont égaux aux courants et à la vitesse réelle

	Processus		Commande
A4	$v_d = -v_{rd} - e_d$	E1	$v_{rd-ref} = -v_{d-ref} - e_{d-ref}$
A5	$v_q = -v_{rq} - e_q - e_\phi$	E2	$v_{rq-ref} = v_{q-ref} - e_{q-ref} - e_\phi$
A1	$\frac{di_{rd}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_r} (v_d - r_r i_{rd})$	E3	$v_{d-ref} = PI(i_{rd-ref} - i_{rd})$
A2	$\frac{di_{rq}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_r} (v_q - r_r i_{rq})$	E4	$v_{q-ref} = PI(i_{rq-ref} - i_{rq})$
A3	$\frac{d\phi_{sd}}{dt} = v_{sd} - \frac{r_s M}{L_s} i_{rd} - \frac{r_s}{L_s} \phi_{sd}$	E5	$i_{rd-ref} = PI(\phi_{ref} - \phi_{sd-est})$
A6	$c_{em} = -p * \frac{M}{L_s} \phi_{sd} i_{qr}$	E6	$i_{rq-ref} = -p \frac{L_s}{M} \phi_{ref} c_{em-reg}$
$e_d$	$e_d = -\omega_r \sigma L_r i_{rq}$	$e_{d-ref}$	$e_{d-ref} = \omega_r \sigma i_{rq-ref}$
$e_q$	$e_q = \omega_r \sigma L_r i_{rd}$	$e_{q-ref}$	$e_{q-ref} = -L_r \omega_r \sigma i_{rd-ref}$
$e_\phi$	$e_\phi = -\omega_r \frac{M}{L_s} \phi_{sd}$	$e_{\phi-est}$	$e_{\phi-est} = \omega_r \frac{M}{L_s} \phi_{ref}$

### III.9 Représentation GADA sous la forme graphe information

A partir les relations de tableaux, Le graphe d'information correspondant au modèle de la machine asynchrone double alimentation ayant son flux statorique orienté est représenté la fig. (3.5) [24]

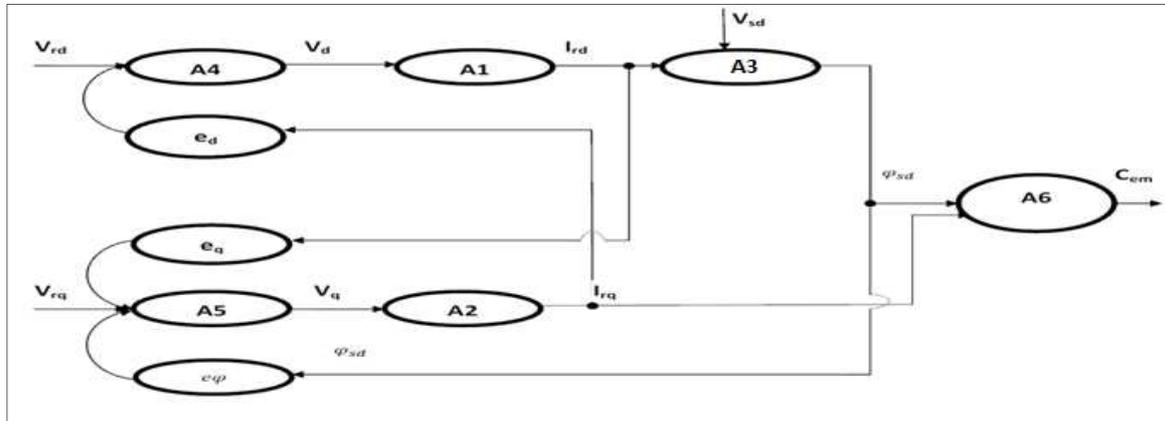


Figure. (3.5) Graphe d'information de modèle de la GADA

#### III.9.1 Modèle de GADA à réguler

A partir équation (3.34) et (3.20) un schéma bloc qui comporte en entrées les tensions rotoriques et en sorties les puissances actifs et réactifs statoriques est établi dans la figure (3.6)

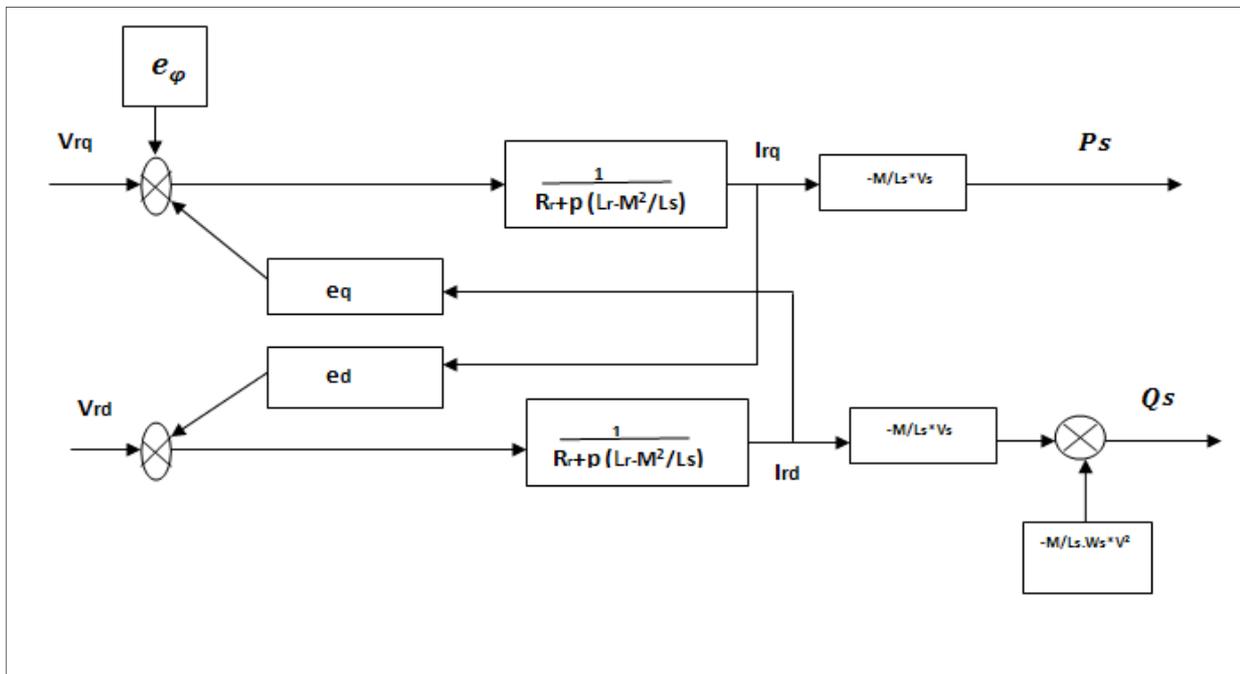


Figure (3.6) Schémas bloc GADA à réguler

Pour établir le graphe d'information de la commande de la machine asynchrone à cage, on inverse les relations explicitées dans le tableau.

L'architecture du dispositif de commande repose sur l'utilisation :

- De relation de découplage (**E1, E2,  $e_{d-ref}$  et  $e_{q-ref}$** )
- De régulation des courants rotoriques (**E3, E4**)
- D'un régulateur de flux (**E5**) associé à un estimateur de flux (**A3**)
- D'une compensation de la composante directe du flux statorique ( $e_{\varphi-est}$ )

### III.10 Graphe d'information de modèle de la commande :

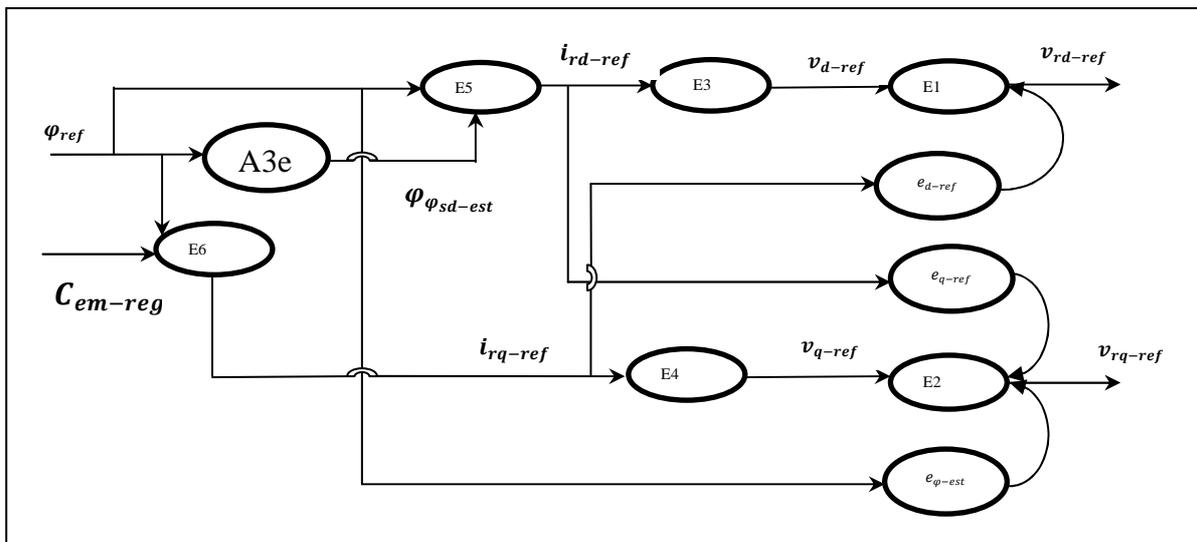


Figure. (3.6) Représentation de modèle de la commande

### III.11 Système de commande d'une GADA

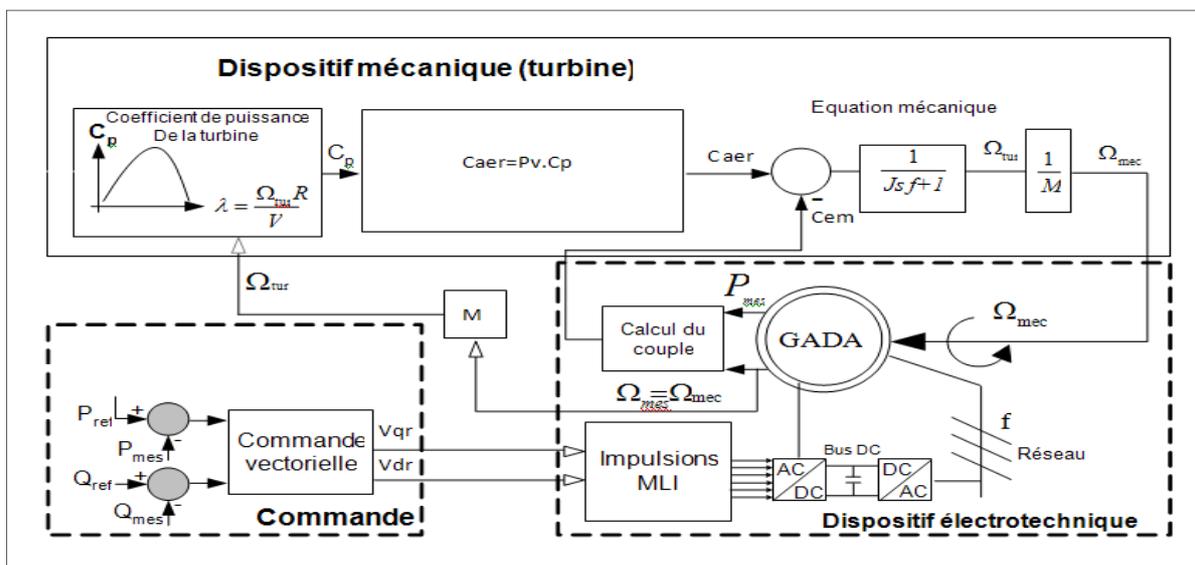


Figure. (3.7) Schéma synoptique de la commande d'une GADA

### III.12 Modèle de commande d'une GADA

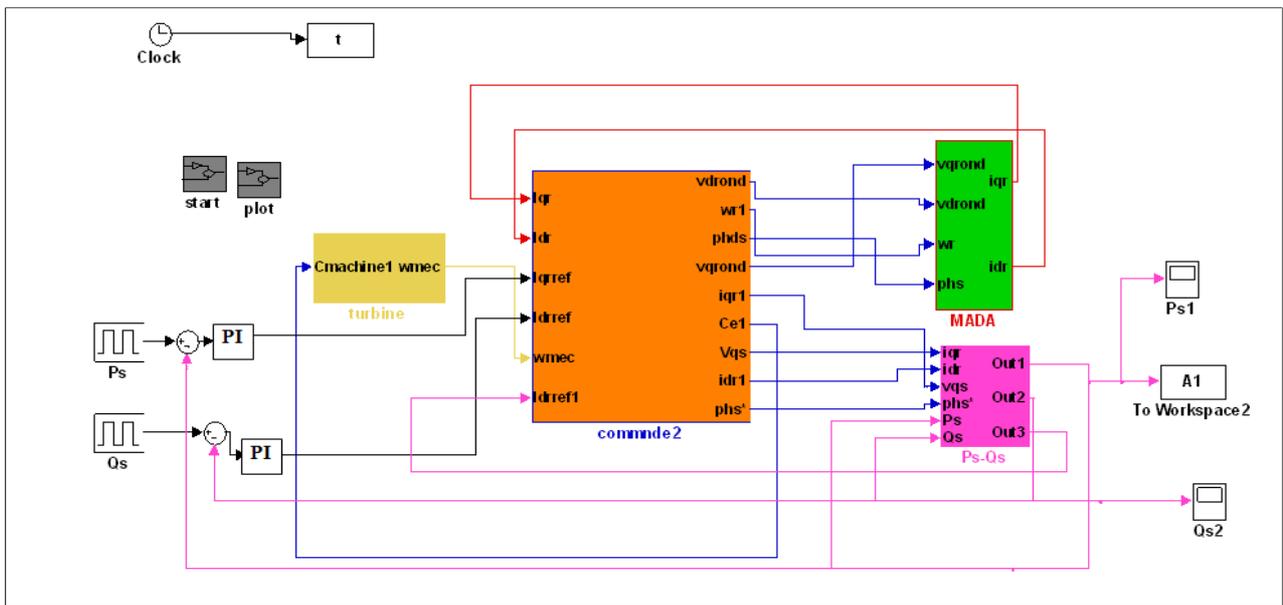
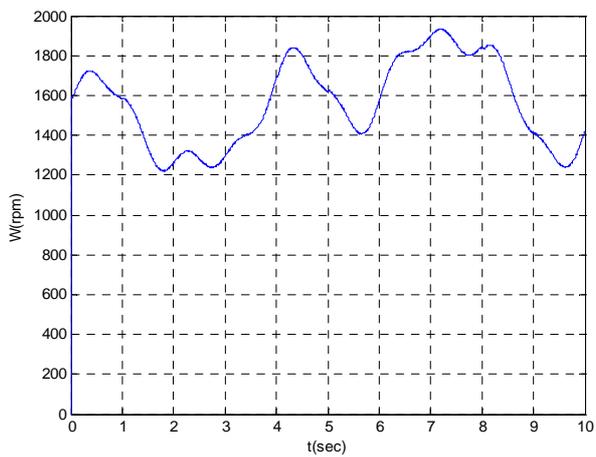


Figure. (3.8) Schéma de simulation de la commande d'une GADA

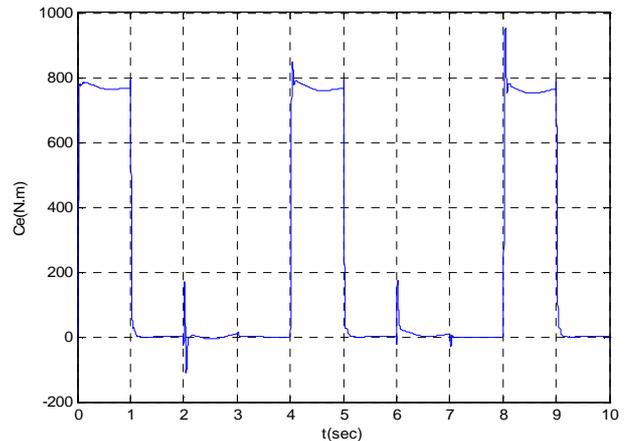
### III.13 RESULTATS DE SIMULATION

Vitesse de la turbine (tr/min)



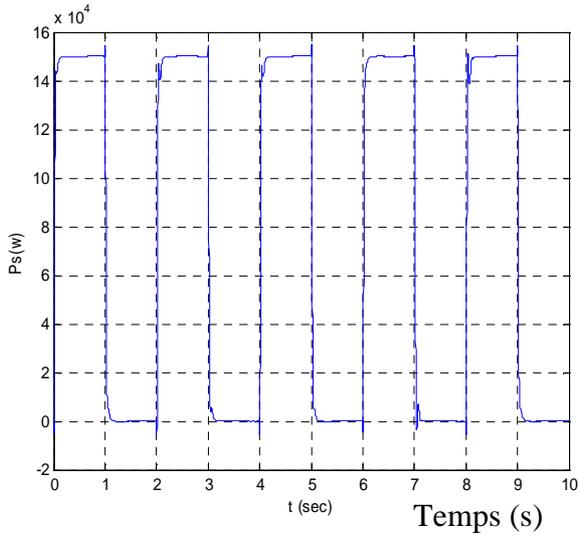
Temps (s)

Couple électromagnétique Ce (N.m)

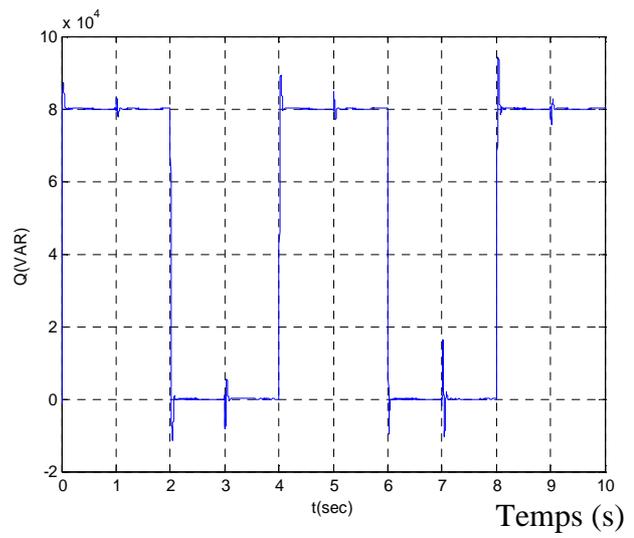


Temps (s)

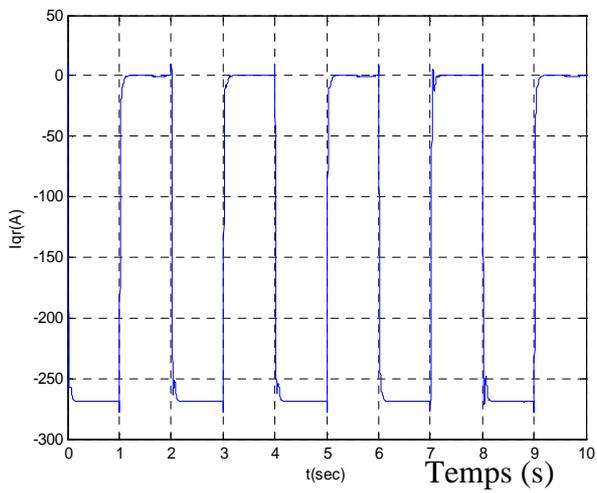
Puissance active (w)



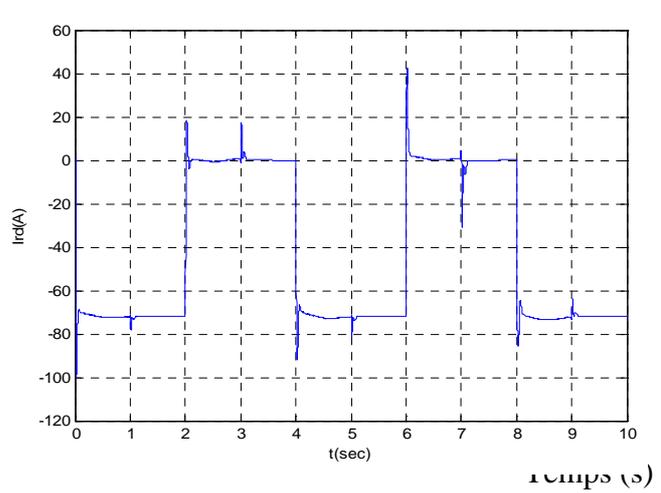
Puissance réactive Q(var)



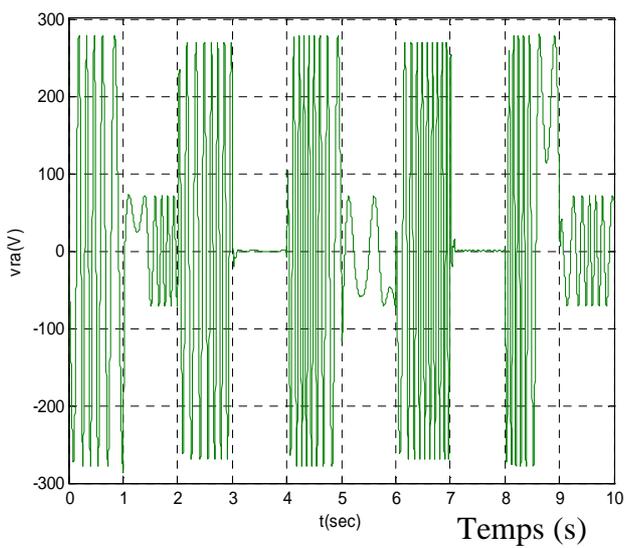
Courant rotorique  $I_{qr}$  (A)



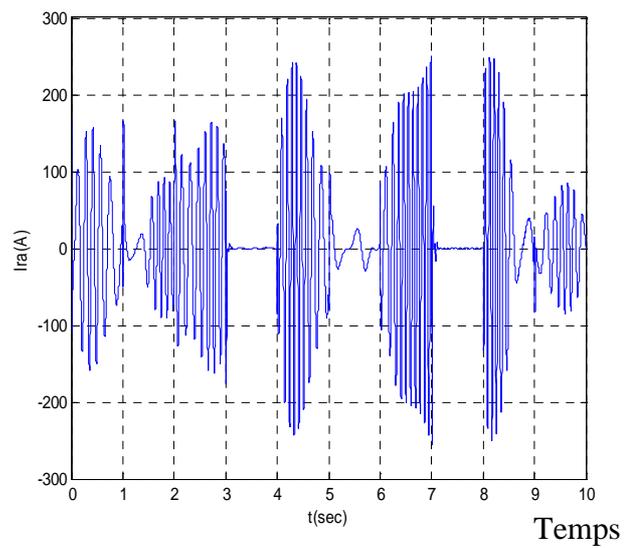
Courant rotorique  $I_{rd}$  (A)



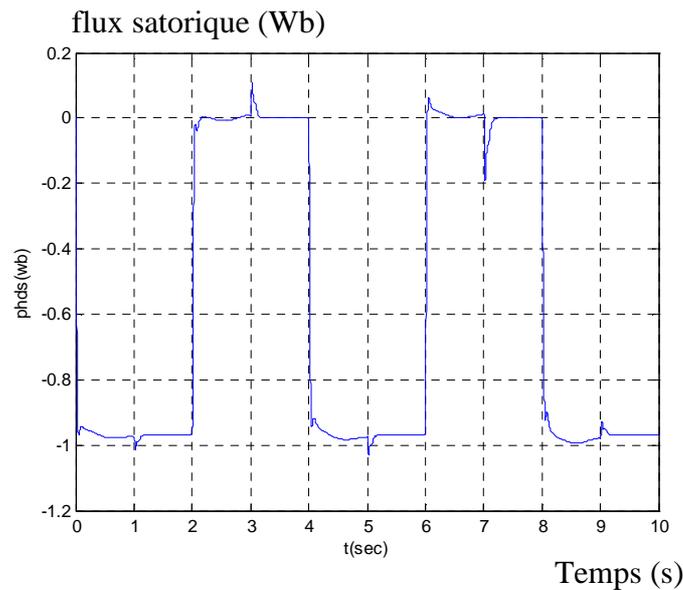
Tension rotorique  $V_{ra}$  (V)



Courant rotorique  $I_{ra}$  (A)



(s)



### Interprétation des résultats :

Les figures ci-dessus représentent les résultats de simulation de notre système éolien (Turbine + GADA) contrôlé par des régulateur PI .

Le modèle est simulé dans le référentiel (d,q) lié au champ tournant.

Une suivante parfaite des échelons (signal carre) que ce soit la puissance active pour une valeur entre 0 et 1.5MW, la puissance réactive entre 0 et 0.8 MVAR .

Les deux puissances présentent une robustesse acceptable malgré la simplicité des régulateurs applique qui sont de type PI.

On n'oublant pas l'influence des ces deux paramètres sur la machine où on observe des variations aux niveaux des courant rotorique  $I_{dr}$ ,  $I_{qr}$  ainsi que les tensions statorique, rotorique qui sont eux-mêmes contrôles par des régulateurs de type PI

Consternant la régulation aux niveaux de la vitesse de l'arbre mécanique qui liée à la turbine par l'intermédiaire d'un multiplicateur, où la vitesse de vent est variable (zone 02)

A  $t \in [0 \ 1]$  des pics aux niveaux de la vitesse qui due à la puissance active et réactive qui sont illustre, mais la régulation prouvait une bonne suite de la vitesse de référence.

## **Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons décrit en premier le principe de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation (stator-rotor) en fonctionnement génératrice.

Par ailleurs, pour l'application de celle-ci dans un système éolien, nous avons par la suite, établi le modèle de la machine à l'aide de ses équations électriques et de flux dans le système d'axe ( d-q) lié au synchronisme.

Nous avons aussi développé la méthode de commande vectorielle en puissance de la machine asynchrone pour contrôler Indépendamment les puissances actif et réactif.

La synthèse du régulateur PI utilisé pour stabiliser le système à cause de sa rapidité et de simplicité, nous a permis de déterminer les constantes de temps nécessaires au choix de ces composants.

## CHAPITRE 4

# Association onduleur-SVM de la GADA

### Introduction

L'utilisation des technologies numériques permet le recours à des stratégies de modulation triphasée spécifiques, non déduites des techniques analogiques initialement conçues en monophasé. Parmi ces techniques numériques on trouve la modulation vectorielle (ou *Espace Vector Modulation*) qui traite les signaux directement dans le plan diphasé de la transformée nommée de Concordia. La SVM est certainement la méthode de MLI la mieux adaptée au contrôle des moteurs asynchrones. Contrairement à d'autres méthodes, la MLI vectorielle ne s'appuie pas sur des calculs séparés des modulations pour chacun des bras de l'onduleur. Un vecteur tension de contrôle est calculé globalement et approximé, sur une période de modulation  $T_s$ , par un vecteur tension moyen. Cette modulation est utilisée dans les commandes modernes des machines asynchrones.

Cette technique de modulation repose sur la représentation d'une machine triphasée par une machine diphasée équivalente. On définit ainsi deux repères diphasés, l'un lié au stator et l'autre lié au champ tournant ( $d-q$ ), où le passage des grandeurs triphasées aux grandeurs diphasées se fait par simple projection sur les axes concernés.

Dans cette partie, nous allons montrer une stratégie de commande que nous avons présentée, et aussi la commandes en MLI avec porteuse ou en modulation vectorielle représentent aussi le travail le plus important des commandes vectorielles.

## IV.1 Onduleur de tension

L'onduleur de tension à modulation de largeur d'impulsion (MLI) est un convertisseur statique d'énergie électrique qui transforme une source de tension continue en une alimentation de tension alternative pour alimenter des charges en courant alternatif. La tension transmise reste déterminée par les caractéristiques propres de la machine [25].

Les signaux de commande des interrupteurs de chaque bras doivent être complémentaires pour éviter le court-circuit de l'alimentation continue de l'onduleur [26].

## IV.2 Modélisation de l'onduleur de tension

L'onduleur est un convertisseur d'électronique de puissance qui permet la conversion continue alternatif. Pour modéliser l'onduleur de tension, Fig. (4.1) on considère son alimentation comme une source parfaite, supposée être constituée de deux générateurs de f.é.m. égale à  $U_c/2$  connectés entre eux par un point noté  $n_0$

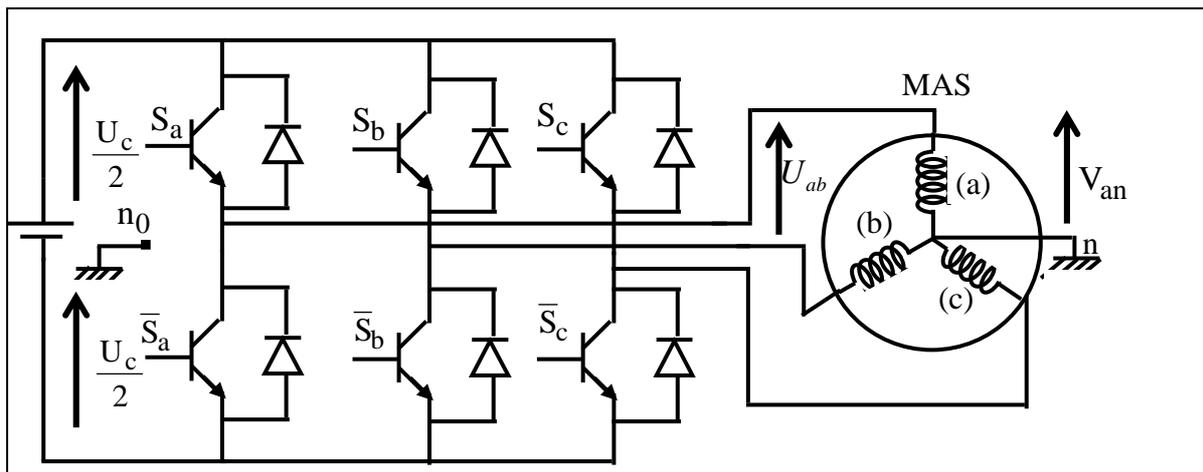


Figure (4.1) l'onduleur de tension

L'état des interrupteurs, supposés parfaits, peut être représenté par trois grandeurs booléennes de commande  $S_j$  ( $j = a, b, c$ ) telle que :

$S_j = 1$  Si l'interrupteur du haut est fermé et du bas ouvert

$S_j = 0$  Si l'interrupteur du haut est ouvert et celui de bas fermé

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

$$\begin{cases} u_{ab} = u_{an1} - u_{bn1} \\ u_{bc} = u_{bn1} - u_{cn1} \\ u_{ca} = u_{cn1} - u_{an1} \end{cases} \quad (4.1)$$

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

$$\begin{cases} \mathbf{u}_{an} = \frac{1}{3}(\mathbf{u}_{ab} - \mathbf{u}_{ca}) \\ \mathbf{u}_{bn} = \frac{1}{3}(\mathbf{u}_{bc} - \mathbf{u}_{ab}) \\ \mathbf{u}_{cn} = \frac{1}{3}(\mathbf{u}_{ca} - \mathbf{u}_{bc}) \end{cases} \quad (4.2)$$

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  $n_0$ .

$$\begin{cases} \mathbf{u}_{an_0} = \mathbf{u}_{an} + \mathbf{u}_{nn_0} \\ \mathbf{u}_{bn_0} = \mathbf{u}_{bn} + \mathbf{u}_{nn_0} \\ \mathbf{u}_{cn_0} = \mathbf{u}_{cn} + \mathbf{u}_{nn_0} \end{cases} \quad (4.3)$$

Donc, on peut déduire que :

$$\mathbf{u}_{nn_0} = \frac{1}{3}(\mathbf{u}_{an_0} + \mathbf{u}_{bn_0} + \mathbf{u}_{cn_0}) \quad (4.4)$$

Dans ces conditions on peut écrire :

$$\mathbf{u}_{jn_0} = S_j U_c - \frac{U_c}{2} \quad U_c : \text{la tension continue}$$

On a donc :

$$\begin{cases} \mathbf{u}_{an_0} = s_a U_c - \frac{1}{2} U_c \\ \mathbf{u}_{bn_0} = s_b U_c - \frac{1}{2} U_c \\ \mathbf{u}_{cn_0} = s_c U_c - \frac{1}{2} U_c \end{cases} \quad (4.5)$$

En remplaçant (4.4) dans le système (4.3), on obtient :

$$\begin{cases} \mathbf{u}_{an} = \frac{2}{3} \mathbf{u}_{an_0} - \frac{1}{3} \mathbf{u}_{bn_0} - \frac{1}{3} \mathbf{u}_{cn_0} \\ \mathbf{u}_{bn} = -\frac{1}{3} \mathbf{u}_{an_0} + \frac{2}{3} \mathbf{u}_{bn_0} - \frac{1}{3} \mathbf{u}_{cn_0} \\ \mathbf{u}_{cn} = \frac{1}{3} \mathbf{u}_{an_0} - \frac{1}{3} \mathbf{u}_{bn_0} + \frac{2}{3} \mathbf{u}_{cn_0} \end{cases} \quad (4.6)$$

En remplaçant (4.6) dans (4.5), on obtient les tensions sous la forme matricielle:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{u}_{an} \\ \mathbf{u}_{bn} \\ \mathbf{u}_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \mathbf{U}_C \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{s}_a \\ \mathbf{s}_b \\ \mathbf{s}_c \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Si  $\mathbf{u}_{an_0}, \mathbf{u}_{bn_0}, \mathbf{u}_{cn_0}$ , sont les tension d'entrée de l'onduleur (valeur continues), alors  $\mathbf{u}_{an}, \mathbf{u}_{bn}, \mathbf{u}_{cn}$  sont la tension de sortie de cet onduleur (valeurs alternatives) par conséquent l'onduleur de tension peut être modélisé par une matrice  $[\mathbf{T}]$  assurant le passage continu-alternatif

$$[\mathbf{T}] = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

### IV.3 Principe de l'onduleur de tension a MLI

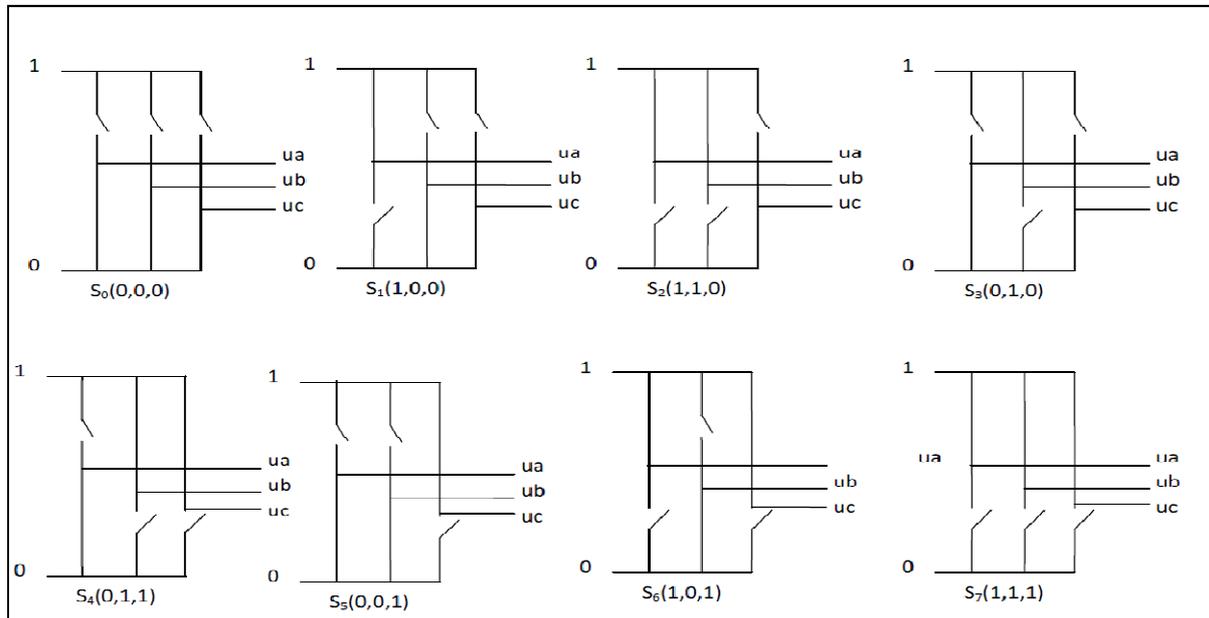
La MLI consiste à former chaque alternance de la tension de sortie de l'onduleur par un ensemble d'impulsions sous forme des créneaux rectangulaires de largeurs modulées de telle sorte à rapprocher cette tension vers la sinusoïde. En effet, la MLI permet de reconstituer ces tensions (ou courants) à partir d'une source à fréquence et à tension fixe (En général une tension continue). Le réglage est effectué par les durées d'ouverture et de fermeture des interrupteurs et par les séquences de fonctionnement [27].

Cette modulation est utilisée par les commandes modernes des machines à courant alternatif les tensions de référence sont les tensions simples désirées à la sortie de l'onduleur.

- ❖ Le signal de référence est échantillonné sur des intervalles T (MLI régulière)
- ❖ Pour chaque phase, on envoie une impulsion de largeur centrée sur la période (MLI symétrique) dont la valeur moyenne est égale à la valeur de la tension de référence à l'instant d'échantillonnage.
- ❖ Tout les interrupteurs d'un même demi -pont ont un état identique au centre et aux deux extrémités de la période, [25],[27]

#### IV.4 Les états de commutation MLI de la SVM

L'onduleur a deux étage possède six transistors, il y a 8 états de commutations possibles .



**Figure (4.2)** vecteur tension des états de l'onduleur

Les vecteurs tensions des états  $s_1$  à  $s_6$  sont appelés vecteurs actifs tandis que  $s_0$  et  $s_7$  sont appelés vecteur nuls, parce qu'ils n'ont aucun angle et phase.

Chaque bras de commande a besoin d'être complémentaire. cela veut dire d'avoir, sur un même bras de, lorsque le transistor de l'étage supérieur est fermé, celui du bas doit obligatoirement être ouvert, et vice versa.

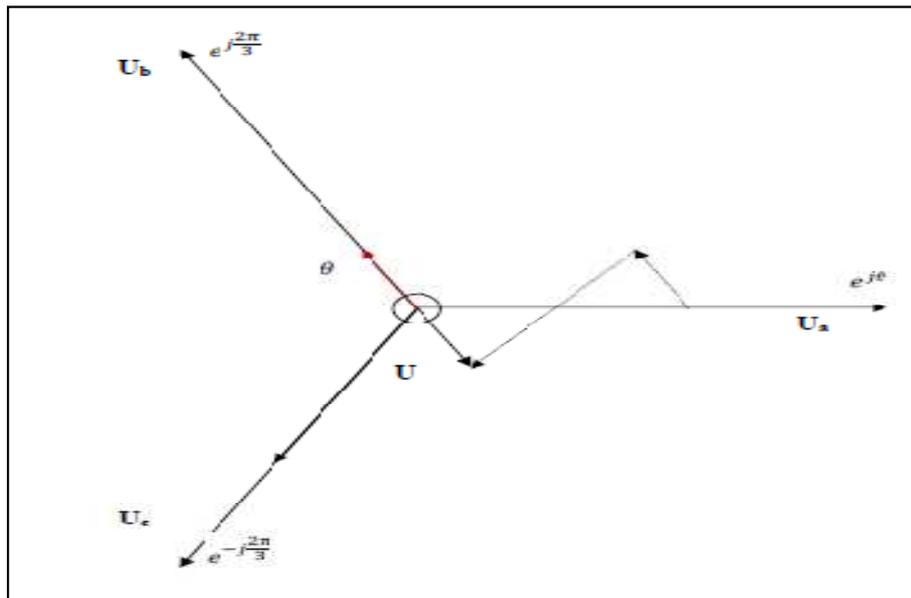
Chaque état conduit le courant dans les trois phases du moteur, produisant les vecteurs de tension [28].

Du fait que la somme des trois tensions simples est égale à zéro.

Le vecteur d'espace  $\bar{U}_{Srf}$  est facilement calculé avec la formule :

$$\bar{U} = u_a(t)e^{j\theta} + u_c(t)e^{j\frac{2\pi}{3}} + u_c(t)e^{-j\frac{2\pi}{3}} \quad (4.9)$$

$$\bar{U} = u_\alpha(t) + j u_\beta(t)$$



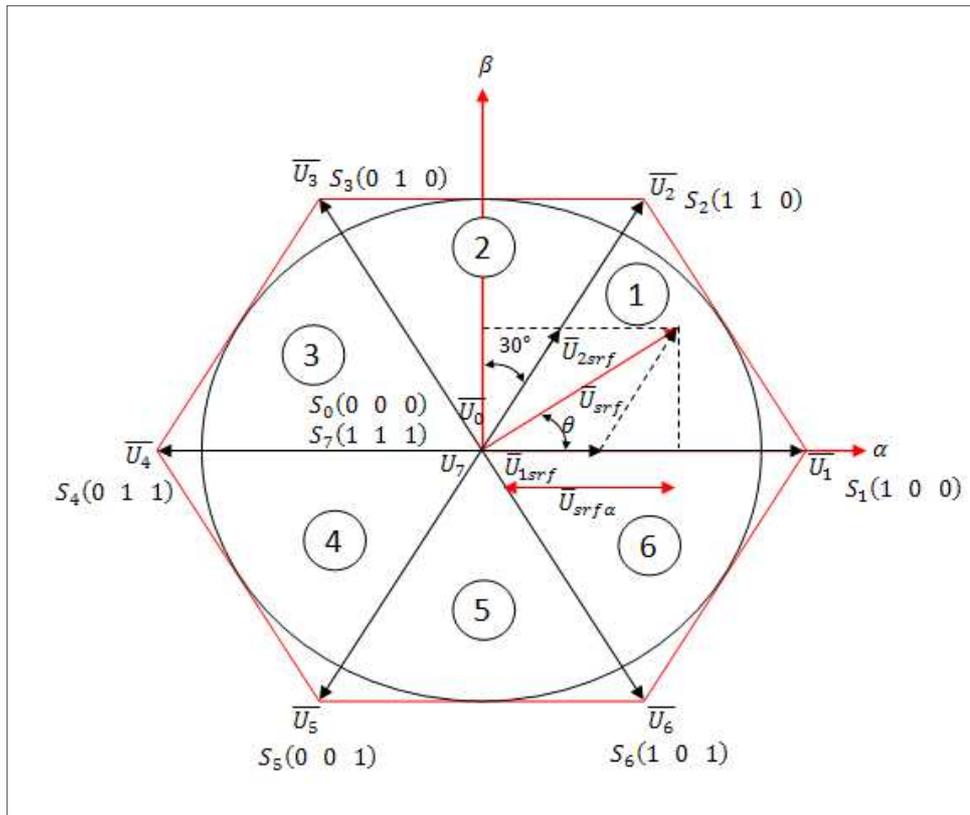
**Figure (4.3)** représentation vecteur d'espace

La tension de phase du vecteur d'espace peut être représentée dans un système de coordonnées polaires et le résultat dans un vecteur d'espace  $\overline{U}_{Srf}$ . le vecteur d'espace  $\overline{U}_{Srf}$  est représenté sur la Fig. (4.3)

L'angle  $\theta$  augmente constamment, ceci résulte de la rotation du vecteur d'espace .le résultat de l'application de ce vecteur est une forme d'onde sinusoïdale.

#### IV.5 Technique de le (*Space Vector Modulation*) SVM

La technique SVM est basée sur six secteurs de fonctionnement, les tensions  $u_{an}, u_{bn}, u_{cn}$  sont converties en vecteur d'espaces et sont placées dans un système de coordonnées polaires, les six secteurs correspondent aux vecteur  $\vec{U}_1$  à  $\vec{U}_6$ .



**Figure (4.4)** Diagramme des 6 secteurs de la SVM

Utilisation de la transformation des trois tensions de phase à la structure  $(\alpha, \beta)$  de référence, la tension  $\bar{U}_{srf}$  représente la somme phaseur spatial des trois tensions de phase. Lorsque la tension de sortie désirée est trois phases des tensions sinusoïdales à  $120^\circ$  Déphasage,  $\bar{U}_{srf}$  devient un phaseur tournant avec la même fréquence et une amplitude égale à la tension correspondante à la ligne en ligne efficace.

L'objectif de la technique P<sub>WM</sub> espace vectoriel est de rapprocher les  $\bar{U}_{srf}$  phaseur de tension de référence par une combinaison des huit modèles de commande. Pratiquement, seuls les deux Etats limitrophes ( $\bar{U}_x$  et  $\bar{U}_{x+60}$ ).

La tension de référence  $\bar{U}_{srf}$  peut être approchée par avoir l'onduleur dans des états de commutation et de  $\bar{U}_x, \bar{U}_{x+60}$  et pour  $T_1$  et  $T_2$  durée du temps respectivement.

$$\bar{U}_{srf} = \frac{1}{T_s} (\bar{U}_x T_1 + T_2 \bar{U}_{x+60})$$

Le vecteur d'espace référence est approximé sur la période modulation,  $\bar{U}_{srf}$  peut être tracé comme dans le diagramme du dessus et calculé mathématiquement :

$$\bar{U}_{srf} = \frac{1}{T_s} [T_0 \bar{U}_0 + T_1 \bar{U}_1 + T_2 \bar{U}_2 + T_3 \bar{U}_3 + T_4 \bar{U}_4 + T_5 \bar{U}_5 + T_6 \bar{U}_6 + T_7 \bar{U}_7] \quad (4.10)$$

Avec

$$\vec{U}_{srf} = \vec{U}_{srf\alpha} + \vec{U}_{srf\beta} \quad (4.11)$$

$$\bar{U}_{srf} = \sqrt{U_{srf\alpha}^2 + U_{srf\beta}^2} \quad (4.12)$$

### IV.5.1 Table de l'onduleur de tension

Comme le montre le tableau (4.1), il y a huit combinaisons possibles de sur et en dehors des modèles pour les trois interrupteurs électroniques d'alimentation supérieure, l'onduleur triphasé

Notez que la sur et en dehors des états d'interrupteurs de puissance inférieure sont opposées à celles du haut et ainsi complètement déterminé dès que les États de la puissance supérieure de commutateurs électroniques sont connus.

La phase de tensions correspondante aux huit combinaisons de commutation modèles peut être mappée dans le cadre  $(\alpha, \beta)$  dans  $(\alpha, \beta)$ -transformations.

Cette transformation en six vecteurs non nuls de tension et de deux vecteurs de zéro. Les vecteurs non nuls forment les axes d'un hexagone contenant six secteurs ( $s_1, s_6$ ) comme le montre la **Fig. (4.4)**. L'angle entre deux non-adjacentes à zéro des vecteurs est de 60 degrés électriques. Le zéro des vecteurs sont à l'origine et d'appliquer un vecteur nul de tension au moteur.  $(\alpha, \beta)$  dérivés tensions en termes de la tension  $U_c$  sont résumées dans le tableau (4.6)

Analyse combinatoire de tous les états possibles des interrupteurs permet de calculer

Le vecteur de tension  $[U_{s\alpha} U_{s\beta}]$

Les composantes de la tension  $U_s$  alimentant la machine ( $U_{s\alpha}, U_{s\beta}$ ) peuvent être exprimées en utilisant le passage triphasé-biphasé par le biais de la matrice (Concordia) respectant le transfert de la puissance [29].

$$\begin{bmatrix} U_{S\alpha} \\ U_{S\beta} \\ U_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{an} \\ u_{bn} \\ u_{cn} \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

Nous pouvons donc dresser un tableau (4.1), des différents états de l'onduleur :

Vecteur	$S_a$	$S_b$	$S_c$	$u_{an}$	$u_{bn}$	$u_{cn}$	$U_{Srf\alpha}$	$U_{Srf\beta}$	Vecteur $\vec{U}_{Srf}$
$\bar{U}_0$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\bar{U}_5$	0	0	1	$-\frac{U_c}{3}$	$-\frac{U_c}{3}$	$\frac{2U_c}{3}$	$-\sqrt{\frac{1}{6}}U_c$	$-\sqrt{\frac{1}{2}}U_c$	$\sqrt{\frac{2}{3}}U_c e^{j\frac{4\pi}{3}}$
$\bar{U}_3$	0	1	0	$-\frac{U_c}{3}$	$\frac{2U_c}{3}$	$-\frac{U_c}{3}$	$-\frac{1}{\sqrt{6}}U_c$	$\sqrt{\frac{1}{2}}U_c$	$\sqrt{\frac{2}{3}}U_c e^{j\frac{2\pi}{3}}$
$\bar{U}_4$	0	1	1	$-\frac{2U_c}{3}$	$\frac{U_c}{3}$	$\frac{U_c}{3}$	$-\sqrt{\frac{2}{3}}U_c$	0	$-\sqrt{\frac{2}{3}}U_c$
$\bar{U}_1$	1	0	0	$\frac{2U_c}{3}$	$-\frac{U_c}{3}$	$-\frac{U_c}{3}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}U_c$	0	$\sqrt{\frac{2}{3}}U_c$
$\bar{U}_6$	1	0	1	$\frac{U_c}{3}$	$-\frac{2U_c}{3}$	$\frac{U_c}{3}$	$\sqrt{\frac{1}{6}}U_c$	$-\sqrt{\frac{1}{2}}U_c$	$\sqrt{\frac{2}{3}}U_c e^{j\frac{5\pi}{3}}$
$\bar{U}_2$	1	1	0	$\frac{U_c}{3}$	$\frac{U_c}{3}$	$-\frac{2U_c}{3}$	$\sqrt{\frac{1}{6}}U_c$	$\sqrt{\frac{1}{2}}U_c$	$\sqrt{\frac{2}{3}}U_c e^{j\frac{\pi}{3}}$
$\bar{U}_7$	1	1	1	0	0	0	0	0	0

**Tableau (4.1)** table de vérité de l'onduleur de tension

### IV.6 Principe de le (*Space Vector Modulation*) SVM

Le principe de la SVM est génération du  $\bar{U}_{srf}$ , le vecteur d'espace est usuellement déterminé par les deux tensions les plus proches délimitant les secteurs (1) à (6) et les vecteur nuls  $\bar{U}_0$  et  $\bar{U}_7$ , les tensions  $\bar{U}_1$  et  $\bar{U}_2$ , sont seulement appliquées durant un pourcentage de temps.

On va représenter le cas où le vecteur de référence se trouve dans le secteur (1) le temps d'application des vecteurs adjacents est donné comme suit [28].

$$\frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} \bar{U}_{srf} dt = \frac{1}{T_s} \left( \int_0^{T_1} \bar{U}_1 dt + \int_{T_1}^{T_1+T_2} \bar{U}_2 dt + \int_{T_1+T_2}^{T_s} \bar{U}_0 dt \right) \quad (4.14)$$

La tension de référence  $\bar{U}_{srf}$  peut être approchée par avoir l'onduleur dans des états de commutation et de  $U_x$  et  $U_{x+60}$  pour  $T_1$  et  $T_2$  durée du temps respectivement.

Dans le secteur (1) la formule du vecteur  $\bar{U}_s$  est :

$$\begin{cases} \bar{U}_{srf} = \frac{1}{T_s} [T_0 \bar{U}_0 + T_1 \bar{U}_1 + T_2 \bar{U}_2 + T_7 \bar{U}_7] \\ \bar{U}_{srf} = \frac{T_1}{T_s} \bar{U}_1 + \frac{T_2}{T_s} \bar{U}_2 + \frac{1}{T_s} [T_0 \bar{U}_0 + T_7 \bar{U}_7] \\ \bar{U}_{srf} = \frac{T_1}{T_s} \bar{U}_1 + \frac{T_2}{T_s} \bar{U}_2 \end{cases} \quad (4.15)$$

Bien sûr, le secteur des affiliés doit être connu en premier. L'identification du secteur et le calcul de  $T_1$  et  $T_2$  sont présentés dans la section suivante. Puisque la somme de  $T_1$  et  $T_2$  devrait être inférieure ou égale à,  $T_s$  l'onduleur doit rester à l'état zéro pour le reste de la période. Le reste du temps  $T_0$  est attribué à un ou deux phaseur zéro de tension.

$$\begin{cases} T_s = T_1 + T_2 + T_0 + T_7 \geq 0 \\ T_s - T_1 - T_2 = T_0 + T_7 \geq 0, T_0 \geq 0, T_7 \geq 0 \\ T_0 = T_s - T_1 - T_2 \end{cases}$$

Le vecteur de tension  $\bar{U}_{1srf}$  et  $\bar{U}_{2srf}$  sont modulés comme ce qui suit :

$$\begin{cases} \bar{U}_{1srf} = \frac{T_1}{T_s} \bar{U}_1 \\ \bar{U}_{2srf} = \frac{T_2}{T_s} \bar{U}_2 \end{cases} \quad (4.16)$$

Le vecteur  $\vec{U}_{Srf}$  est calculé par :

$$\vec{U}_{Srf} = [m \cos \theta, m \sin \theta] = \frac{T_1}{T_s} \vec{U}_1 + \frac{T_2}{T_s} \vec{U}_2 \quad (4.17)$$

La détermination des périodes  $T_1$  et  $T_2$

$$\begin{cases} U_{Srf\alpha} = U_{1Srf} + x \\ U_{Srf\beta} = U_{2Srf} \cos(30^\circ) \\ x = U_{Srf} \frac{\cos(60^\circ)}{\sin(60^\circ)} \end{cases} \quad (4.18)$$

IV.6.1 Les temps d'application du vecteur d'état pour chaque secteur [29]:

$0^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$	$60^\circ \leq \theta \leq 120^\circ$	$120^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$
$a^* = U_{Srf\alpha} + \frac{1}{\sqrt{3}} U_{Srf\beta}$ $b^* = -U_{Srf\alpha} + \frac{3}{\sqrt{3}} U_{Srf\beta}$ $c^* = -(U_{Srf\alpha} + \frac{1}{\sqrt{3}} U_{Srf\beta})$	$a^* = 2U_{Srf\alpha}$ $b^* = \frac{2}{\sqrt{3}} U_{Srf\beta}$ $c^* = \frac{2}{\sqrt{3}} U_{Srf\beta}$	$a^* = U_{Srf\alpha} - \frac{1}{\sqrt{3}} U_{Srf\beta}$ $b^* = -(U_{Srf\alpha} - \frac{1}{\sqrt{3}} U_{Srf\beta})$ $c^* = -U_{Srf\alpha} - \frac{3}{\sqrt{3}} U_{Srf\beta}$
$180^\circ \leq \theta \leq 240^\circ$	$240^\circ \leq \theta \leq 300^\circ$	$300^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$
$a^* = U_{Srf\alpha} + \frac{1}{\sqrt{3}} U_{Srf\beta}$ $b^* = -U_{Srf\alpha} + \frac{3}{\sqrt{3}} U_{Srf\beta}$ $c^* = -(U_{Srf\alpha} + \frac{1}{\sqrt{3}} U_{Srf\beta})$	$a^* = 2U_{Srf\alpha}$ $b^* = \frac{2}{\sqrt{3}} U_{Srf\beta}$ $c^* = \frac{2}{\sqrt{3}} U_{Srf\beta}$	$a^* = U_{Srf\alpha} - \frac{1}{\sqrt{3}} U_{Srf\beta}$ $b^* = -(U_{Srf\alpha} - \frac{1}{\sqrt{3}} U_{Srf\beta})$ $c^* = -U_{Srf\alpha} - \frac{3}{\sqrt{3}} U_{Srf\beta}$

Comme montre le tableau (4,1),  $\vec{U}_{Srf}$  tension de référence, généralement représentée par son ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) composants  $U_{Srf\alpha}$  et  $U_{Srf\beta}$ , peut être approché facilement par une combinaison linéaire des deux Etats limitrophes et le zéro Etats, c'est à dire pas de fonctions trigonométriques sont tenus de calculer les cycles de fonctionnement.

Premièrement, le secteur doit être identifié a fin de déterminer l'État compétent.

Elle est réalisée, comme illustré dans la figure (4.4), par une comparaison de ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) éléments indiquant la position dans l' ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) plan.

Par exemple, si  $U_{Srf\beta}$ , tension de référence est positive, le secteur de la tension de référence est dans la moitié supérieure de la figure (4.4) (secteur S1, S2 ou S3).

Dans le cas contraire, le secteur est dans la moitié inférieure. Fractionnement du secteur Autres / identification se fait par comparaison (calcul géométrique) de  $(\alpha, \beta)$  composants. La normalisation appliquée au début élimine la dépendance du bus DC de tension de la tension de sortie.

Les ratios de droit résultant ( $a^*$ ,  $b^*$  et  $c^*$ ), tel que requis pour la génération de  $P_{WM}$  Un rapport cyclique  $a^* = 1$  indique un interrupteur fermé en permanence supérieure de la jambe premier inverseur.

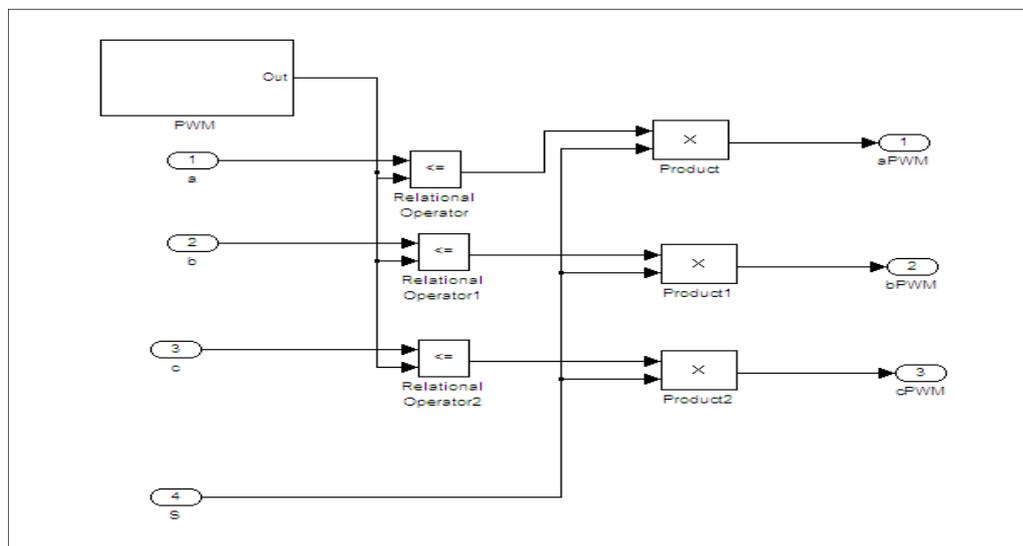
Un rapport cyclique  $a^* = 0$ , la turne-on le temps au cours de chaque période  $P_{WM}$  est également distribué à l'inférieur et supérieur de commutation et la valeur résultante moyenne de la tension  $U_{a0}$  phase est nulle.

Un rapport cyclique  $a^* = -1$ , le commutateur inférieur est constamment fermé.

#### IV.6.2 Détermination de $a_{PWM}$ , $b_{PWM}$ et $c_{PWM}$ :

Ce bloc génère des séries d'impulsions qui serviront par la suite à réaliser les signaux de commande entrant dans le modèle de l'onduleur, suite à la comparaison des signaux modulants avec une porteuse triangulaire de haute fréquence (20khz).

Sous SIMILINK ce bloc se présente sous l'aspect suivant :



**Figure (4.5).** Schéma de simulation de la PWM

Habituellement, l'algorithme présenté est facilement intégré dans le cadre de l'initialisation du programme en temps réel

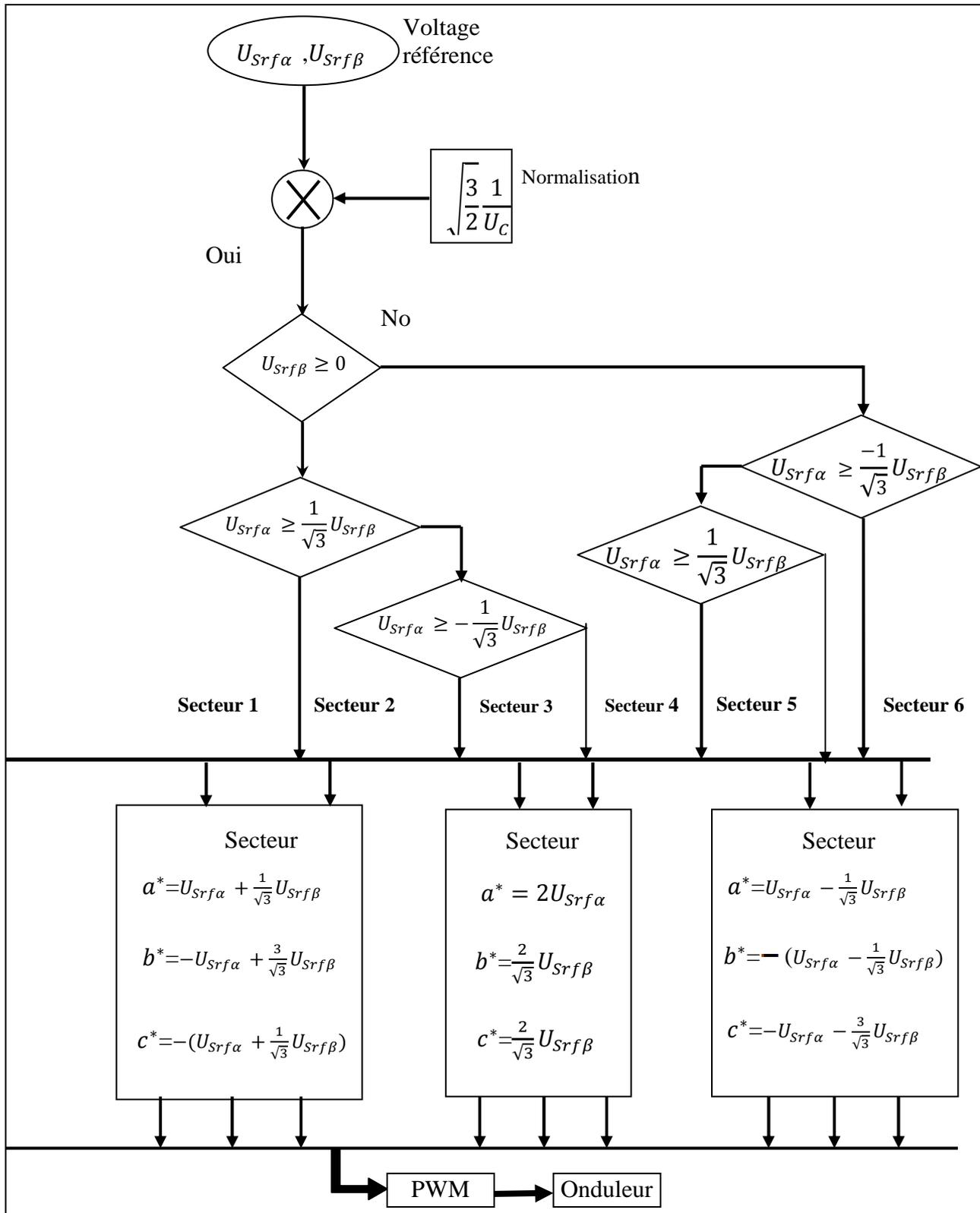
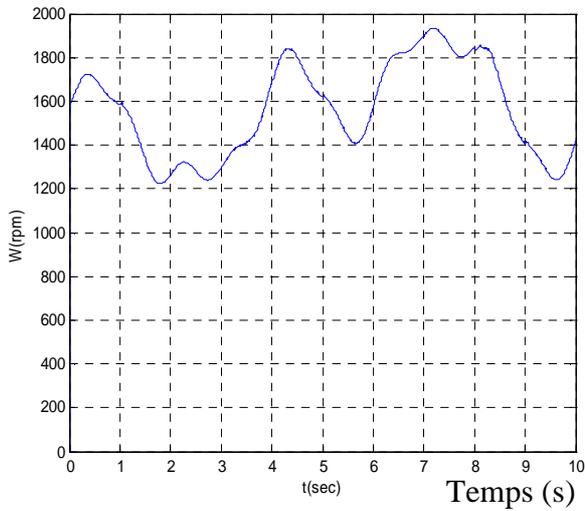


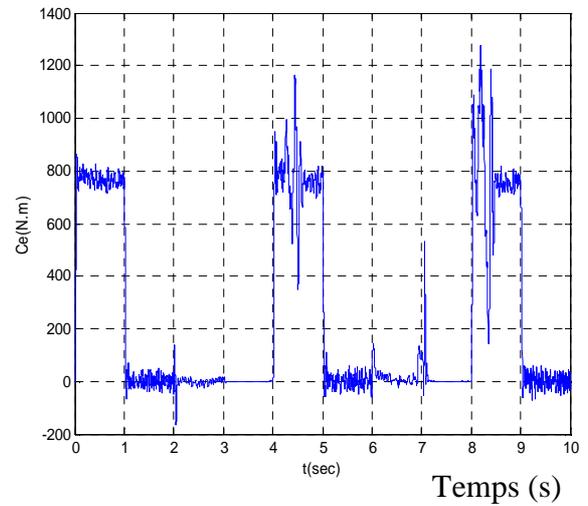
Figure (4.6). Organigramme de la SVM

### IV.7 RESULTATS DE SIMULATION

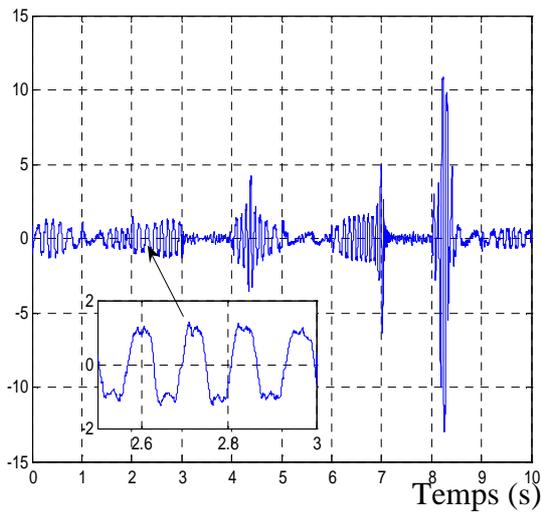
Vitesse de la turbine (tr/min)



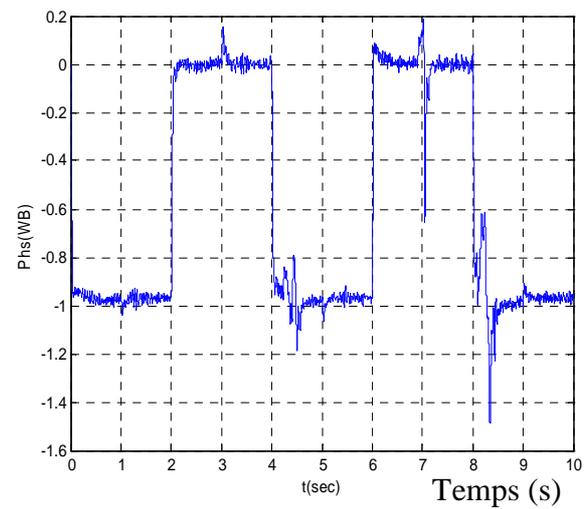
Couple électromagnétique (N.m)



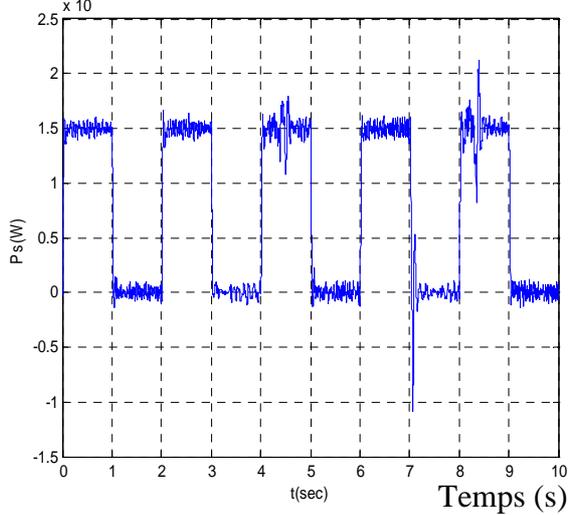
Allure des signaux modulant



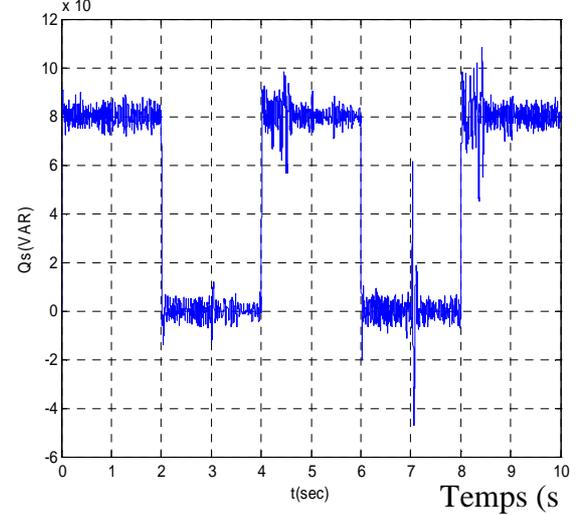
flux satorique (wb)



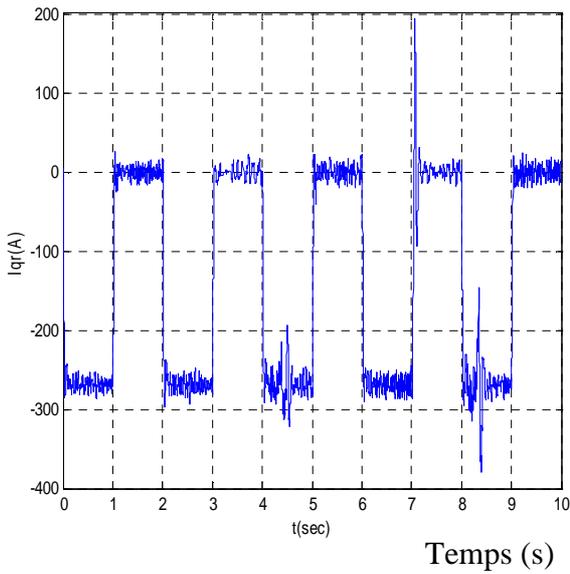
Puissance active P (w)



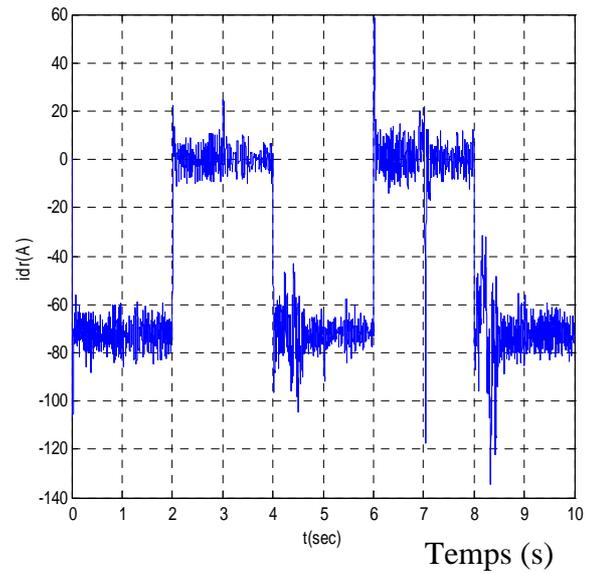
Puissance réactive Q (VAR)



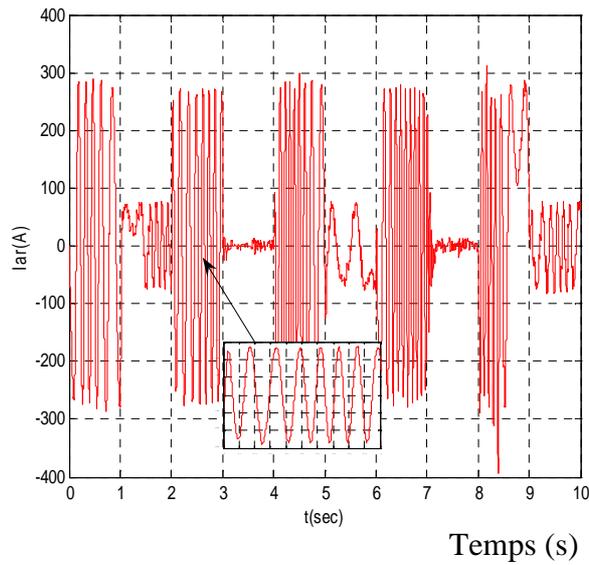
Courant rotorique  $I_{rd}$ (A)



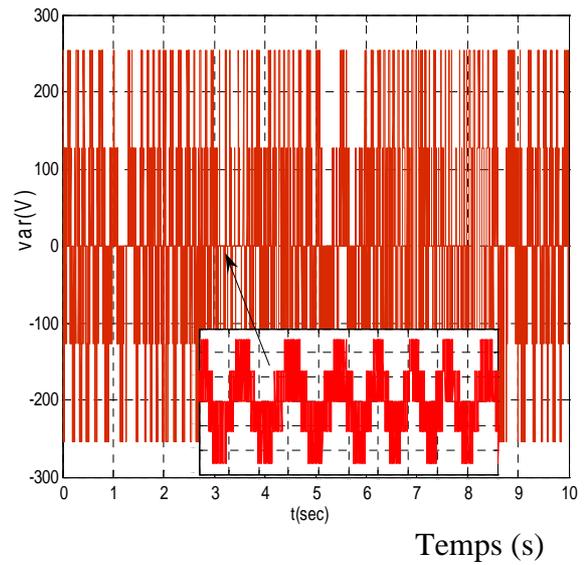
Courant rotorique  $I_{rq}$  (A)



Courant rotorique  $I_{ra}$  (A)



Tension rotorique  $V_{ra}$  (V)



**Interprétation des Résultats :**

Les résultats de simulation de notre système (turbine +GADA+ convertisseur SVPWM) et à l'aide la technique de commande SVM montre des variations aux niveaux des (puissances et le courants, le couple et le flux) qui due où fréquence de notre onduleur (20khz).

**Conclusion**

Dans ce chapitre, une représentation est donnée de la modélisation de turbine ainsi que la GADA qui est connecté au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur MLI, et avec le développement de la modulation de largeur d'impulsion (MLI) a apporté une plus grande souplesse dans le contrôle des convertisseurs. Parmi les variantes de la MLI, la plus en vue ces derniers temps et essentiellement dans la conduite de notre machines asynchrone double alimentation, est bien la technique dite modulation vectorielle (*Space Vector Modulation*).

## **Conclusion générale**

Dans ce travail nous avons présenté la machine asynchrone double alimentée comme étant une solution originale dans les applications de génération de l'énergie électrique, notamment l'énergie éolienne.

Ce type de machine peut fonctionner dans un mode peu particulier dans les deux quadrants (en moteur ou en génératrice), de plus cette dernière (GADA) offre une large gamme opérationnelle en vitesse (hypo synchronisme ou hyper synchronisme).

Dans ce contexte, un modèle de la turbine éolienne a été établi dans le but d'appliquer une technique de commande (MPPT) au niveau de la turbine pour extraire le maximum de puissance puis connaître le modèle de la génératrice asynchrone double alimenté faisant appel à un dispositif d'électronique et de commande vectorielle .

- ❖ En premier lieu nous avons présenté une étude concernant l'énergie renouvelable et après un bref historique sur l'utilisation de l'éolienne des notions principales sur les aérogénérateurs ont été données.
- ❖ En deuxième lieu nous avons décrit de façon explicite les différents éléments constitutifs de la turbine ainsi que le mode de régulation de la vitesse de rotation, enfin nous avons établi un modèle mathématique de la turbine à partir de ses équations caractéristiques. Les résultats de simulation ont montré que les variations de vitesse mécanique de la turbine sont adaptées aux variations de vitesse de la référence.
- ❖ En troisième lieu, un modèle de la machine étudié a été élaboré en utilisant la transformation de Park. Une commande vectorielle est utilisée afin de contrôler indépendamment l'échange de puissance active et réactive entre la machine et le réseau. L'association de la commande vectorielle à un régulateur de vitesse de type PI classique a montré une bonne performance.
- ❖ En quatrième lieu nous avons expliqué comment utiliser la commande MLI (modulation à largeur d'impulsion) de type SVM à l'aide de l'environnement logiciel Matlab, et cela dans le cadre du contrôle d'une machine synchrone. Ainsi, la majeure partie des éoliennes modernes industrielles est constituée de génératrice asynchrone à double alimentation car elle apporte non seulement des solutions à la variation incessantes du vent, mais aussi permet un transfert optimal de la puissance au réseau. Dans cette partie Nous avons appliqué la technique de la modulation vectorielle SVM pour minimiser les ondulations de tensions et de courant.

## Transformation de CLARK et CONCORDIA

### B-1 Transformation de Clark

Utilisant une matrice de passage a coefficients réels, mademoiselle E.CLARK

A introduit les composants symétriques.

La matrice de passage  $C^{-1}$  et son inverse  $C$  sont données par :

$$C^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad \text{B1-1}$$

$$\text{AVEC: } [X_{abc}] = C^{-1} [X_{O\alpha\beta}] \quad \text{B-1-2}$$

$$\text{ET } [X_{O\alpha\beta}] = C [X_{abc}] \quad \text{B-1-3}$$

$$[X_{abc}] = [X_a X_b X_c]^T \quad \text{Et } [X_{O\alpha\beta}] = [X_o X_\alpha X_\beta]^T \quad \text{B-1-4}$$

$[X_{abc}]$  Sont les grandeurs réelles d'un système triphasé, tandis que  $[X_{O\alpha\beta}]$  Sont les grandeurs issues de la transformation de CLARK

### B-2 Transformation de CONCORDIA

La matrice de CLARK n'est pas orthogonale. Pour obtenir l'invariance de la puissance instantanée, Ch CONCORDIA a divisé par sa norme chaque vecteur colonne. La matrice de passage ainsi modifiée pour être orthogonale s'écrit:

$$C1^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & \sqrt{2} & 0 \\ 1 & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad C1 = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \sqrt{2} & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad \text{B-1-5}$$

## Passage CLARK-PARK et CONCORDIA-PARK MODIFIEE

### C-1 Passage CLARK-PARK

Pour un écart angulaire  $\theta_c = 0$ , la matrice de PARK s'écrit:

$$\rho(\theta_c) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad \text{C-1-1}$$

Soit la matrice  $\rho(\theta_c)$  définie par:

$$\rho(\theta_c) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_c & \sin \theta_c \\ 0 & -\sin \theta_c & \cos \theta_c \end{bmatrix} \quad \text{C-1-2}$$

On a  $P(\theta_c) = \rho(\theta_c)P(0)$

Des expressions (B-1-1) et (C-1-1), on voit que:

$$C = P(0)$$

Des expressions (I-33), (C-1-3) et (C-1-4), on peut écrire:

$$[X_{Ouv}] = \rho(\theta_c)[X_{O\alpha\beta}] \quad \text{C-1-4}$$

Des expressions (C-1-3) et (C-1-4) on a:

$$P(\theta_c) = \rho(\theta_c)C$$

Donc, partant des grandeurs réelles, C donne les composantes de CLARK, que

$\rho(\theta_c)$  Transforme en composantes de PARK

De l'expression (C-1-5), il vient:

$$\begin{bmatrix} X_U \\ X_V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_c & \sin \theta_c \\ -\sin \theta_c & \cos \theta_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} \quad \text{C-1-5}$$

Soit encore:

$$\text{Rot}(\theta_c) = \begin{bmatrix} \cos \theta_c & \sin \theta_c \\ -\sin \theta_c & \cos \theta_c \end{bmatrix}$$

On aura donc:

$$\text{Rot}^{-1}(\theta_c) = \begin{bmatrix} \cos \theta_c & -\sin \theta_c \\ \sin \theta_c & \cos \theta_c \end{bmatrix}$$

Notons que cette matrice  $\text{Rot}(\theta_c)$  a un intérêt particulier dans la commande de la MAS Car elle permet le passage de CLARK a PARK et inversement.

De (C-1-4), on peut conclure que la transformation de CLARK est un cas particulier de la transformation de PARK. Elle est obtenue en annulant l'écart angulaire  $\theta_c$ , donc en faisant coïncider l'axe d'observation U avec l'axe d'une phase de l'une des armatures, ce qui correspond à l'axe  $\alpha$ .

## **C-2 Passage CONCORDIA-PARK MODIFIÉE**

En procédant de la même manière que dans (C-1), on arrive aux expressions suivantes :

$$P_1(\theta_c) = \rho(\theta_c)P_1(0) \quad \text{C-2-1}$$

$$C_1 = P_1(0) \quad \text{C-2-2}$$

$$P_1(\theta_c) = \rho(\theta_c)C_1 \quad \text{C-2-3}$$

$$[X_{uv}] = \text{Rot}(\theta_c)[X_{\alpha\beta}] \quad \text{C-2-4}$$

Partant des grandeurs réelles,  $C_1$  donne les composantes de CONCORDIA que  $\rho(\theta_c)$  transforme en composantes de la transformation de PARK MODIFIÉE.

La transformation de CONCORDIA est un cas particulier de la transformation modifiée de PARK, elle est obtenue pour  $\theta_c = 0$ .

Ces conclusions étaient prévisibles du moment que la transformation de CONCORDIA n'est autre que la transformation modifiée de CLARK.

---

---

## Détermination du correcteur

Contrôle de la vitesse la régulation de la vitesse donne lieu a un couple accélération qui va être un couple de référence.

La figure (1) représente de schéma fonctionnel du contrôle de la vitesse

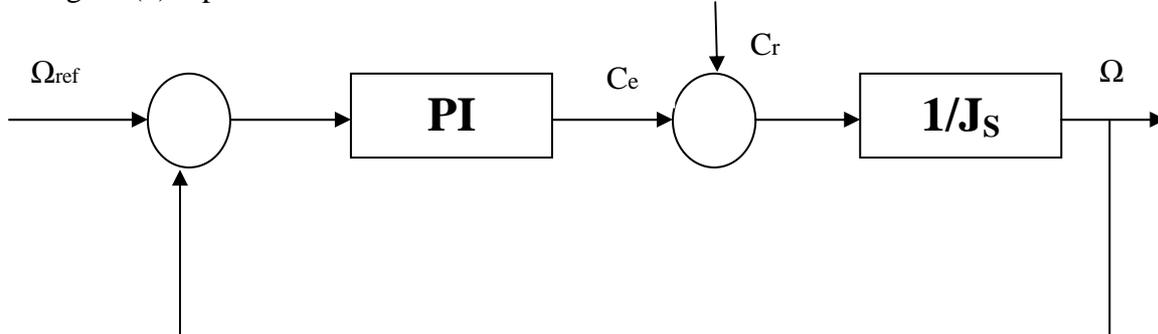


Figure (1) schéma fonctionnel du contrôle de la vitesse

le coefficient de frottement  $f$  est nul. Dans ce cas le correcteur utilisé est du type PI

la fonction de transfert du régulation PI est donné par:

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s}$$

Pour  $C_r=0$  effet de la perturbation négligé), la FTBO du processus régulé est

$$T(s) = \frac{T_\Omega(s)}{1+T_\Omega(s)} = \frac{1+\tau s}{\frac{J}{K_i} s^2 + \frac{K_p}{K_i} s + 1}$$

Avec

$$\frac{K_p}{K_i} = \tau$$

Le système de régulation de la vitesse est du second ordre

Et la fonction transfert du système du second ordre est:

$$F_\Omega(s) = \frac{1}{\tau_n^2 s^2 + 2\varepsilon\tau_n s + 1}$$

Où

$\varepsilon$ : est le facteur d'amortissement

$\tau_n$ : est la constant de temps

Par identification, on a

$$K_i = \frac{j}{\tau_n^2}$$

$$K_p = \frac{2\varepsilon j}{\tau_n}$$

**Paramètre de simulation**

Les paramètres mécaniques de la turbine éolienne de 1.5MW basée sur une machine asynchrone à double alimentation :

**Paramètre de la machine :**

$R_s=0.012$  (Résistance statorique)  
 $R_r=0.021$  (Résistance rotorique)  
 $l_s=2.0372e-4$  (Inductance de fuite statorique)  
 $l_r=1.7507e-4$  (Inductance de fuite rotorique)  
 $M=0.0135$  (Mutuelle inductance)  
 $L_s=l_s+(M)$  (Inductance statorique)  
 $L_r=l_r+(M)$  (Inductance rotorique)  
 $p=2$  (Nombre de paires de pôles)  
 $T_s=L_s/R_s$  (constante de temps statorique)  
 $T_r=L_r/R_r$  (Constante de temps rotorique)  
 $\text{segma}=1-(M^2/L_r*L_s)$ . (Coefficient de dispersion)

**Paramètre de la turbine :**

$R=35.25$  (Rayon de l'éolienne)  
 $S=\pi*(R)^2$  (surface)  
 $\rho=1.22$  (densité volumique de l'air)  
 $M=90$  (Gain de multiplicateur de vitesse)  
 $J=0.1235$  (Inerté de l'arbre)  
 $f=0.0024$  (Coefficient de frottement)

---

## **BIBLIOGRAPHIE**

- [4] **Frédéric Poitiers** "étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne"-machine asynchrone à cage autonome.  
-machine asynchrone à double alimentation reliée au réseaux  
. Thèse de doctorat de l'université de Nantes le 19 décembre 2003.
- [5] **Jean-Claude Sabonnadier** "nouvelles technologies de l'énergie (1) les énergies renouvelable", livre 2001.
- [6] **Francis dubourc** "éolienne institut rural d'information IRI, ARES application de recherche sur L'énergie et la société ", livre produire son énergie 1981.
- [7] **Text lucette hoisnard** "l'éolien pour le particulier", livre 2009.
- [9] **C.benoudjit** "étude pour a conception d'un banc d'essais pour énergie Renouvelable", Mémoire magister juin 2004.
- [10] **B .Multon** "état de l'art des aérogénérateurs électriques".  
Rapport ECRIN mai 2002.
- [12] **H.comlong** "minimisation de l'impact des perturbations d'origine Éolienne dans les générations d'électricité par de aérogénérateurs à vitesse Variable".
- [13] **A .boytte** "contrôle-commande d'un générateur asynchrone a double alimentation avec Système de stockage pour la production éolienne",  
Thèse de doctorat de l'université Henri poincaré nancy 1 ,11decembre 2006.
- [14] **A. Mireki** "étude comparative de chaîne de conversion d'énergie dédiée à Une éolienne de petite puissance", thèse de doctorat de l'université nationale Polytechnique de Toulouse 2005.
- [15] **Moussa siddo abdoulaziz** "étude du générateur asynchrone pour l'utilisation dans la production de L'énergie éolienne",mémoire ingénieur école nationale *polytechnique* 2007.
- [16] **Michel wautelet** "sciences technologies et société", livre 2001
- [17] **Eyrolles** "désiré le gouriere, énergie éolienne, théorie, conception et calcul Pratique des installations", livre 1982.
- [18] **Meny ivan** "modélisation et réalisation d'une chaine de conversion éolienne petite Puissance".laboratoire d'électrotechnique de Montpellier (LEM)
- [19] **khettache laid** "étude et commande d'un système éolien a base d'une machine électrique double Alimentée", thèse magister université Batna 2007.
-

- [20] **P.bredéche et H.breuzad** "guide pour la réalisation d'une installation éolienne domestique ", Livre 1981.
- [21] **Alouani redha** "modélisation et simulation de GADA", mémoire d'ingénieur université de Batna 2004.
- [22] **H.tamrabet** "robustes se d'une contrôle vectoriel de structure minimale d'une machine asynchrone", Mémoire de magister, université de Batna 2006.
- [23] **R .abdessemed .M kadjouj** "modélisation de la machine électrique", presses de l'université de Batna 1997.
- [24] **salma el aimani** "modélisation de différentes technologies d'éolienne intégrées dans un réseau De moyenne tension", thèse doctorat de l'école centrale de Lille(ECL) cohabilité Avec l'université de science et technologie de Lille 1 (USTL).
- [25] **J.bonal .G seguier** "entraînement électrique a vitesse variable, rappels D'électrotechniques de puissance et D'automatisme les variateurs électronique de vitesse", volume 2, édition technique et documentation Paris 1998.
- [26] **J.p .caron , hautier** "modélisation et commande de la machine asynchrone", Edition techip,paris 1995.
- [27] **G .Grellet et Gclerc** "actionneurs électriques : principes, modèles, commande" deuxième tirage édition eyrolles,paris ,France ,1997.
- [28] **Tarak Nouili** "contrôle d'une moteur asynchrone par la méthode FOC", projet B07 2008/2009 Polytech clermont-ferrand.
- [29] **Y .Zenyu** "space vector PWM with TMS 320c24x/ F24 x using hard-ward and softwar determined switching patterns ", digital signal processing solution Texas instruments 1999.
- [30] **M.benaissa** "minimisation des pulsations du couple dans une commande DTC d'une machine Asynchrone", mémoire magistère en électrotechnique université batna 2007.

#### **Site internet**

- [1] [http:// www.fnh .org /francais /doc/en-ligne/énergie/dossier art 1.htm](http://www.fnh.org/francais/doc/en-ligne/énergie/dossier%20art%201.htm)
- [2] [http://www notre-plantation inf/environnement/energie.php](http://www.notre-plantation.fr/environnement/energie.php)
- [3] [http // www.edf .com/html/panorama/production/renouvelable/hydro/monde](http://www.edf.com/html/panorama/production/renouvelable/hydro/monde)
- [8] [http// technique –l'ingénieur .fr /dossier /énergie –éolienne /bm 4640](http://technique-ingenieur.fr/dossier/energie-éolienne/bm4640)
- [11] [http// www.espace –éolien fr/eolien/rotor.htm](http://www.espace-éolien.fr/eolien/rotor.htm).
-