



# MEMOIRE

Présenté à

**L'UNIVERSITÉ BATNA 2**  
**Faculté de Technologie**  
**Département d'Electrotechnique**



En vue de l'obtention du diplôme de

**MAGISTER**  
**EN ELECTROTECHNIQUE**

**Option - Machines Electriques**

*par*

**TOUAHRI ABDELOUAHEB**

Ingénieur en Electrotechnique – Université de Annaba

**APPLICATION DE LA DTC A UN AEROGENERATEUR**  
**ASYNCHROME DOUBLE ALIMENTE**

Mémoire soutenue le 30/11/2016 devant le jury :

<b>Dr-Benagguone-Said</b>	<b>Président</b>	<b>Maitre de conférences A</b>	<b>Univ. Batna 2</b>
<b>Dr-Rachid ABDESSEMED</b>	<b>Rapporteur</b>	<b>Professeur</b>	<b>Univ. Batna 2</b>
<b>Dr- Belkacem Sebti</b>	<b>Examinateur</b>	<b>Maitre de conférences A</b>	<b>Univ. Batna 2</b>
<b>Dr- Chaiba Azeddine</b>	<b>Examinateur</b>	<b>Maitre de conférences A</b>	<b>Univ. Setif</b>

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ



# REMERCIEMENTS

*Je tiens à remercier tout premièrement Allah pour la volonté, la santé et la patience, qu'il m'a donné durant toutes ces longues années.*

*En premier lieu je voudrais remercier Monsieur **ABDESSEMED Rachid**, professeur à l'université de Batna et directeur de ce mémoire pour la confiance qu'il ma accordée. Je tiens à lui exprimé ma plus profonde reconnaissance d'avoir dirigé mon travail.*

*J'adresse également mes remerciements aussi aux membres du jury **Dr-BENAGGOUNE - Said** Maitre de Conférences à l'Université de BATNA, qui a accepté d'être le président de jury pour cette mémoire.*

*Je tiens aussi à remercier **Dr-BELKACEM Sebti**, maître de conférences à l'université de Batna., qui a animé et examiné les étapes de l'élaboration de cette mémoire, qu'il trouve ici, tout mon respect et ma profonde reconnaissance.*

*Et encore je remercie vivement le **Dr-CHAIBA Azzedine** Maitre de conférences de l'Université de Sétif et L'ensemble du jury pour le temps qu'ils ont consacré à l'évaluation de mes travaux de recherche sur ce mémoire.*

*Je ne pourrais jamais manquer de remercier tous **mes enseignants**, et **mes collègues** de l'université de **BATNA et ANNABA**, désignés par leur gentillesse et leur serviabilité, à qui j'exprime ma profonde reconnaissance.*

*Mes sincères gratitudes s'adressent à ma famille pour tout ce qu'ils font pour moi.*

*Mes remerciements les plus sincères pour l'ensemble du staff du département Electrotechnique de BATNA, et aux étudiants de la promotion Magistère 2012.*

## *DEDICACE*

*Je dédie ce simple travail*

*à ma mère*

*à ma femme et mes enfants Taqwa, Rahma et Younes abdelhai*

*à mes frères et sœurs*

*à mes amis*

*à mes enseignants*

*à tout lecteur.*

**SOMMAIRE**

Remerciements	i
Dédicace	ii
Sommaire.....	iii
Liste des symboles .....	iv
Liste des figures .....	v
Liste des tableaux.....	vi
Introduction générale.....	1
<b>CHAPITRE 1</b>	
<b>ETAT DE L'ART SUR LA CONVERSION EOLIENNE</b>	
1.1 Introduction -historique.....	4
1.2 L'aérogénérateur.....	5
1.2.1 Description et principe .....	5
1.2.2 Utilisation de l'aérogénérateur.....	7
1.3 Types d'aérogénérateurs.....	10
1.3.1 Aérogénérateurs à axe vertical.....	10
1.3.2 Aérogénérateurs à axe horizontal .....	11
1.3.3 Principales composantes des éoliennes à axe horizontal.....	13
1.4 Conversion de l'énergie éolienne.....	16
1.4.1 Loi de BETZ .....	16
1.4.2 Production d'énergie mécanique.....	20
1.4.3 Utilité de la vitesse variable.....	20
1.5 Modes de régulation.....	22
1.5.1 Système à décrochage aérodynamique « <i>stall</i> » .....	23
1.5.2 Système d'orientation des pales « <i>Pitch</i> » .....	23
1.6 Conversion électromécanique.....	24

1.6.1 Systèmes de génération d'électricité à base d'aérogénérateurs.....	24
• Type 1- La machine asynchrone à cage .....	24
• Type 2- La machine asynchrone rotor bobine a résistance variable .....	25
• Type 3- La machine asynchrone rotor bobine avec convertisseur réversible.....	25
• Type 4- La machine synchrone.....	25
1.6.2 Aérogénérateurs destinées a la production de l'électricité.....	26
1.6.2.1 Eolienne a base de la machine asynchrone à cage.....	26
1.6.2.2 Eolienne a base de la machine asynchrone à rotor bobiné + résistance rotorique additionnelle.....	27
1.6.2.3 Eolienne à base de la Machine asynchrone la machine asynchrone MADA avec convertisseur réversible au rotor (back to back)	28
1.6.2.4 Eoliennes à base la machine synchrone MS ou MSAP.....	
1.7 Choix d'un site éolien .....	30
Distribution de Weibull.....	30
1.8 Modélisation du vent .....	35
Conclusion.....	37

## **CHAPITRE 2**

### **MODELISATION ET STRATEGIE DE CONTROLE DE LA TURBINE EOLLIENNE**

2.1. Introduction .....	38
2.2. Modélisation de la turbine éolienne.....	39
2.2.1 Modélisation de la turbine.....	39
2.2.2 Modèle du multiplicateur de vitesse.....	41
2.2.3 Modélisation de l'arbre mécanique.....	42
2.3.1 Caractéristique puissance vitesse d'une éolienne de grande puissance.....	43
2.3.2 Système de contrôle de l'aérogénérateur .....	45
2.3.3 Méthodes de recherche du point maximum de puissance MPPT.....	46

2.3.3.1 MPPT avec la connaissance de la courbe caractéristique de la turbine éolienne.....	48
2.3.3.2 Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse .....	48
2.3.3.3 Conception du correcteur de vitesse.....	50
a) - PI à avance de phase .....	50
b) - PI avec anticipation.....	52
2.3.3.4 Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse.....	53
Simulation et résultats.....	56
Conclusion .....	60
 <b>CHAPITRE 3</b>	
<b>MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION</b>	
3.1 introduction .....	62
3.2 Régime permanent de la machine asynchrone double alimentée .....	65
3.3 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation.....	74
3.3.1 Hypothèses simplificatrices .....	75
3.3.2 Equations électriques et l'équation mécanique de la MADA .....	75
• Equations électriques .....	75
• Equations magnétique.....	76
3.3.3 Application de la transformation de Park .....	77
3.4 Choix du référentiel .....	78
3.4.1 Référentiel lié au stator.....	78
3.4.2 Référentiel lié au rotor .....	78
3.4.3 Référentiel lie au champ stator.....	78
3.4.4 Mise sous forme d'équation d'état .....	80
Débit sur charge résistive .....	82
Interprétation des résultats.....	88
Conclusion .....	88

---

## **CHAPITRE 4**

### **APPLICATION DU CONTROLE DTC A LA MACHINE**

### **ASYNCHRONNE DOUBLE ALIMENTEE**

### **MODE GENERATEUR - HYPOSYNCHRONNE**

4.1. Introduction .....	89
4.1.1. Modélisation de l'onduleur.....	90
4.1.2. Modélisation du redresseur .....	93
4.2 Principe de la commande directe de couple DTC .....	96
4.2.1 introduction.....	96
4.2.2 Principe du DTC.....	97
4.2.3 Fonctionnement et séquences d'un onduleur de tension triphasé .....	97
4.3 Contrôle de flux statorique et du couple électromagnétique.....	100
4.3.1. Principe de contrôle de flux statorique .....	100
4.3.2. Principe de contrôle du couple électromagnétique .....	102
4.3.3 Choix du vecteur de tension .....	103
4.3.4. Estimateur.....	105
4.3.4.1. Estimation du flux statorique .....	105
4.3.4.2. Estimation du couple électromagnétique .....	106
4.4 Elaboration du vecteur de commande .....	106
4.4.1 Le correcteur de flux .....	106
4.4.2. Le correcteur de couple .....	107
4.4.2.1. Le correcteur à trois niveaux .....	108
4.4.2.2. Le correcteur à deux niveaux .....	108
4.5. Elaboration de la table de commande .....	108
4.6. Contrôle direct de couple appliqué à la MADA Mode générateur.....	109



Partie simulation .....	111
Résultats de simulation .....	112
Conclusion .....	118
Conclusion générale .....	119
Annexes .....	121
Bibliographie.....	122

## Abréviations

MADA	Machine asynchrone à double alimentation
GADA	Generateur asynchrone à double alimentation
DFIM	Double fed induction machine
DFAM	Double fed asynchronous machine
DFIG	Doubly fed induction generator
MAS	Machine asynchrone à rotor à cage
JGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
MLI	Modulation de largeur d'impulsion
FOC	Field oriented control- Commande vectorielle à flux orienté
DTC	Direct torque control – Contrôle directe de couple
DPC	Direct Power control – Contrôle directe de la puissance
SMC	Sliding mode control-Contrôle par mode de glissement

## Liste des symboles

$V_1$	Vitesse du vent en amont de l'aérogénérateur
$V_2$	Vitesse du vent en aval de l'aérogénérateur
$V_n$	Vitesse du vent nominale de l'aérogénérateur
$V$	Vitesse du vent
$S_1$	Section en amont du disque d'air
$S_2$	Section en aval du disque d'air
$F$	Force de vent appliqué sur la pale
$\rho$	Masse volumique de l'air
$R$	Longueur de la pale
$P_{aer}$	Puissance aérodynamique de l'air
$E_c$	Energie cinétique du vent
$C_p$	Coefficient de puissance de la turbine
$C_{p \max}$	Coefficient de puissance maximal de la turbine
$\lambda$	Vitesse relative de la turbine TSR (tip speed ratio)
$\lambda_{opt}$	Vitesse relative maximale de la turbine
$\Omega_{tur}$	Vitesse de rotation de la turbine
$\Omega_{mec}$	Vitesse de rotation de l'arbre générateur
$\Omega_{opt}$	Vitesse de rotation optimale de l'arbre générateur
$G$	Gain du multiplicateur
$f(V)$	Densité de probabilité de Weibull
$V$	Variable vent
$k$	Coefficient
$c$	Coefficient
$A_i, \omega_i, \varphi_i$	Amplitude, pulsation d'une harmonique d'ordre $i$ composant le vent

---

$P_{aer}$	Puissance aérodynamique produite par un vent de vitesse $V$
$T_{aer}$ ou $C_{aer}$	Couple aérodynamique produit par un vent de vitesse $V$
$T_g$ ou $C_g$	Couple générateur
$T_{em}$ ou $C_{em}$	Couple électromagnétique
$T_{mec}$ ou $C_m$	Couple mécanique
$T_f$	Couple de frottement
$T_{em\ ref}$	Couple de référence
$f$	Coefficient de frottement
$K_{ass}$	Régulateur
$a_0$ et $a_1$	Coefficients de régulateur
$\tau$	Constante de temps du régulateur
$F(s)$	Fonction de transfert
$P(s)$	Fonction de transfert
$T(s)$	Fonction de transfert
$\omega_n$	Pulsation naturel du régulateur
$\xi$	Coefficient d'amortissement
$b_0$ et $b_1$	Coefficients de régulateur
$T_{aer\_est}$	Couple estimé
$V_{est}$	Vitesse estimé
$\Omega_{tur\_estimé}$	Vitesse de rotation estimée
$C_{p\_opt}$	Coefficient de puissance optimal
$n_s$	Vitesse synchrone des champs magnétique
$f_s$	Fréquence de synchronisme 50Hz
$p$	Nombre de paires de pôles de la machine
$P_{mec}$	Puissance mécanique
$P_s$	Puissance active du stator
$P_r$	Puissance active du rotor
$\Delta P_{joule\_s}$	Perte cuivre du stator
$\Delta P_{joule\_r}$	Perte cuivre du rotor
$\omega_s$	Pulsation statorique
$\omega_r$	Pulsation
$\omega_m$	Pulsation mécanique du rotor
$\theta$	Angle
$\theta_r$	Angle
$\theta_s$	Angle
$P$	Puissance active
$Q$	Puissance réactive
$\varphi_s$	Flux statorique
$\varphi_r$	Flux rotorique
$I_s$	Courant statorique
$I_r$	Courant rotorique
$V_s$	Tension simple d'une phase statorique
$V_r$	Tension simple d'une phase rotorique
$v_{as}, v_{bs}, v_{cs}$	Composantes triphasées de la tension statorique
$i_{as}, i_{bs}, i_{cs}$	Composantes triphasées du courant statorique

---

$v_{ar}, v_{br}, v_{cr}$	Composantes triphasées de la tension rotorique
$i_{ar}, i_{br}, i_{cr}$	Composantes triphasées du courant rotorique
$[M_{sr}]$	Matrice de mutuelles inductances stator- rotor
$[L_s]$	Matrice Inductance propre stator
$[L_r]$	Matrice propre rotor
$[R_s]$	Matrice résistance stator
$[R_r]$	Matrice résistance rotor
$[L_{ss}]$	Matrice mutuelles inductances stator- stator
$[L_{rr}]$	Matrice mutuelles inductances rotor-rotor
$M$	Mutuelle inductance
$L_s$	Inductance propre d'une phase stator
$L_r$	inductance propre d'une phase rotor
$P(\theta)$	Matrice directe de Park
$P(\theta)^{-1}$	Matrice inverse de Park
$\omega_{coord}$	Vitesse de rotation des axes du repère (d,q)
$V_{ds}, V_{qs}$	Composantes directe et quadrature de la tension statorique
$V_{dr}, V_{qr}$	Composantes directe et quadrature de la tension rotorique
$\varphi_{ds}, \varphi_{qs}$	Composantes directe et quadrature du flux statorique
$\varphi_{dr}, \varphi_{qr}$	Composantes directe et quadrature du flux rotorique
$I_{ds}, I_{qs}$	Composantes directe et quadrature du courant statorique
$I_{dr}, I_{qr}$	Composantes directe et quadrature du courant rotorique
$T_1, T_2$ et $T_3$	Interrupteurs du bras supérieur du convertisseur redresseur (onduleur)
$T'_1, T'_2$ et $T'_3$	Interrupteurs du bras inférieur du convertisseur redresseur (onduleur)
$S_a, S_b, S_c$	Fonction de commutation du convertisseur redresseur (onduleur)
$V_{res}$	Tension de réseau
$v_{an}, v_{bn}, v_{cn}$	Tension simples d'un réseau triphasé
$R$	Résistance d'une branche de liaison du convertisseur redresseur
$L$	Inductance d'une branche de liaison du convertisseur redresseur
$C$	Capacité de filtrage de la tension dressée
$R_{ch}$	Résistance de charge d'un redresseur
$U_c$	Tension dressée à la sortie du redresseur
$E$	Tension continue du générateur
$r$	Resistance ligne
$l$	Inductance ligne
$T_{ref}$ ou $C_{ref}$	Couple de référence
$\varphi_{ref}$	Flux de référence
$V_s$	Tension efficace d'un réseau triphasé
$ \psi_s $	Module du flux statorique
$\angle(\psi_s)$	Angle du flux statorique
$ \psi_r $	Module du flux rotorique
$\gamma_{rs}$	Angle entre le flux stator et rotor

**Figures du - Chapitre 1**

- Figure 1.1 Correspondance taille-puissance des éoliennes.
- Figure 1.2 Principe de l'aérogénérateur.
- Figure 1.3 Chaîne utilisation de l'aérogénérateur.
- Figure 1.4 Utilisation de l'aérogénérateur
- Figure 1.5 Parc éolien onshore - Parc éolien offshore
- Figure 1.6 Les éoliennes à axe vertical.
- Figure 1.7 Différents configuration éoliennes à axe vertical
- Figure 1.8 Aérogénérateur à axe horizontal à trois pales
- Figure 1.9 Constituants de l'éolienne à axe horizontal
- Figure 1.10 Composantes intérieures de la nacelle d'une turbine éolienne.
- Figure 1.11 Eolienne Nordex N60 - 1300 kW
- Figure 1.12 Tube de courant d'air autour d'une éolienne
- Figure 1.13 Coefficient de puissance pour  $\beta=2^\circ$  pour éolienne 1.5 MW.
- Figure 1.14 Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes.
- Figure 1.15a Coefficient de puissance  $C_p$  pour éolienne 1.5 MW
- Figure 1.15b Caractéristique de puissance en fonction de la vitesse du vent. 1.5 MW.
- Figure 1.16 Flux d'air sur un profil de pale à décrochage " stall ".
- Figure 1.17 Flux d'air sur un profil de pale " pitch" variation de Beta.
- Figure 1.18 Combinaison de systèmes " stall "+" Pitch "+. Grosses machines MW.
- Figure 1.19a Système à base de la machine asynchrone à rotor en court-circuit.
- Figure 1.19b Système à base de la machine asynchrone à rotor bobine et résistance additionnelle
- Figure 1.19c Système à base de machine asynchrone à rotor bobine avec convertisseur réversible au rotor.
- Figure 1.19d Système à base la machine synchrone.
- Figure 1.20 Carte vent de l'algerie à 10m du sol
- Figure 1.21 Distribution de Weibull site ADRAR
- Figure 1.22 Distribution de Weibull site In Salah
- Figure 1.23 Distribution de Weibull site Tiaret
- Figure 1.24 Comparaison des sites ADRAR - IN SALAH - ADRAR
- Figure 1.25 Profil de vent pour un temps sur 10s.
- Figure 1.26 Profil de vent, pour un temps de 100s

**Figures du - Chapitre 2**

- Figure 2.1a Aérogénérateur à base de la GADA
- Figure 2.1b Schéma de la turbine éolienne (aérogénérateur)
- Figure 2.2 Modèle de la turbine
- Figure 2.3 Coefficient de puissance  $C_p$  en fonction  $\lambda$ , et  $\beta$ .
- Figure 2.4 Modélisation du Multiplicateur
- Figure 2.5 Modélisation de l'arbre générateur
- Figure 2.6 Schéma bloc du modèle de la turbine
- Figure 2.7 Caractéristique puissance vitesse d'une éolienne de grande puissance 1.5MW
- Figure 2.8 Puissance en MPPT en fonction de la vitesse de vent. Zone II
- Figure 2.9 Caractéristique de l'éolienne dans le plan, vitesse de rotation.
- Figure 2.10 Schéma bloc de la MPPT avec asservissement de vitesse
- Figure 2.11 Schéma bloc du correcteur PI à avance de phase
- Figure 2.12 Schéma de la boucle du correcteur PI à avance de phase
- Figure 2.13 Schéma bloc du correcteur PI avec anticipation
- Figure 2.14 Schéma bloc de la MPPT sans asservissement de la vitesse.
- Figure 2.15 Profil de vent utilisé
- Figure 2.16 Vitesse de la turbine en rd/s
- Figure 2.17 Vitesse de la turbine en tr/min
- Figure 2.18 Couple aérien
- Figure 2.19 Puissance aérodynamique de la turbine
- Figure 2.20 Couple d'entraînement du générateur
- Figure 2.21 Vitesse d'entraînement du générateur

**Figures du - Chapitre 3**

- Figure 3.1 Vue éclatée de la MADA
- Figure 3.2 Flux de puissance active de la MADA
- Figure 3.3 Bilan de puissance mode moteur de la MADA
- Figure 3.4 Mode moteur a vitesse hypersynchrone.
- Figure 3.5 Diagramme vectoriel de la DFIM en mode 1 référentiel ramené au rotor
- Figure 3.6 Mode générateur a vitesse hypersynchrone
- Figure 3.7 Diagramme vectoriel de la DFIM en mode 2 référentiel ramené au rotor
- Figure 3.8 Mode Générateur a vitesse hyposynchrone.
- Figure 3.9 Diagramme vectoriel de la DFIM en mode 3 référentiel ramené au rotor
- Figure 3.10 Mode moteur a vitesse hyposynchrone.
- Figure 3.11 Diagramme vectoriel de la DFIM en mode 4 référentiel ramené au rotor
- Figure 3.12 Représentation de la MADA dans les deux repères
- Figure 3.13 Schéma des enroulements avec la transformation de Park
- Figure 3.14 Choix de repères
- Figure 3.15 Modèle de machine dans le repère UV
- Figure 3.16 La tension simple et composée au stator de la GADA
- Figure 3.17 Les tensions stator et rotor de la GADA
- Figure 3.18 Les courants de la GADA

**Figures du - Chapitre 4**

- Figure 4.1 Convertisseur monté au rotor de la GADA.
- Figure 4.2a Onduleur à MLI.
- Figure 4.2b Schéma bloc de l'onduleur
- Figure 4.3a Schéma du redresseur à MLI
- Figure 4.3b Schéma bloc du redresseur
- Figure 4.4 Principe du DTC Machine asynchrone onduleur de tension
- Figure 4.5 Séquence de fonctionnement d'un onduleur de tension à deux niveaux.
- Figure 4.6 Etat pour  $V_3$  actif
- Figure 4.7 Onduleur à deux niveaux les huit vecteurs de tension possibles.
- Figure 4.8 Evolution de l'extrémité du vecteur  $\varphi_s$
- Figure 4.9 Répartition des zones secteurs
- Figure 4.10 Choix du vecteur de tension dans le cas du secteur  $n=1$
- Figure 4.11 Sélection de tensions correspondantes au contrôle de flux
- Figure 4.12 Correcteur à bande d'hysteresis de flux et de couple.
- Figure 4.13 Commande directe du couple DTC appliquée à la DFIM
- Figure 4.14 Trajectoire de flux rotor
- Figure 4.15 Variation sinusoïdale du flux rotor
- Figure 4.16 Variation du flux rotor en fonction du temps
- Figure 4.17 ZOOM flux rotor
- Figure 4.18 Le couple
- Figure 4.19 La puissance produite au stator
- Figure 4.20 La puissance produite ZOOM
- Figure 4.21 courant au stator
- Figure 4.22 Courant au stator à 3000Nm
- Figure 4.23 Courant au stator à 8000Nm
- Figure 4.24 Courant rotor





## Liste des tableaux

### Chapitre 1

**Tableau 1.1** Coefficients de Weibull pour les sites Adrar Ain Salah et Tiaret-Algérie.

### Chapitre 4

**Tableau 4.1** Evolution des grandeurs flux et couple en fonction du vecteur de tension  $V_s$  appliquée.

**Tableau 4.2** Table de commutation pour le contrôle DTC.

## *Introduction générale*

La croissance de la population mondiale a engendré une très grande demande en énergie et en particulier l'énergie électrique, de ce fait les producteurs et fournisseurs se sont dirigés vers d'autres ressources plus économiques émergentes comme les énergies renouvelables et dont l'énergie éolienne est un segment prometteur pour le futur ; de plus le développement de la technologie des aérogénérateurs a permis à celle-ci de devenir une alternative aux sources traditionnelles.

Cet intérêt dans l'utilisation des énergies renouvelables ne cesse d'augmenter, car l'être humain est de plus en plus concerné par les problèmes environnementaux et les gouvernements sont devenus très stricts sur ce point.

Les énergies renouvelables n'ont pas encore connu à l'heure actuelle le développement qui permettrait leur exploitation à grande échelle. L'éolien constitue un atout majeur qui pourra être valorisé pour faire de l'Algérie un fournisseur en énergie électrique dans le futur vu le gisement en énergies renouvelables dont dispose le pays.

En plus des stations à énergie solaire installées au sud algérien, il faut noter que la première ferme éolienne était installée à la wilaya d'Adrar d'une puissance de 10 MW, l'énergie produite par cette ferme est injectée dans le réseau d'électricité de la Wilaya d'Adrar [29].

L'énergie éolienne est véhiculée par les vents, ceux-ci sont dus indirectement à l'énergie solaire qui, en créant des différences de température entre les régions chaudes et les régions froides, provoque des vents.

Le vent est une source présente sur tout le globe, propre et inépuisable, qui peut produire de l'électricité pratiquement sans l'émission des gaz polluants.

Le choix de régions venteuses pour implanter ces fermes éoliennes sont soumises à des études de cas par cas, utilisant des distributions de Raleigh ou de Weibull pour localiser ces gisements de vents et les valoriser économiquement pour implanter des parcs éoliens.

Ce mémoire traite la modélisation d'un aérogénérateur à base de machine asynchrone double à alimentation MADA débitant sa puissance produite dans un réseau électrique stable, en mode générateur.

La modélisation des différents constituants de la turbine et de son système d'asservissement dans la zone MPPT pour en extraire une puissance maximale pour un variable ; avec le contrôle directe de couple DTC de cette machine en mode générateur pour réaliser son raccordement au réseau électrique équilibre.

- Ce mémoire utilise les paramètres aérodynamiques et électriques de la turbine de l'éolienne 1.5 MW de l'annexe A et tous les résultats et les courbes ont été obtenues d'après les données de la machine utilisée dans les références. [15][28][29]

Ce travail est fractionné et organisé en quatre chapitres comme suit :

- **Le chapitre un** : traite de l'état de l'art sur la conversion éolienne par la description du principe de la conversion d'énergie à base de vent ; des techniques pour capter le vent et optimiser le rendement des aérogénérateurs. Ainsi que des technologies utilisées pour réaliser cette conversion en énergie électrique.
- **Le chapitre deux** : traite la modélisation de la turbine éolienne et son contrôle en se basant sur les techniques d'optimisation des maximums de puissance dite MPPT (Maximum Power Point Tracking) pour bien exploiter les vents variables et optimiser la production de l'énergie électrique.

- **Le chapitre trois** : traite la modélisation de la DFAM dans un référentiel de PARK en utilisant la méthode analytique d'analyse et déduction des modèles de cette machine en vue d'apprécier ces caractéristiques en mode générateur en régime dynamique et en régime permanent.

Un bref des différents modes de fonctionnement de la MADA, est présenté et une simulation avec débit sur charge résistive est réalisé.

- **Le chapitre quatre** : traite de la commande par le contrôle directe du couple DTC de la GADA en mode générateur hyposynchrone et l'analyse des résultats.

Finalement, le mémoire est clôturé par une conclusion générale.

))) )) ) ----- ( (( (((

# **CHAPITRE 1**

## **Etat de l'art sur la conversion de l'énergie éolienne**

### **1.1. Introduction -historique**

L'énergie éolienne était déjà exploitée depuis l'antiquité avec l'utilisation des moulins à vent et des navires à voiles [15] [23] [36] [28] [30].

Cependant, elle connaît depuis environ 40 ans un essor sans précédent notamment avec le développement de l'électronique de puissance.

En effet, après l'an 2000, et avec l'explosion de la demande mondiale en électricité et les prises de conscience environnementale, ont accentué le besoin de l'énergie propre et durable ou l'éolien a émergé et occupe une place privilégiée.

Fort de son potentiel mondial, celui-ci a ainsi attiré différents acteurs du monde économique et surtout les producteurs et distributeurs de l'énergie électrique.

Ceci s'est traduit par une profonde réorganisation et mutation du marché de l'éolien pour lequel les aérogénérateurs ont atteint une certaine maturité technique.

Ces aérogénérateurs, généralement à axe horizontal, fonctionnant à vitesse variable, permettant l'augmentation et l'optimisation de la puissance produite.

Le développement des convertisseurs statiques qui a suivi le développement des aérogénérateurs et leur commande a permis le contrôle des puissances produites par ces aérogénérateurs de plus en plus importantes qui passait de quelques centaines de Watts a l'ordre des MW.

Dans ce présent chapitre, les technologies d'éoliennes ainsi que les composants constituant l'aérogénérateur seront présentés.

Ensuite, les différentes associations machines électriques-convertisseurs statiques, utilisées pour la conversion éolienne seront décrites.

Vu les avantages incontestés MADA (simplicité de construction et moins chère) pour la conversion éolienne, elle sera particulièrement présentée en détail dans le chapitre 3 et fera base de sujet de ce présent mémoire.

## 1.2. L'aérogénérateur

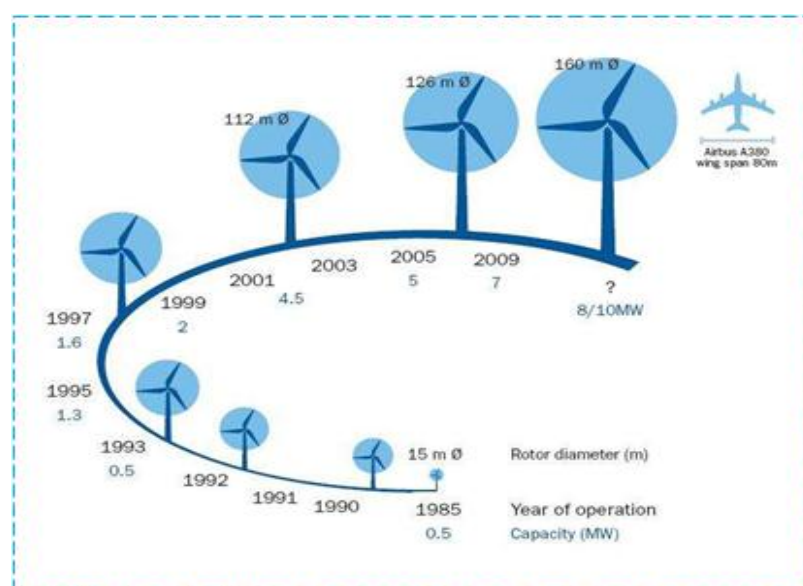
### 1.2.1 Description et principe

Un aérogénérateur, ou simplement éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'un générateur.

Selon leur puissance nominale, les éoliennes sont divisées en trois catégories. [30].

- ✓ *Eoliennes de petite puissance : inférieure à 40 kW*
- ✓ *Eoliennes de moyenne puissance : de 40 à quelques centaines de kW.*
- ✓ *Eoliennes de forte puissance : supérieure à 1 MW.*

La **Figure 1.1** illustre la correspondance taille-puissance des éoliennes en fonction du diamètre du rotor de la turbine et leurs évolutions depuis quelques années.

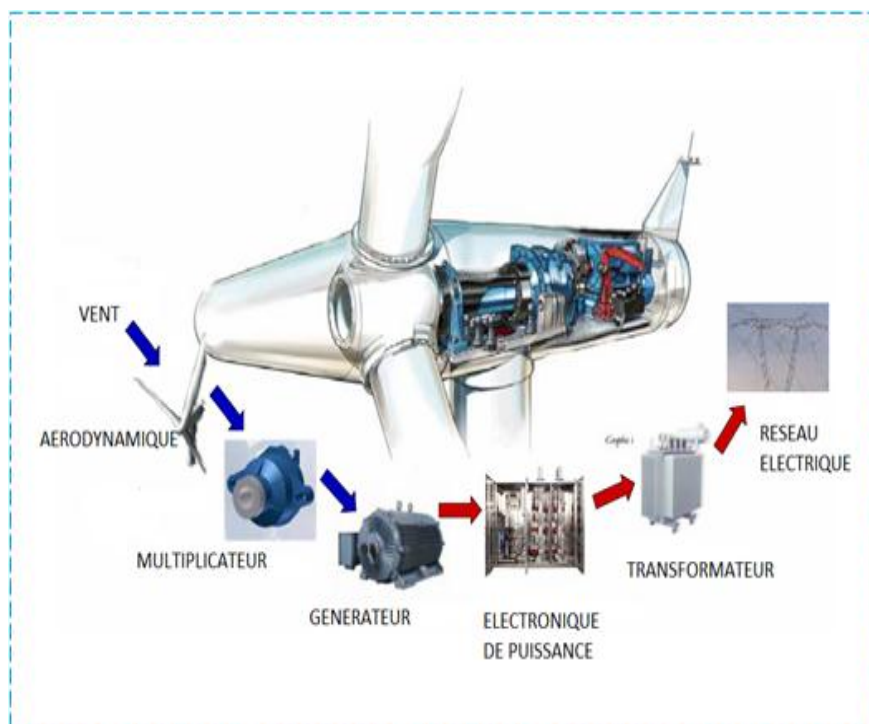


**Figure 1.1** Correspondance taille-puissance des éoliennes. [47]

La **Figure 1.2** donne le principe de base de cet aérogénérateur et les principaux constituants d'un tel système et son utilisation dans la production électrique.

Un aérogénérateur est principalement construit de :

- Système aérodynamique ou rotor.
- Multiplicateur de vitesse
- Générateur électrique
- Convertisseurs électronique de puissance
- Transformateurs
- Liaison réseau électrique



**Figure 1.2** Principe de l'aérogénérateur [3]

L'énergie cinétique du vent captée par les pales du rotor qui tournent à une vitesse réduite, l'énergie mécanique récupérée est transformée par un multiplicateur à engrenage en une vitesse et couple d'entraînement pour le générateur, un bloc convertisseurs et control d'électronique de puissance ajuste la forme de l'énergie



électrique produite par le générateur pour être utilisé dans réseau électrique à travers un transformateur.

### 1.2.2 Utilisation de l'aérogénérateur

Diverses chaînes de productions coexistent pour la production d'électricité par aérogénérateurs et sont de différentes technologies, fonctionnent à vitesse fixe (ou peu variable) ou à vitesse variable.

Elles peuvent être très différentes selon que l'on est en forte ou en petite puissance.

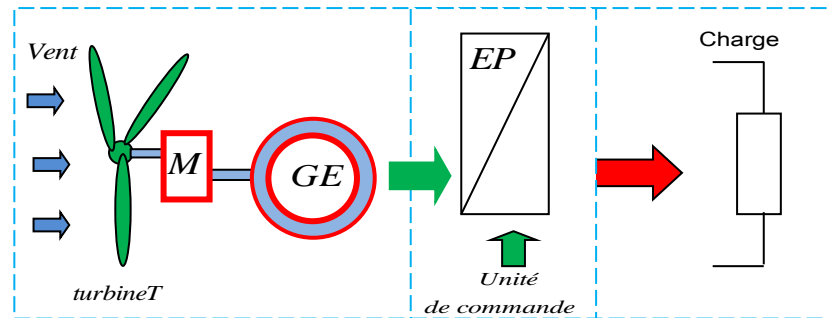
On peut, par exemple, classer ces solutions par leur fonctionnement couplé ou non au réseau avec différents modes de couplage au réseau avec ou sans convertisseurs électronique de plus on peut les classer aussi par le type de générateurs électriques utilisés.

Les installations utilisant l'énergie éolienne comportent classiquement cinq parties:

- **une turbine éolienne** avec ses annexes mécaniques (régulation, sécurité, réduction), qui, lorsqu'elle est exposée à un vent de vitesse  $V$ , tourne à la vitesse  $n$  et fournit sur son arbre un couple moteur pour le générateur électrique.
- **un générateur électrique** qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique alternative.
- **une charge** qui reçoit cette énergie électrique.  
Cela peut être une résistance (chauffage électrique), un organe de stockage d'énergie, un moteur, une pompe, un réseau de distribution d'énergie électrique.
- **un convertisseur** placé entre le générateur électrique et la charge et qui adapte la forme de l'énergie électrique fournie par le générateur à ce qu'exige la charge.
- **un système de commande et de régulation** qui assure la conversion optimale en régime stationnaire et éventuellement en régime dynamique.

La chaîne de conversion de l'énergie éolienne est présentée à la **Figure 1.3** où :

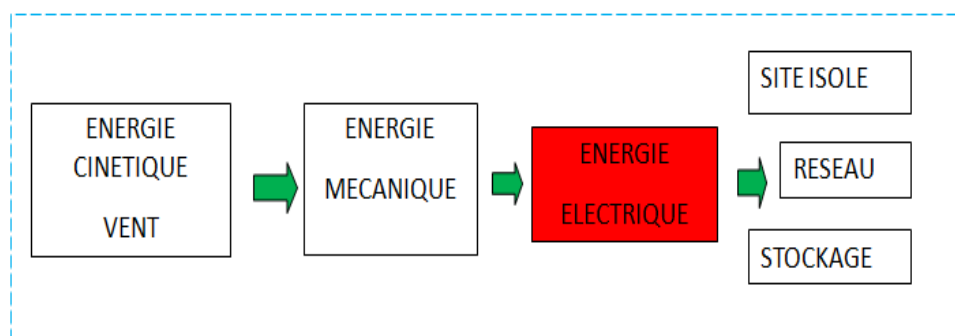
- T est la turbine.
- M est le multiplicateur de vitesse.
- GE le générateur électrique.
- EP, le circuit d'électronique de puissance.



**Figure 1.3** Chaîne d'utilisation de l'aérogénérateur. [48]

Plusieurs solutions pour les consommateurs raccordés à un système éolien sont envisageables pour les alimenter en électricité quelques situations sont citées :

1. Eolienne autonome, sans sources alternatives et sans systèmes de stockage.
2. Eolienne autonome, sans sources alternatives et avec systèmes de stockage.
3. Eolienne utilisée en site isolé, avec sources alternatives et systèmes de stockage.
4. Le cas des aérogénérateurs de grande puissance qui débitent dans un réseau énergétique national.
5. Le cas d'un aérogénérateur qui alimente un utilisateur, la source alternative étant le réseau de puissance infinie (panneaux solaires, réseau et le diesel). **Figure 1.4**



**Figure 1.4** utilisation de l'aérogénérateur. [48]

On peut distinguer deux familles de systèmes de génération d'énergie éolienne :

- Les sites isolés où l'énergie est produite et consommée sur place ou à proximité de l'éolienne.
- les systèmes connectés à un réseau national dans ce cas on parle d'un parc éolien.

Exemple de Parc éolien **Figure 1.5**

Toutes ces situations décrites utilisent des aérogénérateurs de diverses constructions afin d'optimiser le captage du vent et son transformation en énergie électrique.



**Figure 1.5** Parc éolien onshore - Parc éolien offshore (en mer). [29]

### 1.3. Types d'aérogénérateurs

Les turbines éoliennes sont classées selon la disposition géométrique de leur arbre sur lequel est montée l'hélice qui capte l'énergie cinétique du vent, en deux grandes familles :

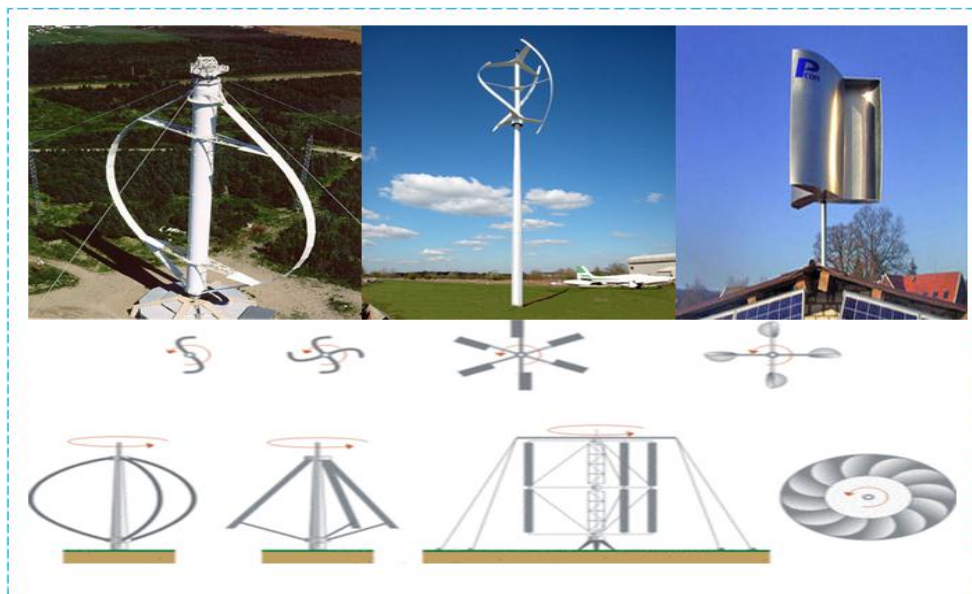
- les éoliennes à axe vertical
- les éoliennes à axe horizontal

### 1.3.1. Aérogénérateurs à axe vertical

Les aérogénérateurs à axe vertical **Figure 1.6** ont été les premières structures utilisées pour la production de l'énergie électrique.

Ils sont classés selon leur caractéristique aérodynamique en deux familles.

- Les aérogénérateurs conçus sur la base de la portance (type rotor Darrieus).
- Les aérogénérateurs basés sur la traînée (type rotor de Savonius).



**Figure 1.6** Les éoliennes à axe vertical. [40]

Les principaux avantages des éoliennes à axe vertical sont les suivants :

- Accessibilité de la génératrice et du multiplicateur mis directement au sol, ce qui facilite la maintenance et l'entretien.
- Absence de système d'orientation du rotor car le vent peut faire tourner la structure quelque soit sa direction.

Cependant elles ont comme inconvénients les points suivants:

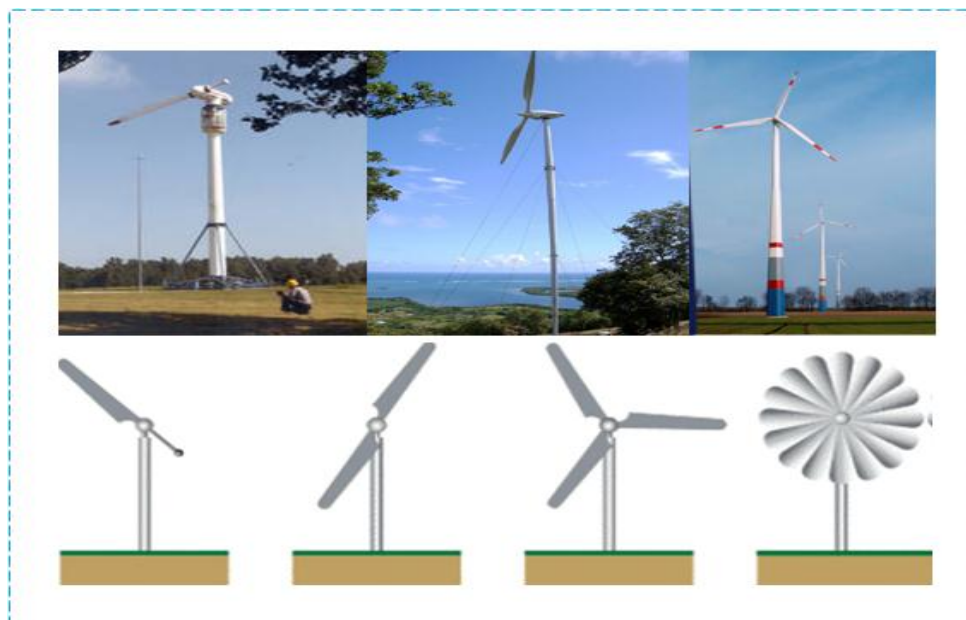
1. Faible rendement et fluctuations importantes de puissance
2. Occupation importante du terrain pour les puissances élevées
3. Faible vitesse du vent à proximité du sol.

### 1.3.2. Aérogénérateurs à axe horizontal

Les turbines à axe horizontal **Figure 1.7** sont les plus utilisées actuellement comparées à celles à axe vertical puisque elles présentent un coût moins important, en plus elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques.

Elles sont constituées de plusieurs pales pour générer un couple moteur entraînant la rotation du générateur électrique.

Le nombre de pales varie entre 1 et 3, le rotor tripale (avec 3 pales) est le plus utilisé car il présente un compromis entre le coefficient de puissance et le rendement.



**Figure 1.7** différentes configurations éoliennes de Gauche à Droite  
**Monopale – Bipale – Tripale – Multiples.** [40]

Les rotors multiples classiques sont utilisés pour les pompes à eau dans les fermes agricoles principalement.

Les turbines à axe horizontal sont généralement placées face au vent par un mécanisme d'asservissement de l'orientation ou par un phénomène d'équilibre dynamique naturel assuré par un gouvernail dans le cas d'une turbine sous le vent.

Ces éoliennes généralement utilisées pour la production d'électricité sont des éoliennes rapides à 2 ou à 3 pales.

Ces raisons là expliquent le choix de ce type d'aérogénérateur pour la production de l'électricité à grande échelle.



**Figure 1.8** Aérogénérateur à axe horizontal à trois pales [37]

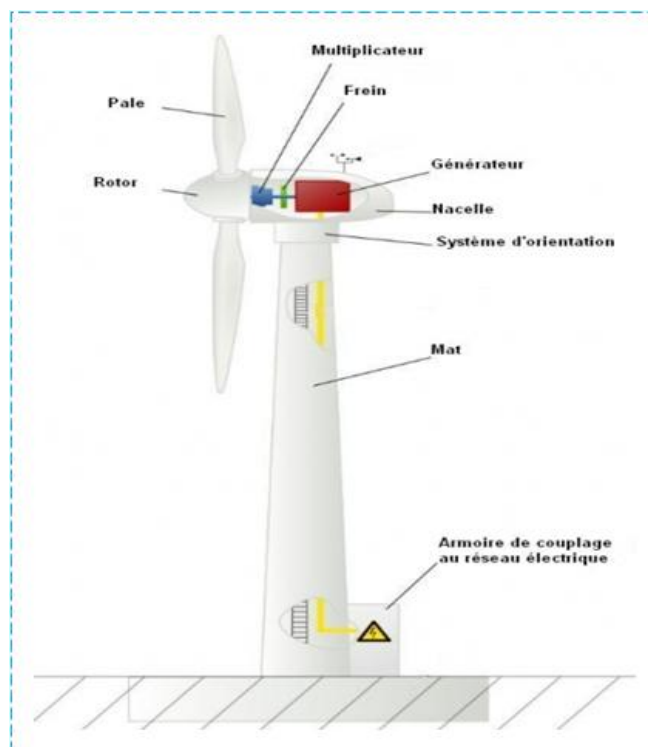
On peut noter quelques particularités, pour cet aéroturbine à axe horizontal **Figure 1.8**.

- Elles sont légères et donc moins chères.
- Elles tournent plus vite car le multiplicateur utilisé présente un rapport de multiplication moins important d'où sa légèreté et des pertes réduites.
- Le couple nécessaire pour la mise en route de ce type d'aérogénérateur est très faible et donc un fonctionnement à faible vitesse de vent.
- Meilleur rendement aérodynamique.
- Durée de vie de l'ordre de 20 ans.

### 1.3.3 Principales composantes des aérogénérateurs à axe horizontal.

En générale, l'éolienne à axe horizontale est constituée de trois éléments principaux, elle est représentée sur **Figure 1.9**.

- **La tour** (mat),
- **La nacelle**,
- **Les pales** qui sont supportées par le moyeu.



**Figure 1.9** – Principales composantes de l'éolienne à axe horizontal [40]

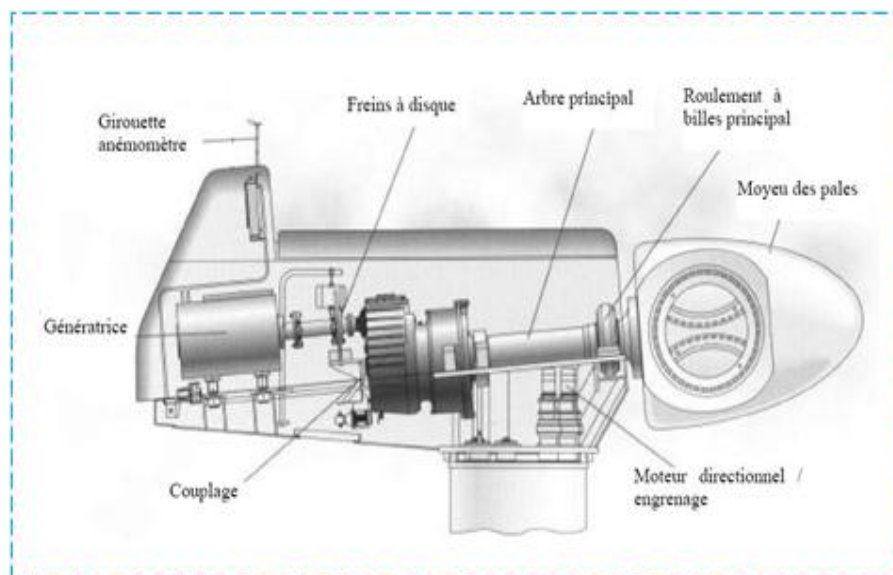
- **La tour :** C'est un élément porteur, généralement un tube en acier ou un treillis métallique. Avec l'augmentation des puissances nominales des éoliennes, le mat devient de plus en plus haut pour éviter les perturbations près du sol mais aussi permettre l'utilisation de pales plus longues.

La tour a une forme conique ou cylindrique, à l'intérieur sont disposés les câbles de transport de l'énergie électrique, les éléments de contrôle, l'appareillage de connexion au réseau de distribution et l'échelle d'accès à la nacelle.

- **La nacelle :** Elle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler la turbine éolienne à la génératrice électrique. **Figure 1.10**

Elle comprend les éléments suivants :

- Arbre.
- Multiplicateur.
- Roulements.
- Le frein à disque qui permet l'arrêt le système cas de surcharge.
- Le générateur qui est dans le cas de ce mémoire une MADA.
- Les systèmes d'orientation des pales (régulation de la vitesse= pitch control) et de la nacelle pour la positionner face au vent.

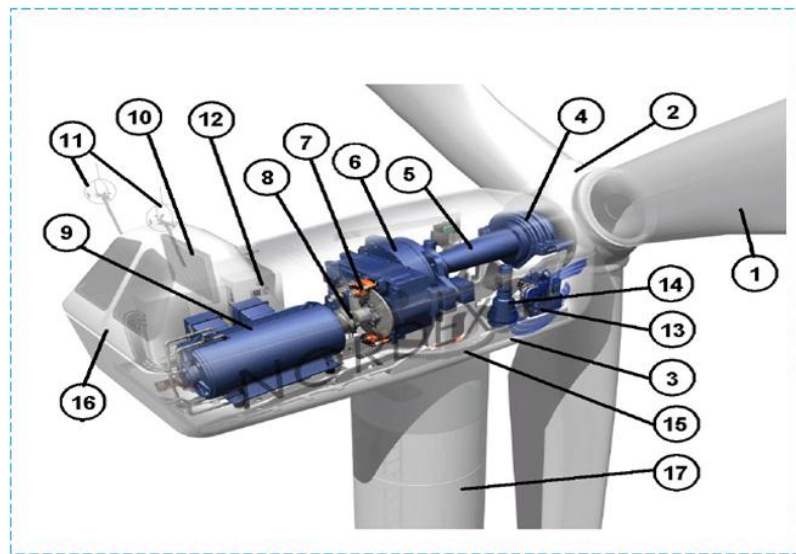


**Figure 1.10** Composantes intérieures de la nacelle d'une turbine éolienne [36]

- **Les pales :** Elles permettent de capter la puissance du vent et la transférer au rotor. Leur nombre est de trois pales dans la plupart des aérogénérateurs, car ce nombre constitue un compromis entre les performances de la machine et des raisons de stabilité.
- **Le moyeu :** C'est l'élément qui supporte les pales. Il doit être capable de résister à des à-coups violents surtout lors du démarrage de l'aérogénérateur ou lors de brusques changements de vitesse de vent.



A titre d'exemple un bref détail est donné en **Figure 1.11** des différents équipements constituant l'éolienne de grande puissance de type NORDEX N-60 de 1.3MW.



**Figure 1.11** Aérogénérateur Nordex N60 - 1300 kW. [29]

1. **Pales** en composite fibres de verre, profil de type stall  
(Décrochage aérodynamique) freins aérodynamiques d'extrémité, pivotants.
2. **Moyeu** du rotor en fonte.
3. **Structure de la turbine** en fonte ductile ou en acier soude galvanisé à chaud.
4. **Paliers** du rotor à double rangée de billes.
5. **Arbre lent** du rotor en acier haute résistance.
6. **Multiplicateur** de vitesse à trois étages (un train épicycloïdal et deux trains Parallèles).
7. **Frein à disque** sur l'arbre rapide avec témoin d'usure.
8. **Accouplement** avec la génératrice de type flexible.
9. **Génératrice électrique** (800/2000 kW) asynchrone refroidie à l'eau.
10. **Radiateur de refroidissement** intégré au système multiplicateur –génératrice.
11. **Système de mesure du vent** (anémomètre et girouette) transmet les signaux au système de contrôle de la turbine.
12. **Système de contrôle** surveille et pilote la turbine.

13. **Système hydraulique** pour les freins d'extrémité de pales et le système d'orientation.
14. **Entrainement d'orientation** de la tourelle à deux trains d'engrenages planétaires entrainés par des moteurs alimentés à fréquence variable.
15. **Paliers du système d'orientation** équipés d'un frein à disque.
16. **Capot** de la nacelle en structure acier recouverte de composite fibre de verre.
17. **La Tour** en acier tubulaire (plusieurs hauteurs possibles).

#### **1.4 -Conversion de l'énergie éolienne.**

L'aérogénérateur transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique de rotation, cette énergie mécanique est alors utilisée pour faire tourner un générateur électrique et produire de l'électricité.

Pour l'emploi efficace de cette ressource (le vent) il est indispensable d'étudier les caractéristiques aérodynamiques de la turbine utilisée et le vent lui-même.

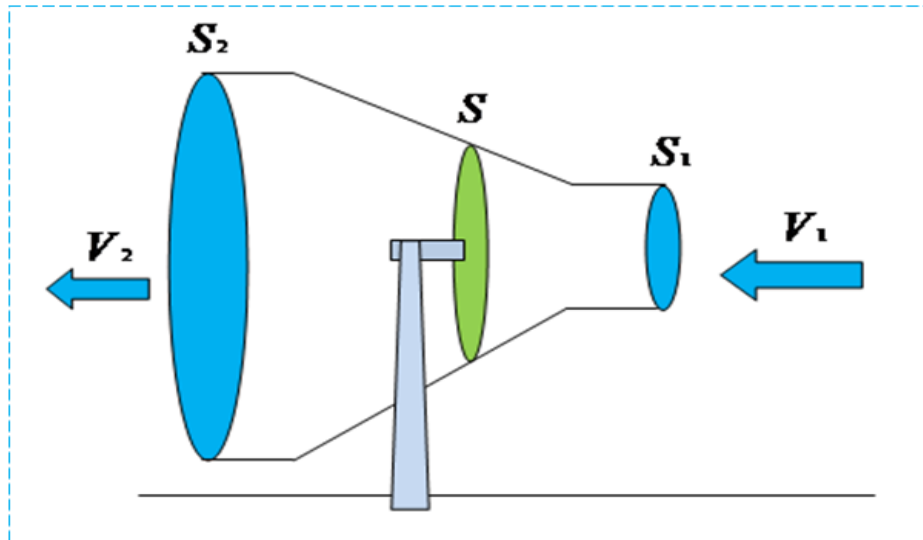
##### **1.4.1- Loi de BETZ**

###### **Rendement de l'aérogénérateur**

La théorie du moteur éolien à axe horizontal a été établie au début du siècle dernier par le savant allemand W- BETZ.

Il suppose que « le moteur éolien est placé dans un vent animé à l'infini amont d'une vitesse  $V_1$  et à l'infini aval d'une vitesse  $V_2$  ».

Pour expliquer la théorie de BETZ, considérant l'éolienne à axe horizontal représenté sur la **Figure 1.12** sur laquelle on a représenté la vitesse du vent  $V_1$  en amont de l'aérogénérateur et la vitesse  $V_2$  en aval.



**Figure 1.12** Tube de courant d'air autour d'une éolienne.[15]

Si  $V$  est la vitesse de l'air traversant l'aérogénérateur, et  $S_1$  et  $S_2$  les sections amont et aval du tube d'air et  $S$  la surface balayée par l'hélice.

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

$$S_1 V_1 = S V = S_2 V_2 \quad (1.1)$$

La force exercée par l'air sur l'aérogénérateur d'après le théorème d'EULER :

$$F = \rho \cdot S V \cdot (V_1 - V_2) \quad (1.2)$$

D'où la puissance absorbée par l'aérogénérateur:

$$P_{aero} = F \cdot V = \rho \cdot S V \cdot (V_1 - V_2) \cdot V \quad (1.3)$$

La puissance absorbée par l'aérogénérateur est aussi égale à la variation de l'énergie cinétique  $E_c$  de la masse d'air qui le traverse d'où :

$$\frac{\Delta E_c}{\Delta t} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S V \cdot (V_1^2 - V_2^2) = P_{aero} = \rho \cdot S V^2 \cdot (V_1 - V_2) \quad (1.4)$$

$$\text{On en déduit: } V = (V_1 - V_2) / 2 \quad (1.5)$$

En remplaçant l'expression de  $V$  dans 1.2 et 1.3 on obtient :

$$F = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S (V_1^2 - V_2^2) \quad (1.6)$$

$$P_{aero} = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot S (V_1^2 - V_2^2) \cdot (V_1 + V_2) \quad (1.7)$$

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface  $S$  sans diminution de vitesse, soit à la vitesse  $V_1$ , la puissance  $P_{mt}$  correspondante serait alors :

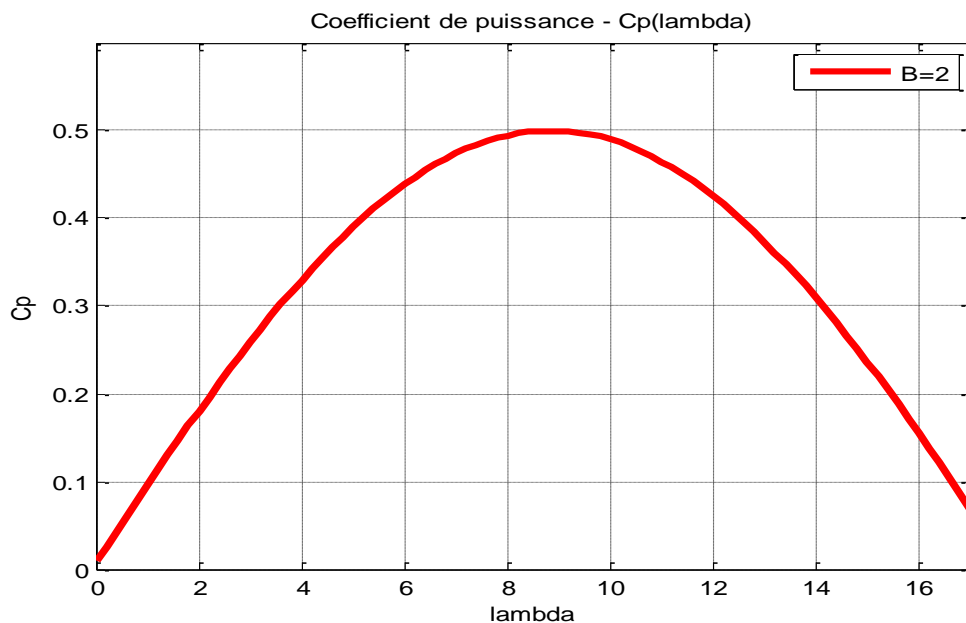
$$P_{mt} = \rho \cdot S \cdot V_1^3 / 2 \quad (1.8)$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est:

$$\frac{P_{aero}}{P_{mt}} = \frac{\left(1 + \frac{V_1}{V_2}\right) \cdot \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right)}{2} = C_p \quad (1.9)$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation (1.9), on s'aperçoit que le ratio  $\frac{P_{aero}}{P_{mt}}$  (appelé aussi coefficient de puissance  $C_p$ ) présente un maximum pour  $\frac{V_1}{V_2} = \frac{16}{27}$  qui égale à 0,59 Cette limite théorique n'est jamais atteinte.

Chaque éolienne est définie expérimentalement par son propre coefficient de puissance  $C_p$ , exprimé en fonction de la vitesse relative  $\lambda$  représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent **Figure 1.13**

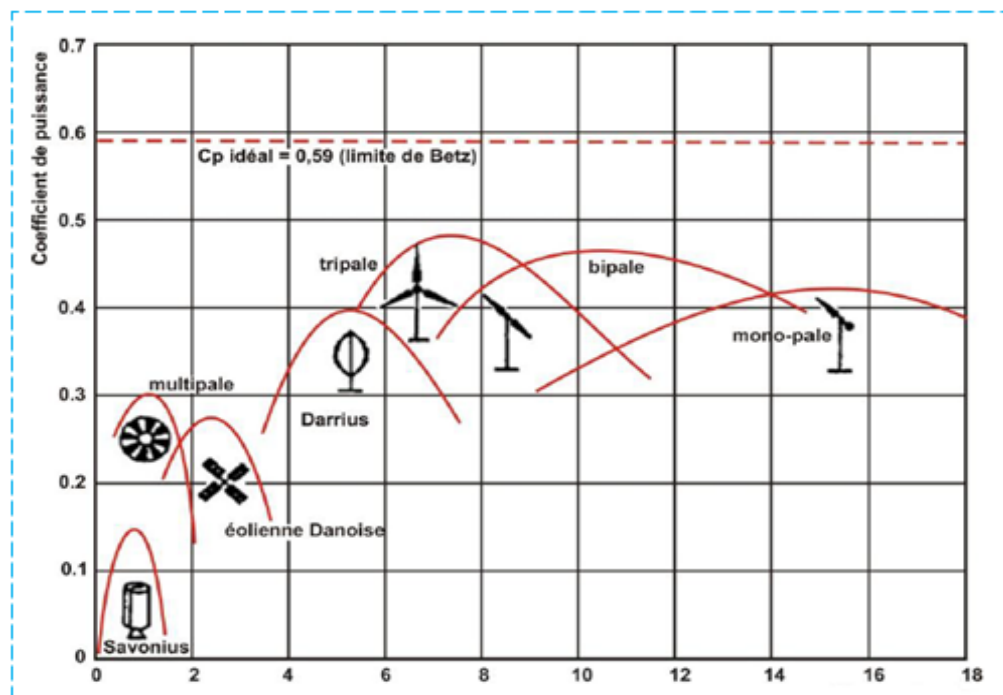


**Figure 1.13** Coefficient de puissance pour  $\beta=2^\circ$  pour éolienne 1.5 MW.

On peut noter que les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales, leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre et donc leur puissance est considérablement limitée d'où faible rendement. **Figure 1.14**

Leur coefficient de puissance **Figure 1.13** atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite.

Les éoliennes à marche rapide sont beaucoup plus répandues et sont pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique.



**Figure 1.14** Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes. [39]

Les aérogénérateurs à usage industriel, possèdent généralement entre 1 et 3 pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation.

Les pales peuvent atteindre des longueurs de (45 mètres) pour des éoliennes de plusieurs mégawatts avec des mats de plus 100 m.

Les éoliennes tripales sont les plus répandues car elles représentent un compromis entre le rendement et le coût. Ces aérogénérateurs présentent des rendements très acceptables et sont retenus par les producteurs industriels. De plus, leur coefficient de puissance

atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente, elles présentent des rendements meilleurs. **Figure 1.14**

### 1.4.2 Production d'énergie mécanique

En combinant les équations (1.8) et (1.9), la puissance mécanique  $P_{aero}$  disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi :

$$P_{aero} = \left( \frac{P_{aero}}{P_{mt}} \right) \cdot P_{mt} = C_p(\lambda) \cdot P_{mt} = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_1^3 \quad (1.10)$$

Avec :

$$\lambda = \frac{\Omega_{turbine} \cdot R}{V_1} = \frac{\Omega_{mec} \cdot R}{G \cdot V_1} \quad (1.11)$$

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

$\Omega_{mec}$  : Vitesse de rotation de l'arbre du générateur.

Cette relation permet d'établir un ensemble de caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses de vent.

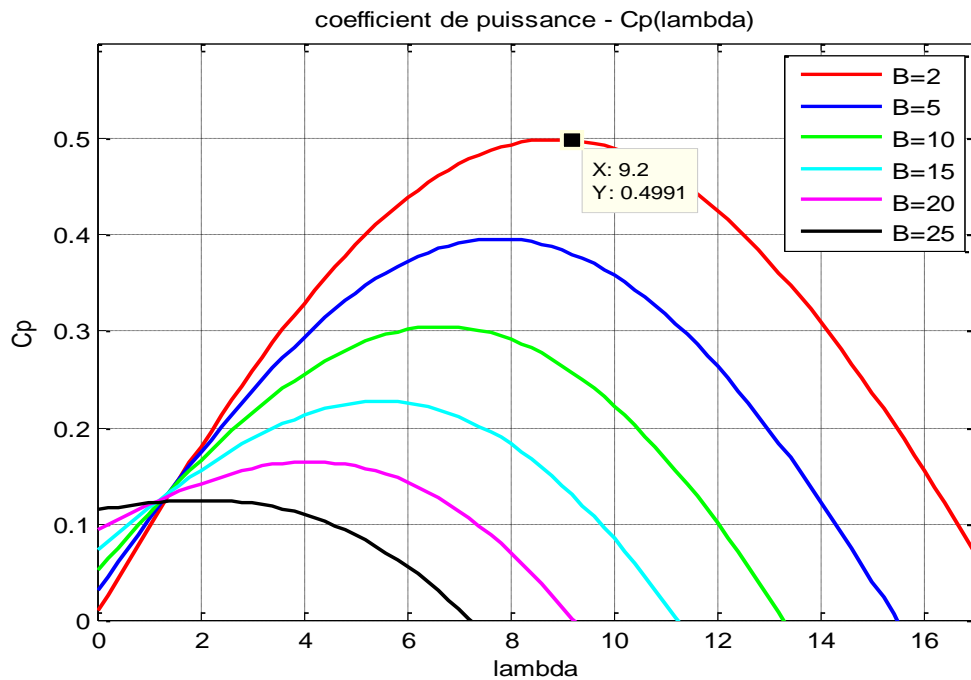
### 1.4.3 Utilité de la vitesse variable

La caractéristique générale de la puissance électrique convertie par une turbine éolienne en fonction de sa vitesse est représentée sur la **Figure 1.15**.

Pour la machine 1.5 MW et pour la vitesse du vent  $v = 4$  m/s, la turbine éolienne est amorcé et commence à produire de la puissance mécanique, d'après l'équation (1.10).

On obtient une puissance proportionnelle au cube de la vitesse du vent, cette puissance passe par un maximum, de plus cette puissance varie avec le coefficient de vitesse donné par l'équation (1.11), alors pour extraire la puissance maximale, il est nécessaire d'augmenter la vitesse de la génératrice à une vitesse  $\Omega t$ .

Ainsi en variant le ratio de vitesse  $\lambda$  et l'angle de calage  $\beta$  on obtient une famille de caractéristique pour le coefficient  $C_p$ . **Figure 1.15a**

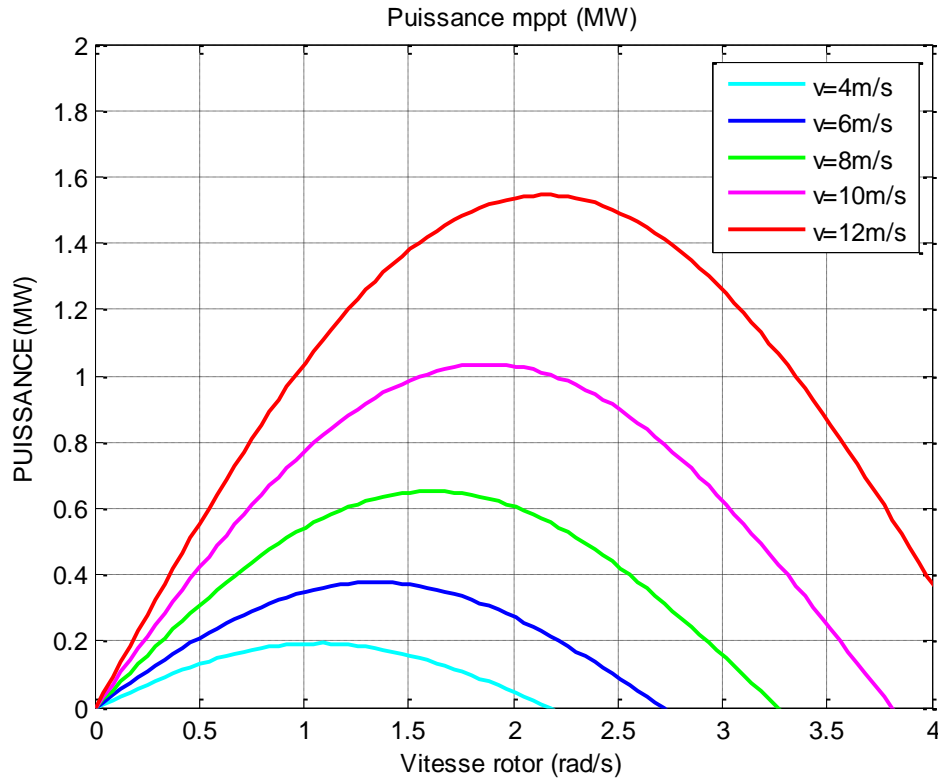


**Figure 1.15a** Coefficient  $C_p$  en fonction de  $\beta$  et  $\lambda$  éolienne 1.5 MW.

Le rapport de vitesse présente une valeur optimale pour  $V=12\text{m/s}$ , cette valeur est  $\lambda_{opt}=9.2$  dans ce cas  $C_{p\_optimal}=0.5$ .

Il faut donc rendre la vitesse mécanique variable en fonction de la vitesse du vent pour extraire le maximum de puissance, et ainsi passer chaque fois que le vent augmente à la caractéristique la plus haute, jusqu'à atteindre la vitesse nominale de la turbine qui correspond à la vitesse nominale du générateur qui correspond à  $V=12\text{ m/s}$ , si le vent diminue on passe à la caractéristique inférieure, tout en cherchant à avoir le point maximum de la courbe c'est le point de la MPPT maximum power point Tracking, avec la variation du vent on obtient une famille de courbes et que les maximums de ces courbes donnera la courbe MPPT.

En prenant des valeurs moyenne pour le vent  $v=4\text{m/s}$ ,  $v=6\text{m/s}$ ,  $v=8\text{m/s}$ ,  $v=10\text{m/s}$ ,  $v=12\text{m/s}$  on obtient points maximum de la puissance **Figure 1.15 b**.



**Figure 1.15 b** Puissance en fonction de la vitesse du vent pour l'éolienne 1.5 MW

### 1.5 Modes de régulation

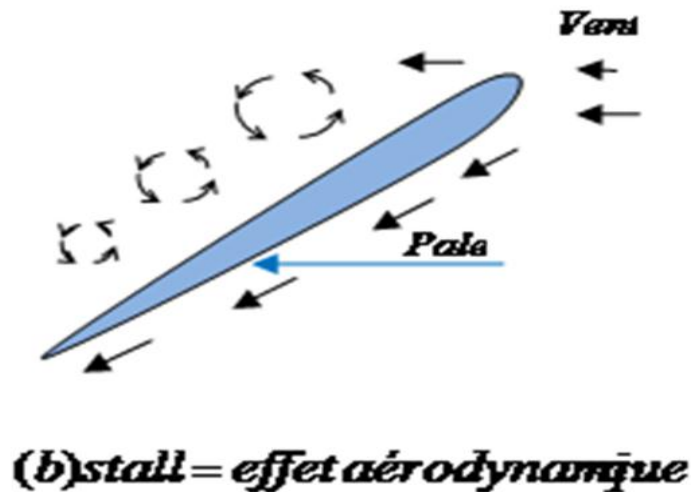
La vitesse de rotation des pales de l'aérogénérateur ne doit pas dépasser une vitesse maximale car cela pourrait endommager le dispositif de conversion. Différentes méthodes de régulation de la vitesse existent, parmi lesquelles certaines sont basées sur le principe de l'orientation des pales, d'autres sont plus simples et utilisent le principe de décrochage aérodynamique afin de réguler la vitesse. Les méthodes précédemment citées sont expliquées dans ce qui suit :

#### 1.5.1 Système à décrochage aérodynamique « *stall* »

C'est le système le plus simple et le moins coûteux car il se base sur le principe de limitation naturelle (intrinsèque à la forme de la pale) dit "stall". Il utilise le phénomène de décrochage aérodynamique. Lorsque l'angle d'incidence  $i$  devient important, c'est à dire lorsque la vitesse du vent dépasse sa valeur nominale  $V_n$ ,



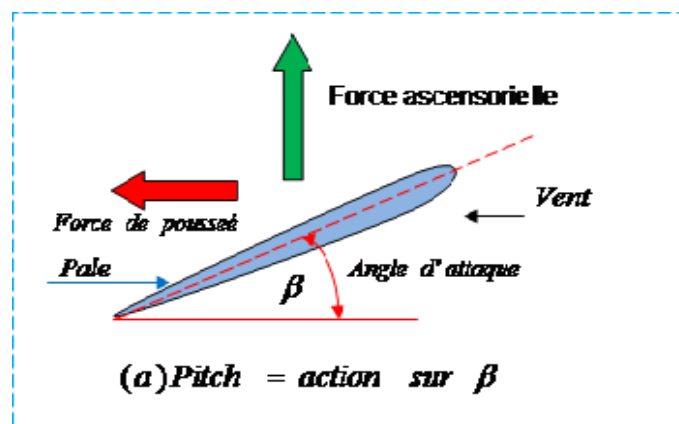
l'aspiration créée par le profil de la pale n'est plus optimale ce qui entraîne des turbulences à la surface de la pale **Figure 1.16** et par conséquent une baisse du coefficient de puissance. Ceci empêche alors une augmentation de la vitesse de rotation et les pales reçoivent moins de vent dans ce cas.



**Figure 1.16** Flux d'air sur un profil de pale à décrochage " stall ".

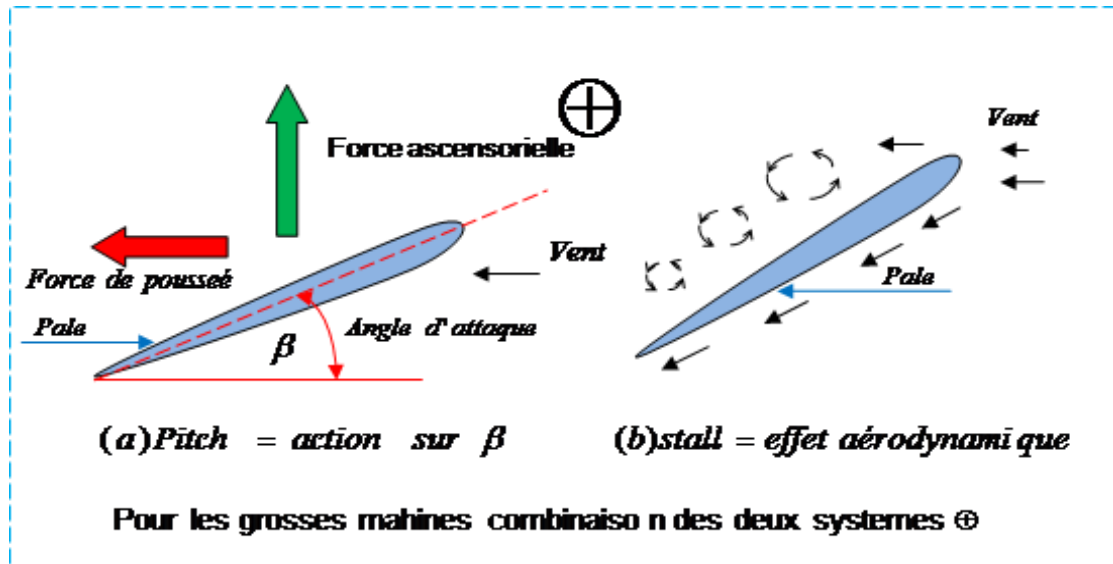
### 1.5.2 Système d'orientation des pales « Pitch »

Le système de réglage aérodynamique se base sur le principe de l'augmentation de l'angle de calage ce qui diminue la valeur du facteur de puissance **Figure 1.17** d'où une diminution du rendement de la turbine, ceci empêche l'augmentation de la vitesse de rotation de l'aérogénérateur.



**Figure 1.17** Flux d'air sur un profil de pale " pitch" variation de Beta.

La combinaison des deux méthodes de contrôle du rotor, (stall et pitch), est utilisée pour les grosses machines lorsque l'éolienne atteint sa vitesse de régime nominale avec un vent nominale  $V_n$  sans que la vitesse de vent dépasse la vitesse critique.



**Figure 1.18** Combinaison de systèmes "stall" + "Pitch". Grosses machines MW.

## 1.6 Conversion électromécanique.

La production de l'énergie éolienne se base sur le principe de la conversion de l'énergie du vent en énergie mécanique de rotation, cela se fait grâce à la turbine à axe horizontal décrite précédemment. La conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique implique une génératrice couplée mécaniquement à la turbine.

### 1.6.1 Systèmes de génération d'électricité à base d'aérogénérateurs.

Actuellement on rencontre plusieurs types de génératrices adaptées aux éoliennes à grande échelle de production dans l'ordre de quelques MW. [28]

Nous avons pu les classer suivant quatre types de générateurs utilisés :

#### Type 1- La machine asynchrone à cage.

Elle représente la configuration la plus répandue dans le monde. L'écoulement du vent dans la turbine étant en constante fluctuation, ce type de machine offre la

possibilité de travailler à vitesse fixe tout en respectant les contraintes de fréquence et de tension quelques systèmes utilisent 2 vitesses.

### **Type 2- La machine asynchrone à rotor bobiné à résistance variable.**

Le stator de cette machine est relié à une interface électronique permettant d'assurer la circulation du flux de puissance tout en ayant deux fréquences différentes au stator et au rotor qui avec une résistance additionnelle permet de varier le glissement et donc la vitesse système prévue généralement pour deux vitesses.

Dans ce système le convertisseur est dimensionné pour la totalité de la puissance nominale, impliquant des composants plus puissants et donc plus chers.

### **Type 3- La machine asynchrone à rotor bobiné avec convertisseur réversible au rotor (back to back converter).**

Ce type de machines est communément appelé machine asynchrone à double alimentation MADA. Elles peuvent être contrôlées par le rotor, et où le stator étant directement connecté au réseau.

Ce type de machine reste le modèle le plus utilisé ces dernières années ; il satisfait par ces critères de large gamme de production d'électricité dans les parcs éoliens et fait concurrence au type 4 dont la technologie est plus récente [27].

### **Type 4- La machine synchrone**

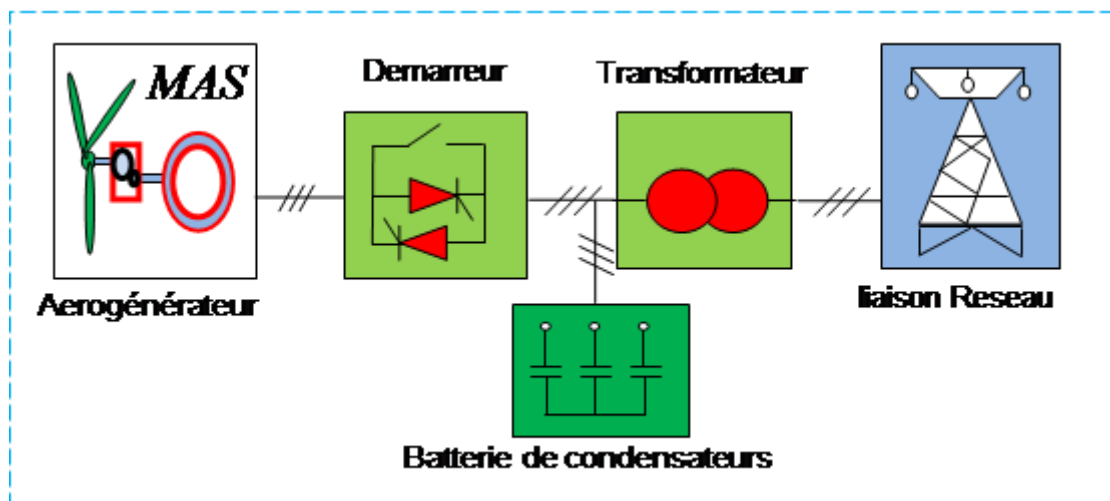
Le système basé sur cette machine est un couplage direct ou dit classique avec le réseau de ce fait ces machines sont très sollicitées de plus une technologie nouvelle est apparue, il s'agit de machines synchrones multipolaires à aimants permanents et aussi à couplage direct avec le réseau avec ou sans multiplicateur de vitesse.

## 1.6.2. Aérogénérateurs destinés à la production de l'électricité.

Ces configurations utilisant les différents générateurs cités précédemment sont les plus répondu pour la production de l'électricité dans le monde dans les parcs éoliens. Les quatre types principaux retenus par les producteurs d'électricité et qui ont fait leurs preuves pour la production d'électricité a grande échelle sont donnés respectivement en les **Figure 1.19a**, **Figure 1.19b**, **Figure 1.19c**, **Figure 1.19d**.

### 1.6.2.1 Eolienne à base de la machine asynchrone à cage.

Les caractéristiques d'un système éolien à base de la machine asynchrone à cage classique à rotor en court-circuit sont :

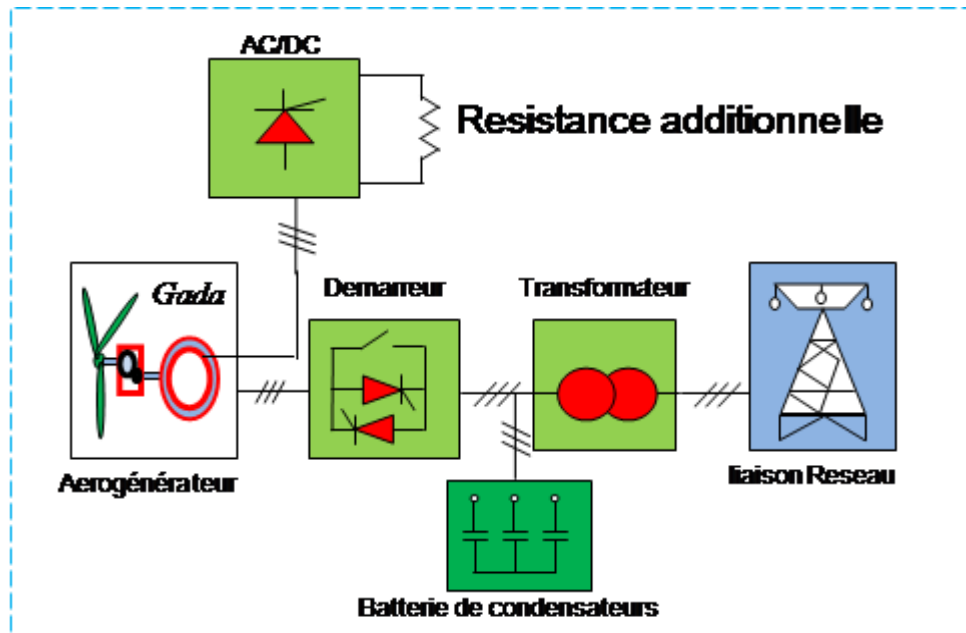


**Figure 1.19 a** Aérogénérateur à base de machine asynchrone à rotor en court-circuit.

- Large gamme de puissance.
- Travaille à vitesse nominale.
- Convertisseur de puissance dimensionné à 100% de la puissance nominale  $P_n$ .
- Contrôle de la puissance active et réactive échangées avec le réseau.
- Absence de système balais bagues.
- Système muni d'un démarreur.
- Consomme de la puissance réactive du réseau ou batteries de condensateurs.
- Système robuste.

### 1.6.2.2 Eolienne à base de la machine asynchrone à rotor bobiné + résistance rotorique additionnelle.

Les caractéristiques d'un système éolien utilisant la machine asynchrone à rotor bobiné avec résistance additionnelle sont :

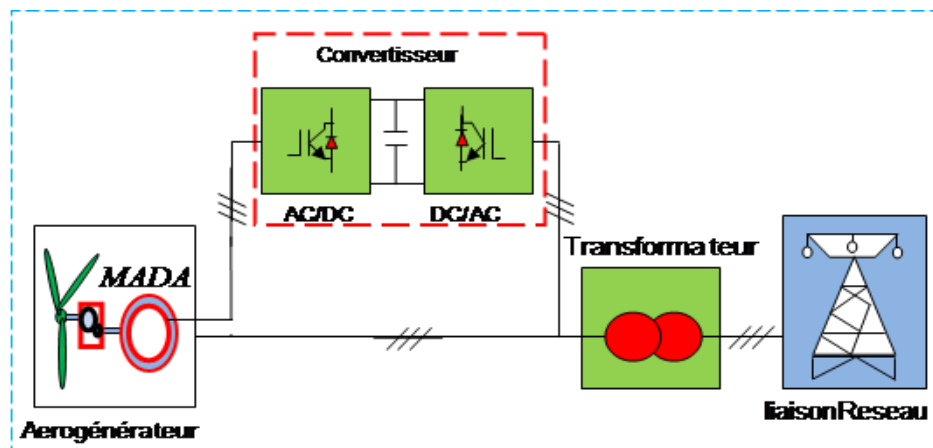


**Figure 1.19 b** Aérogénérateur à base de la machine asynchrone à rotor bobine et résistance additionnelle.

- Gamme de vitesse réduite, généralement la résistance additionnelle est fixée.
- Travaille avec une résistance additionnelle réglable au rotor, pour le contrôle du glissement.
- Convertisseur de puissance dimensionné à 100% de la puissance nominale  $P_n$ .
- Contrôle de la puissance active et réactive échangées avec le réseau.
- Muni système balais bagues.
- Système muni d'un démarreur assure la liaison au réseau.
- Consomme de la puissance réactive du réseau ou système de batteries de condensateurs.
- Moins robuste que le système a cage (plus de maintenance).

### 1.6.2.3 Eolienne à base de la machine asynchrone à double alimentation MADA avec convertisseur réversible au rotor (back to back)

Les caractéristiques d'un système éolien à base de la machine asynchrone à rotor bobiné et convertisseur bidirectionnel au rotor onduleur - redresseur (back to back converter) sont :



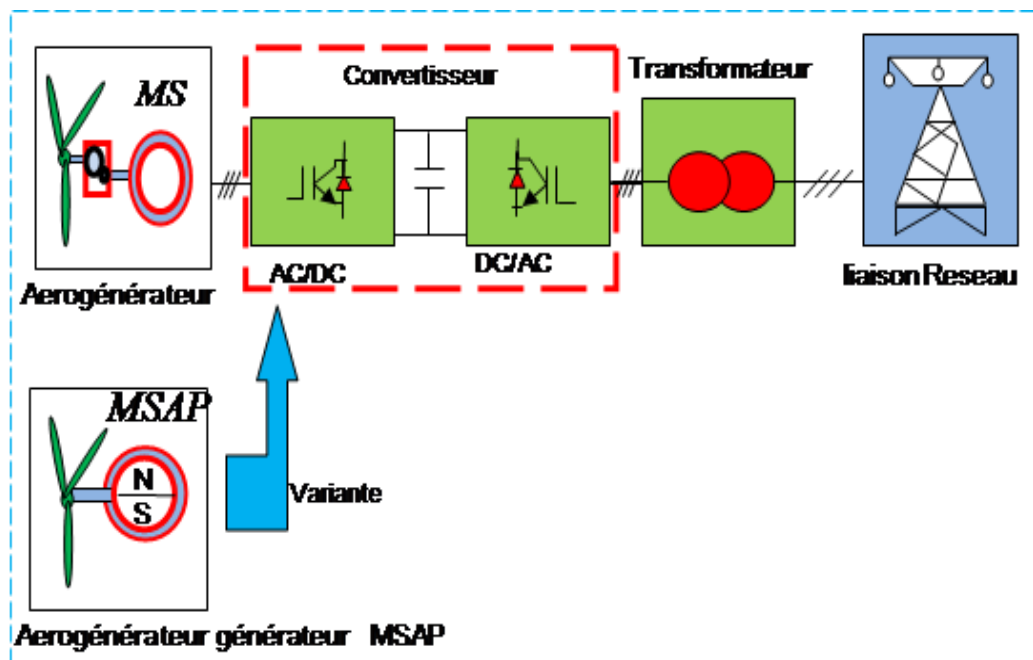
**Figure 1.19 c** Aérogénérateur à base de machine asynchrone à rotor bobiné avec convertisseur réversible au rotor.

- Large gamme de vitesse (0.7 à 1.3 de la vitesse nominale).
- Possibilité de travailler à vitesse supérieure à la vitesse de synchronisme (mode hypersynchrone).
- Convertisseur de puissance dimensionné + 30% ou - 30% de la puissance nominale  $P_n$  et donc moins cher que celui de la machine à cage.
- Contrôle de la puissance active et réactive échangée avec le réseau.
- système avec balais bagues.
- Système démarre seul (pour un vent suffisant et favorable).
- Consomme de la puissance réactive du réseau ou système de batteries de condensateurs.
- Système moins robuste et sa fiabilité démunie à cause du convertisseur rotorique.

Cette configuration avec la machine type MADA sera retenue pour ce mémoire, et sera utilisée en mode générateur asynchrone double alimentée GADA.

#### 1.62.4 Eolienne à base la machine synchrone MS ou MSAP.

Dans cette configuration la machine est usité en mode alternateur à excitation par du courant continu machine synchrone MS classique ou par un système d'aimants permanent type MSAP multipolaires avec ou sans multiplicateur de vitesse, cette technologie est la plus futuriste et encore récente.



**Figure 1.19 d** Aérogénérateur à base la machine synchrone et ou MSAP.

- Large gamme de vitesse 0 à 100%.
- Travaille à vitesse nominale ce mode est le plus recherché.
- Convertisseur de puissance dimensionne à la puissance nominale  $P_n$ .
- Contrôle de la puissance active et réactive échangées avec le réseau.
- Système avec circuit d'excitation pour MS classique (contacts glissants au rotor).
- Système peut démarrer seul.

- avec ou sans multiplicateur (Le système sans multiplicateur utilise la machine synchrone MS multipolaires).
- couplage au réseau simple.
- Système robuste.
- Technologie encore chère.

### 1.7 Choix d'un site EOLIEN.

Parmi les critères naturels, le vent est l'élément le plus recherché et étudié avec soin pour un site en projet.

Le rendement d'une éolienne dépend de la régularité et de la puissance du vent. Les sites les plus intéressants sont généralement situés au bord de la mer ou aux sommets de collines et dans les plaines de terrains dégagées.

#### Distribution de Weibull.

Pour étudier le vent l'une des méthodes, est actuellement très utilisée dans l'industrie est celle de la distribution de Weibull à coté d'autres méthodes basées directement sur la mesures du vent sur de longues périodes. [39] [33]

Il est très important pour l'industrie éolienne d'être en mesure de décrire et connaître les variations du vent en direction (rose des vents) et en intensité de la vitesse moyenne du vent mesurée sur une longue période en générale entre 1 et 10 ans.

Si on ne peut pas avoir ces mesures, on décrit normalement les variations du vent sur un site donné en utilisant un modèle mathématique, une distribution de Weibull donnée par l'équation.

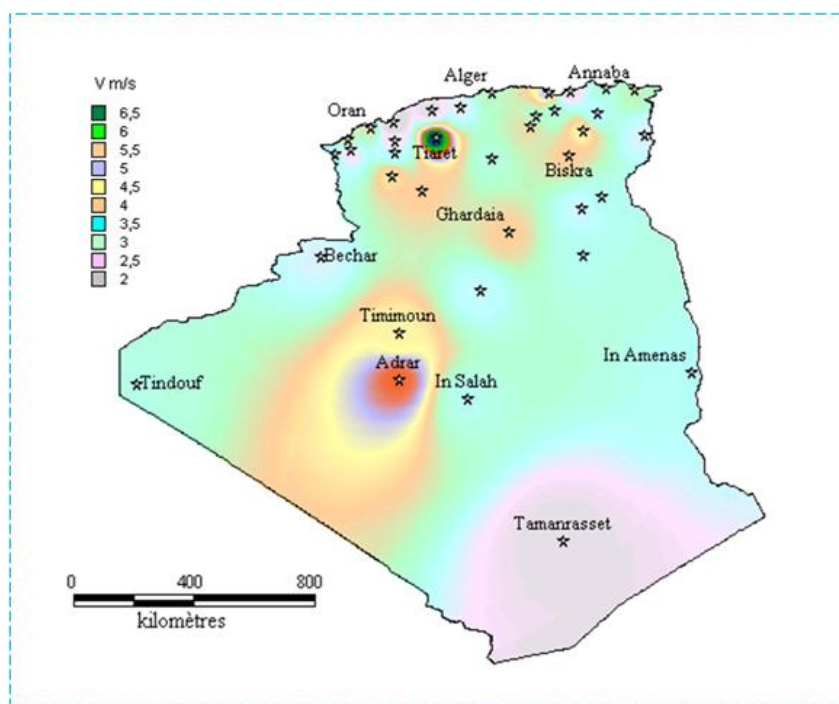
$$f(V) = \frac{k}{c} \left( \frac{V}{c} \right)^{k-1} \exp \left( - \left( \frac{V}{c} \right)^k \right) \quad (1.12)$$

$f(V)$  La densité de probabilité, qui représente la distribution en fréquences des vitesses mesurées.



- V- La vitesse du vent m/s pour le site considéré.
- K- Coefficient de forme.
- c - Coefficient proche de la vitesse moyenne du vent en m/s.

Par exemple on va prendre la distribution de Weibull du site d'ADRAR ou le premier parc éolien est installé en Algérie et d'Ain Salah et celui de Tiaret **Figure 1.20**.



**Figure 1.20** Carte vent de l'algerie à 10m du sol [www.cder.dz](http://www.cder.dz) [33]

La distribution statistique des vitesses du vent varie d'un endroit à l'autre vu qu'elle dépend des conditions climatiques locales, du paysage et sa surface.

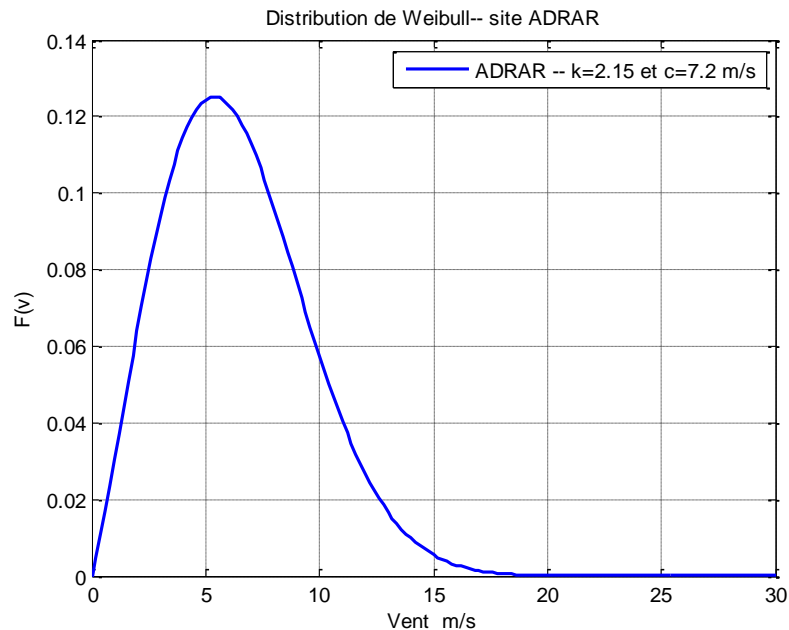
La distribution de Weibull tend donc à varier, tant en forme, qu'en valeur moyenne. [33]

Coefficient Weibull	Adrar	in Salah	Tiaret
K	2.15	1.05	1.58
c m/s	7.2	5.1	6.9

**Tableau 1.1** coefficient de Weibull pour les sites Adrar Ain Salah et Tiaret [33]

Exemple on va prendre la distribution du site d'ADRAR et d'Ain Salah au sud algérien et le site de Tiaret au nord.

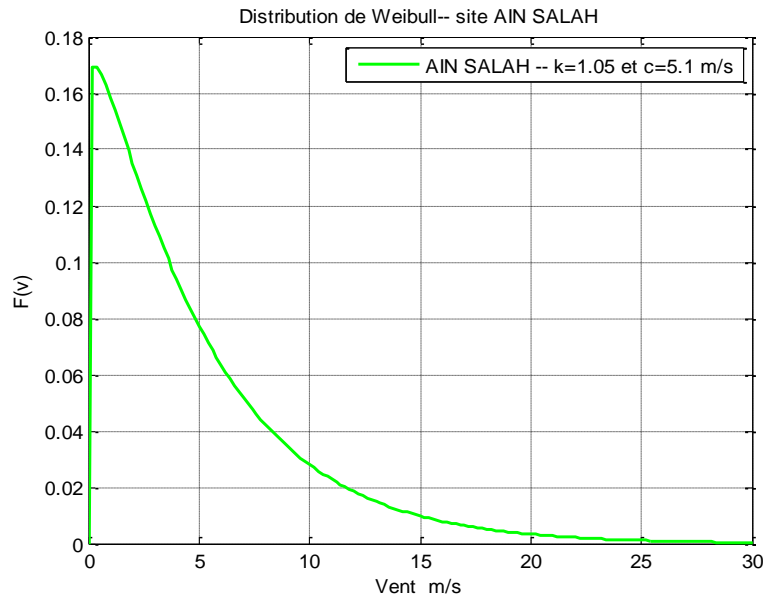
Sur le site ADRAR, la vitesse moyenne du vent est de 7.2 m/s, et la forme de la courbe est déterminée par ce qu'on appelle un paramètre de forme égal à 2.15 **Figure 1.21**.



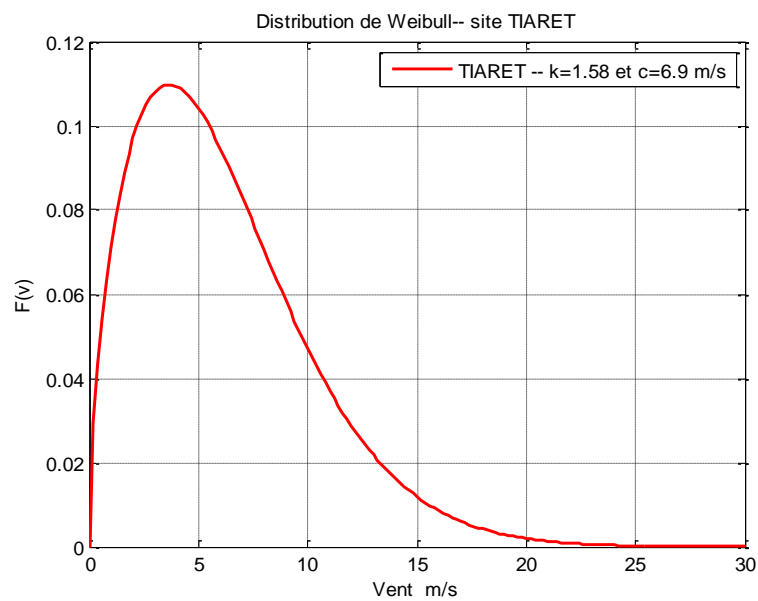
**Figure 1.21** Distribution de Weibull site ADRAR

On remarque sur cette distribution a une forme en cloche, que la probabilité d'avoir des vents fort plus de 20 m/s est très faibles, que les vents faibles inférieurs à 5 m/s sont très fréquents, et que les vents exploitables s'étalent de 6m/s jusqu'à 20 m/s. Par contre pour le site de in Salah qui lui aussi se situe au sud on remarque que les vents faibles sont presque inexistantes, que la zone est très ventée avec une vitesse variant de 2m/s jusqu'à presque 30m/s. figure 1.22.

Un site au nord celui de Tiaret présente une caractéristique intéressante aussi, on peut remarquer sur la courbe figure 1.23, que la zone des vents exploitable varient de 5 m/s et s'étend jusqu'à 25 m/s.

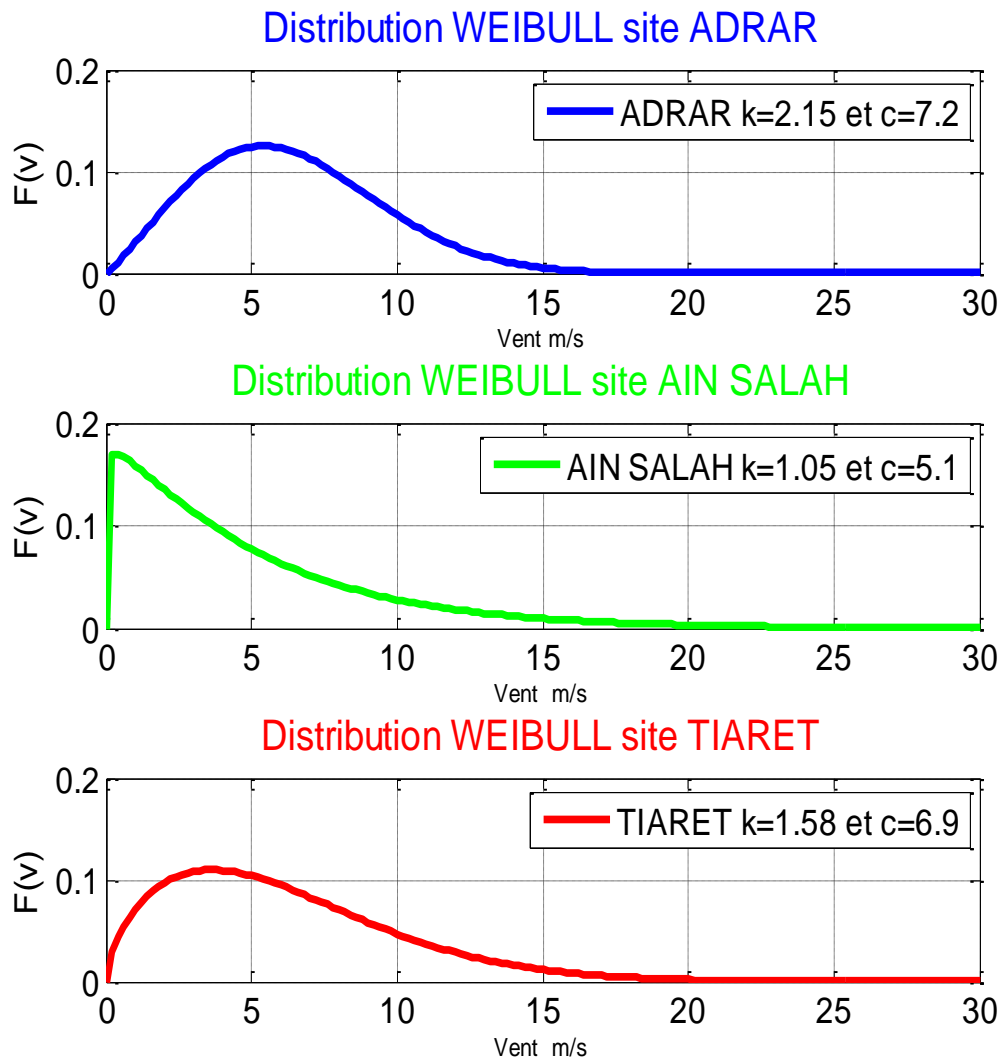


**Figure 1.22** *Distribution de Weibull site In Salah*



**Figure 1.23** *Distribution de Weibull site Tiaret*

On remarque que les vents utiles sont les vents moyens de 5 m/s à 20m/s et que les vents très puissants de plus de 25 m/s sont très rares.



**Figure 1.24** Comparaison des Distributions de Weibull sites Adrar - In Salah et Tiaret.

On remarque que la distribution de Ain Salah présente une variation rapide pour les vents faibles très fréquents et peuvent atteindre même 20m/s, alors que les deux distributions pour Adrar et Tiaret sont bien symétriques et présentent des vents moyens au alentours de [2 m/s à 15 m/s]. Ces zones très ventés pour le graphe ci-dessus, **Figure 1.24** montrent les régions prometteuses ou de nouveaux parcs éoliens seront installés pour le futur.

## 1.8 Modélisation du vent.

Une éolienne fonctionne d'autant mieux que les vents sont réguliers et fréquents et son efficacité dépend notamment de son emplacement en zone venteuse.

Les éoliennes sont utilisables quand la vitesse du vent est supérieure à (10~20 km/h) en particulier à partir d'un vent de 4m/s sans toutefois atteindre des valeurs excessives qui conduiraient à la destruction de l'éolienne et en limiter l'usure; cela pour un fonctionnement optimal de l'éolienne jusqu'à un vent de quelques 80 km/h limite (ordre de 20 à 25 m/s).

### Modèle mathématique du vent

Avant d'entamer la modélisation de l'aérogénérateur, on doit tout d'abord avoir un modèle du vent qui est la source qui fait fonctionner la turbine éolienne.

En vue de déterminer les caractéristiques du vent en direction et en intensité d'un site choisi pour implanter un Park ou une éolienne, on a en générale deux méthodes :

- **Première méthode** : expérimentale consiste à faire des mesures du vent sur site.
- **la deuxième** : la modélisation du vent à partir d'un modèle mathématique.

Dans cette thèse on va utiliser le modèle mathématique du vent d'après les études du Danois Van Der Hoven dont le modèle du vent est donné par l'équation de la vitesse en fonction du temps. [48]

Cette fonction du vent est composée d'un terme constant qui est composante moyenne du vent et d'un terme variable qui donne les fluctuations du vent en fonctions du temps.

$$V = V_0 + \sum_{i=1}^n A_i \sin(\omega t + \varphi)$$

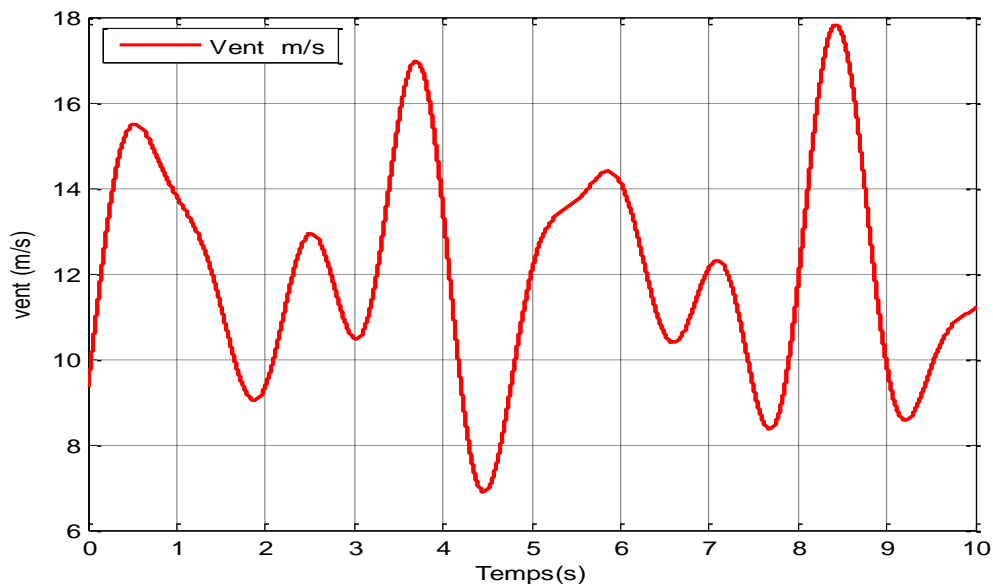
Avec,  $V_0$  - La composante Moyenne du vent en m/s.

$A_i$   $\omega$  et  $\varphi$  -Amplitude, pulsation et phase à l'origine d'une harmonique d'ordre i.

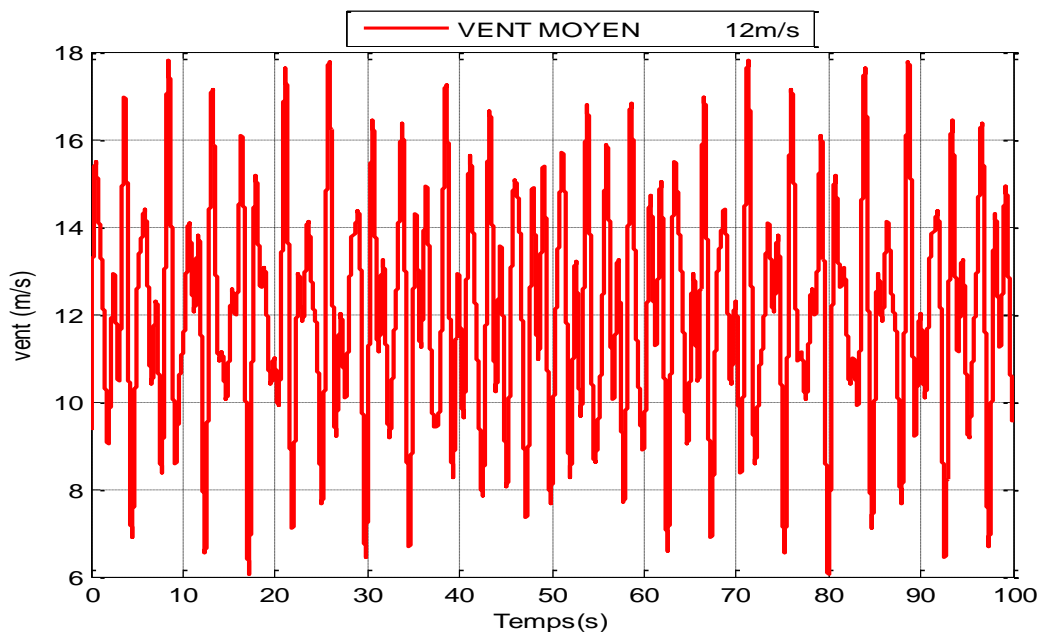
Le modèle spectral du vent avec une composante moyenne du vent de 12 m/s selon l'équation de Van Der Hoven est donné par le modèle suivant.

$$V = 12 + 2\sin\left(2.5t - \frac{\pi}{5}\right) + 2\sin\left(4t - \frac{\pi}{3}\right) + 1.5\sin\left(5.4t + \frac{\pi}{12}\right) + 0.5\sin\left(2.5t - \frac{\pi}{12}\right) \quad (1.13)$$

Le profil du vent en fonction du temps représenté en la figure 1.24 donne le caractère aléatoire du vent autour d'une valeur moyenne de 12m/s.



**Figure 1.25** Profil de vent sur 10s.



**Figure 1.26** Profil de vent, pour un temps de 100s

## **Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons pu examiner le principe de conversion de l'énergie à base d'aérogénérateur.

Donner La loi de BETZ décrivant le moteur éolien et sa limite de rentabilité = 0.59 et prévoir de choisir la turbine dont le coefficient de puissance est proche de cette limite.

Examiner deux types les aérogénérateurs à axe horizontal et les aérogénérateurs à axe vertical avec leurs avantages, exploités dans la production électrique avec les différents générateurs utilisés actuellement.

Avec détermination, des caractéristiques de puissance pour un aérogénérateur comme exemple de 1.5 MW en fonction d'un vent variable.

De plus on a retenu la machine Asynchrone a Double Alimentation MADA avec convertisseur réversible au rotor pour le sujet de ce mémoire Type3.

Suite à cela, nous avons montré la bonne utilisation de la distribution Weibull pour la valorisation d'un site qui reste fonction de la vitesse moyenne du vent.

Quelques exemples de Distribution de Weibull on été examinés pour les sites algériens des régions de ADRAR Ain SALAH, et TIARET.

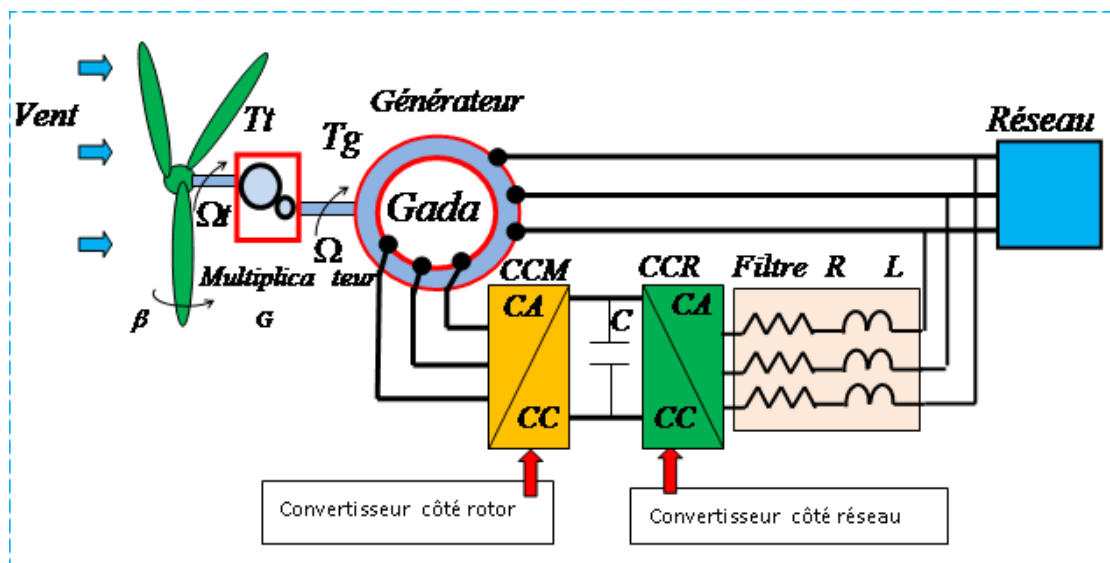
A la fin chapitre on a fait la modélisation du vent par le modèle de Van Der Hoven et tracer le profil de ce vent pour une moyenne 12 m/s.

## CHAPITRE 2

### Modélisation et contrôle de la turbine éolienne

#### 2.1 Introduction

La **Figure 2.1a** présente une configuration de la turbine éolienne utilisant une machine asynchrone à double alimentation MADA en mode générateur GADA. [3]



**Figure 2.1a** Aérogénérateur à base de la GADA [3]

La MADA est une machine asynchrone à double alimentation à rotor bobiné avec un système de balais et de bagues au rotor, description en **Chapitre 3**.

Le stator de la machine est directement connecté au réseau électrique et le rotor connecté au réseau au travers d'une chaîne de convertisseur réversible formé de deux étages (redresseur/ onduleur- réversibles) à bus continu intermédiaire.

La MADA est alimentée à partir de la tension réseau et de la tension à la sortie du convertisseur électronique de puissance à fréquence variable associé au rotor.



Afin d'obtenir des vitesses de rotation sous-synchrone et hypersynchrone, la chaîne de conversion électronique est associée convertisseur fréquentielle de tension variable et bidirectionnelle au rotor back to back, le stator est directement lié au réseau.

Le convertisseur back-to-back qui est constitué par deux convertisseurs de tension réversibles (onduleur CCM - redresseur CCR) avec un bus continu en commun et qui réalise une liaison entre les deux convertisseurs.

La partie électrique est composée d'un générateur, la chaîne de convertisseurs électronique de puissance avec son bus continu et son filtre de sortie. Le convertisseur de tension coté réseau CCR est connecté à celui-ci via trois bobines permettant de filtrer les harmoniques de courant et le convertisseur coté machine CCM est directement connecté au bobines rotoriques avec bagues et balais.

La partie mécanique de la turbine est composée par trois pales orientables, un réducteur de vitesse et une transmission de puissance mécanique donc de couple.

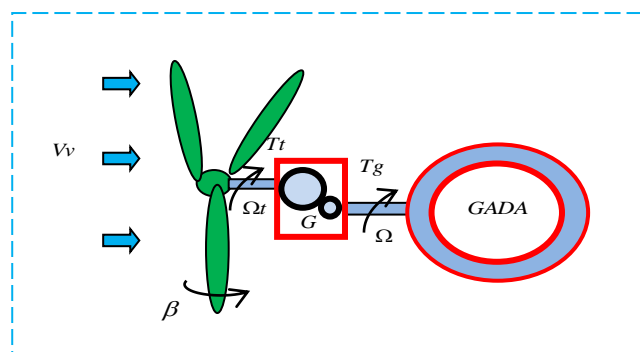
## 2.2. Modélisation de la turbine éolienne

### 2.2.1 Modélisation de la turbine.

Le modèle de la turbine éolienne doit représenter l'ensemble des éléments du système de l'aérogénérateur éolien **Figure 2.1a** [15].

Le dispositif, est constitué d'une turbine éolienne tripale de longueur  $R$  entraînant une génératrice couplée à l'arbre d'un multiplicateur de vitesse de gain  $G$ .

**Figure 2.1b**



**Figure 2.1b** Schéma de la turbine éolienne (aérogénérateur) [3]

La turbine est un dispositif permettant de convertir l'énergie du vent en énergie mécanique sa puissance est donnée par [15].

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

Elle est caractérisée par son couple aérodynamique donné par :

$$T = \frac{1}{2\Omega t} C_p \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \quad (2.2)$$

- $\Omega t$  : est la vitesse de la turbine.
- $\rho$  : est la densité de l'air (approximativement  $1.225 \text{ kg/m}^3$  à la pression atmosphérique à  $15^\circ\text{C}$ ).
- $S$  : est la surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est égale à la longueur de la pale.
- $v$  : est la vitesse de vent en m/s.

$C_p$  représente le rendement aérodynamique de la turbine (coefficient de puissance).

Ce coefficient dépend du dimensionnement de la pale, du coefficient de vitesse lambda  $\lambda$  (Speed ratio) et de l'angle d'orientation de la pale  $\beta$ .

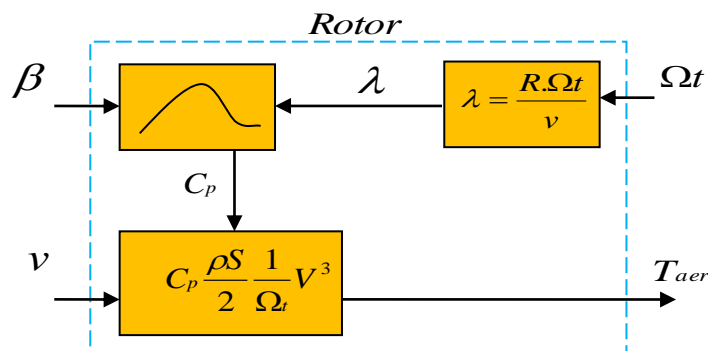
Le ratio de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse de la pale à la vitesse du vent:

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega t}{v} \quad (2.3)$$

Pour cette étude, le coefficient de puissance  $C_p$  utilisé pour la turbine est [15]:

$$C_p(\lambda, \beta) = (00.5 - 0.0167 \cdot (\beta - 2)) \sin\left(\frac{\pi(\lambda + 0.1)}{18.5 - 00.3(\beta - 2)}\right) - 0.00184 \cdot (\lambda - 3) \cdot (\beta - 2) \quad (2.4)$$

De ces équations on peut alors obtenir le schéma bloc de la turbine de la **Figure 2.2**

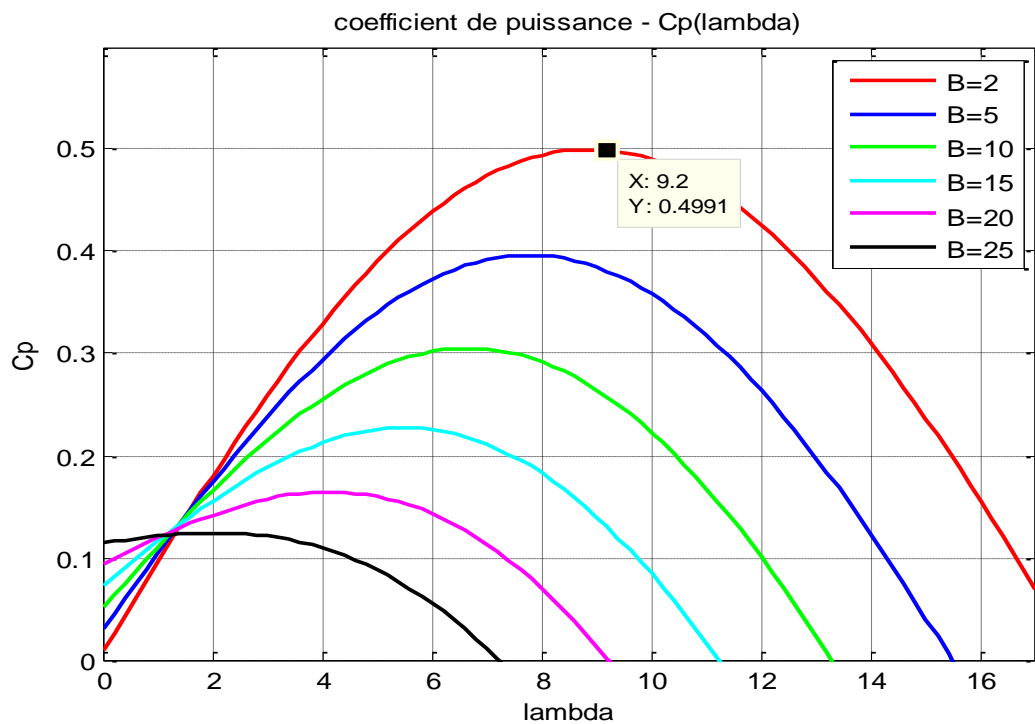


**Figure 2.2** modèle de la turbine [29]

La **Figure 2.3** montre les courbes du coefficient de puissance  $C_p$  fonction de  $\lambda$  pour différentes valeurs de l'angle de calage  $\beta$ .

Pour une machine 1.5 MW [15]. On obtient un coefficient de puissance maximum  $C_p=0.5$  pour un ratio de vitesse ( $\lambda_{opt}=9.2$ ) la courbe rouge en haut. **Figure 2.3**

En fixant ces deux valeurs à leurs valeurs optimales, le système éolien fournira une puissance électrique optimale.



**Figure 2.3** Coefficient de puissance en fonction  $\lambda$ , et  $\beta$ .

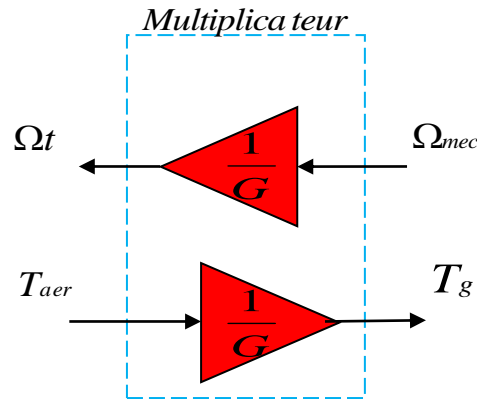
### 2.2.2 Modélisation du multiplicateur de vitesse

Le multiplicateur de vitesse transforme l'énergie aérodynamique de l'arbre mécanique de l'éolienne (vitesse lente) à l'arbre mécanique du rotor de la génératrice (vitesse rapide) avec un rapport de vitesse  $G$ . **Figure 2.4**

$$\Omega = G\Omega_t \quad (2.5)$$

Cela se traduit par les équations :

$$T_g = G.T_{em} \quad (2.6)$$



**Figure 2.4** Modélisation du Multiplicateur [29]

La transmission de puissance mécanique est composée de l'inertie du rotor de la turbine et de l'inertie de la génératrice.

Le modèle mécanique équivalent proposé intègre ces deux inerties.

$$J = \frac{J_t}{G^2} + J_g \quad (2.7)$$

Il est à noter que l'inertie du rotor de la génératrice est très faible par rapport à l'inertie de la turbine reportée par cet axe.

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

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = T_{mec} \quad (2.8)$$

et

$$T_{mec} = T_g - T_{em} - T_f$$

Où  $J$  est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice.

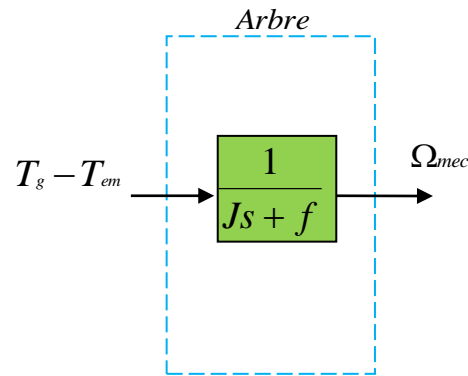
Ce couple mécanique prend en compte, le couple électromagnétique produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux  $T_f$  et le couple issu du multiplicateur  $T_g$ .

$T_f$  est exprimé comme,

$$T_f = f \cdot \Omega_{mec} \quad (2.9)$$

L'équation mécanique donne. **Figure 2.5**

$$\frac{\Omega_{mec}}{T_g - T_{em}}(s) = \frac{1}{Js + f} \quad (2.10)$$

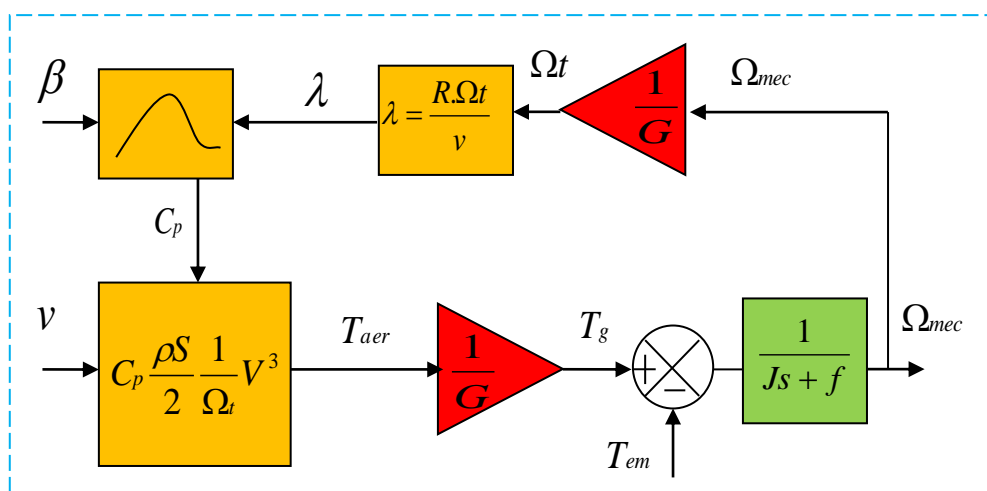


**Figure 2.5** Modélisation de l'arbre générateur [29]

$f$ ; est le coefficient de frottement équivalent de l'arbre.  $f = \frac{f_t}{G^2} + f_g$

Et  $f_t$  et  $f_g$  sont les coefficients de frottement de la turbine et du générateur respectivement.

Le schéma bloc de l'ensemble de ces modélisations se traduit sur la **Figure 2.6**



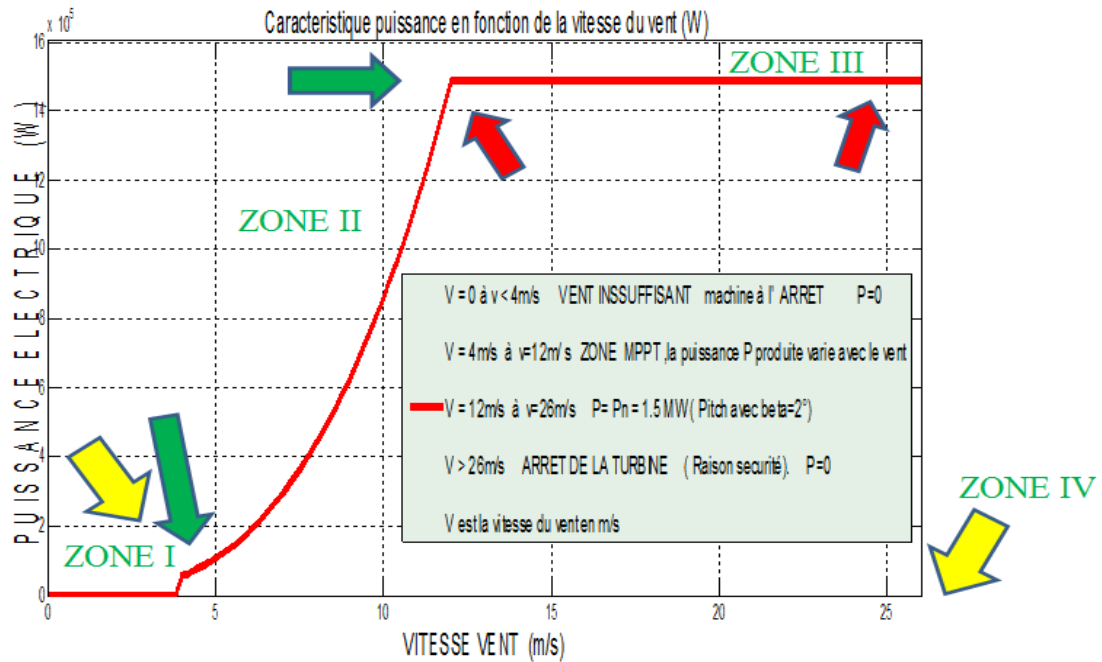
**Figure 2.6** Schéma bloc du modèle de la turbine [29]

### 2.3.1 Caractéristique puissance vitesse d'une éolienne de grande puissance.

La Figure 2-7 représente la caractéristique (Puissance-vitesse) d'une éolienne de grande puissance qui peut se décomposer en quatre zones, 1.5 MW.

**Zone I :** la vitesse de vent est faible, insuffisante pour permettre le démarrage de l'éolienne; la vitesse de rotation et la puissance mécanique sont alors égales à zéro.

$P_s = 0$  dans ce cas le générateur est de connecté au réseau.



**Figure 2.7** La caractéristique de puissance vitesse d'une éolienne de grande puissance 1.5 MW

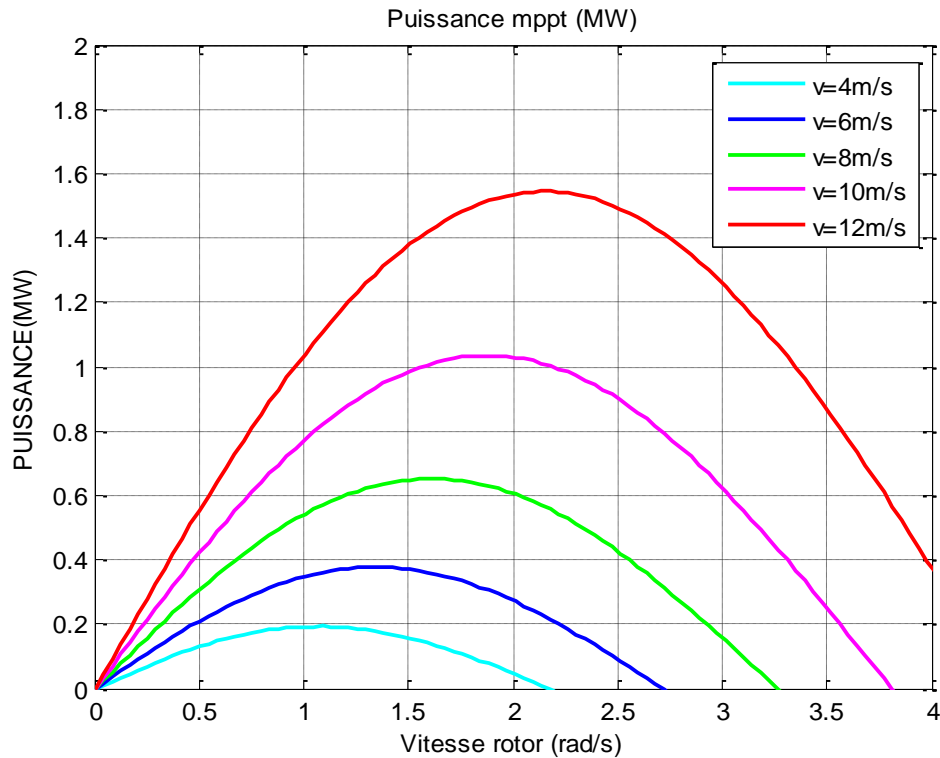
**Zone II :** le vent atteint une vitesse minimale  $V_{min} = 4$  m/s, pour permettre le démarrage. Une fois ce démarrage effectué, l'éolienne va fonctionner de manière à extraire le maximum de puissance disponible pour avoir un fonctionnement optimal jusqu'à ce que le vent atteigne la vitesse nominale  $V_n = 12$  m/s correspondant à la puissance et la vitesse de rotation nominale du générateur 1500 tr/min, c'est la zone MPPT. Ainsi on peut récupérer de la puissance en fonction de la vitesse pour un vent variable en zone II avec un coefficient  $C_p$  variable. **Figure 2.8**

**Zone III :** le vent atteint des vitesses élevées supérieures à la vitesse nominale, la vitesse de rotation et la puissance mécanique doivent être maintenues à leur valeurs nominales afin de ne pas détériorer l'éolienne,  $P = P_n = 1.5$  MW.

Ces limitations peuvent s'effectuer, par exemple, en orientant les pales de l'éolienne afin de dégrader le rendement de l'éolienne augmentation de l'angle de calage des pales.

**Zone IV** : Dès que le vent atteint sa valeur maximale  $V_{max}=26\text{m/s}$ , une procédure d'arrêt en urgence de l'éolienne est effectuée afin d'éviter toute destruction de celle-ci, les pales de la turbine sont mises en drapeaux position d'arrêt et  $P=0$ .

Lorsque  $P=0$  la génératrice est déconnectée du réseau ceci pour  $V < 4\text{m/s}$  et  $V > 26\text{m/s}$ .



**Figure 2.8** Puissance en MPPT en fonction de la vitesse de vent. **Zone II**

### 2.3.2 Système de contrôle de l'aérogénérateur

Le contrôle de l'aérogénérateur est assuré par deux boucles de régulation, fortement liées :

- 1- Boucle de régulation de la vitesse.
- 2- Boucle de régulation de puissance.

La première boucle est la boucle principale dans la stratégie d'optimisation de la puissance où la vitesse de rotation est contrôlée par le couple électromagnétique.

Dans la stratégie de limitation de puissance, les deux boucles de régulation interviennent.

Quand la vitesse de vent est inférieure à la vitesse nominale 12m/s, l'angle de calage est maintenu constant à une valeur optimale ( $\beta = 2$ ), tandis que la vitesse de rotation est ajustée par la boucle de régulation de vitesse pour extraire le maximum de la puissance du vent. Lors d'une rafale de vent la vitesse de rotation va augmenter et peut dépasser la vitesse nominale à cause de la lenteur du système d'orientation des pales qui a une dynamique plus lente que celle de la machine.

Dans ce cas, la boucle de vitesse réagit en augmentant la puissance de référence de la génératrice, et anticipe l'action du dispositif d'orientation des pales en réglant le couple électromagnétique de manière à contrôler la vitesse de rotation dans la zone III.

### 2.3.3 Méthodes de recherche du point maximum de puissance MPPT.

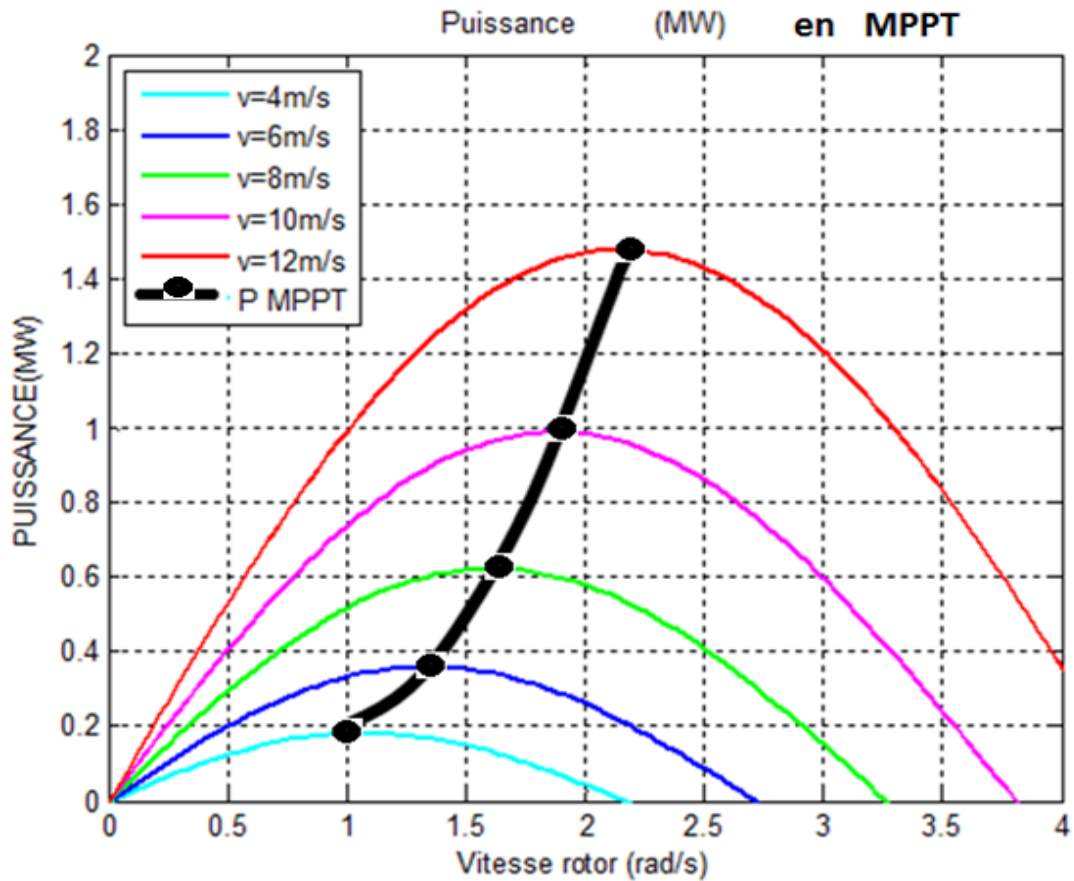
La caractéristique de la puissance optimale d'une éolienne est fortement non linéaire et en forme de cloche. A chaque vitesse de vent, le système doit trouver la puissance maximale de ce qui équivaut à la recherche de la vitesse de rotation optimale. Le schéma de la illustre les courbes caractéristiques de l'éolienne dans le plan puissance, vitesse de rotation de la turbine.

La ligne noire en gras sur la **Figure 2.9** montre la courbe MPPT pour la machine 1.5MW.

L'ensemble des sommets de ces caractéristiques qui sont les points optimaux recherchés, donne la courbe MPPT de puissance optimale défini par la courbe des sommets et obtenus pour un vent variable de 4m/s à 12 m/s:

$$P_{opt} = \frac{1}{2} C_p^{opt} . (\lambda_{opt}) . \rho . S . v^3 \quad (2.11)$$





**Figure 2.9** Caractéristique de l'éolienne dans le plan, vitesse de rotation.

Un fonctionnement idéal du système éolien nécessite un suivi parfait de cette courbe.

Pour s'approcher de ce but, une commande spécifique connue sous la terminologie Maximum Power Point Tracking (MPPT) correspond à la zone II doit être utilisée.

La stratégie de cette commande consiste à contrôler le couple électromagnétique afin de régler la vitesse mécanique de manière à maximiser la puissance électrique générée.

On distingue deux approches possibles :

- $C_p = f(\lambda)$  n'est pas connue.
- La deuxième approche considère que la caractéristique  $C_p = f(\lambda)$  est connue. Il suffit de suivre la courbe optimale de puissance pour que l'éolienne soit dans les conditions optimales.

### 2.3.3.1 MPPT avec la connaissance de la courbe caractéristique de la turbine éolienne

Cette façon de procéder exige du constructeur de l'éolienne des essais de caractérisation des simulations du profil des pales.

Une telle caractérisation permet de simplifier considérablement l'algorithme de la recherche de puissance maximale et d'utiliser des convertisseurs plus basiques et moins coûteux.

Deux familles de structures de commande sont présentées dans cette approche :

### 2.3.3.2 Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse

La nature fluctuante du vent engendre des perturbations dans le système de conversion éolien, et crée des variations continues de puissance.

De cet effet, il est supposé que le couple électromagnétique développé par la machine est égal à sa valeur de référence quel que soit la puissance générée.

$$T_{em} = T_{em\_ref}, \quad (2.12)$$

Selon l'équation fondamentale de la dynamique permettant de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total appliqué au rotor, on peut régler cette vitesse à une référence.

Ceci est obtenu en utilisant un asservissement adéquat de la vitesse pour avoir un couple électromagnétique de référence.

$$T_{em\_ref} = K_{ass}(\Omega_{ref} - \Omega_{mec}) \quad (2.13)$$

$K_{ass}$  : Régulateur de vitesse.

$\Omega_{ref}$  : La vitesse mécanique de référence.

Cette vitesse de référence dépend de la vitesse de la turbine à fixer pour maximiser la puissance extraite.

En prenant en compte le gain du multiplicateur, on a donc :

$$\Omega_{ref} = G.\Omega_{tur\_ref} \tag{2.14}$$

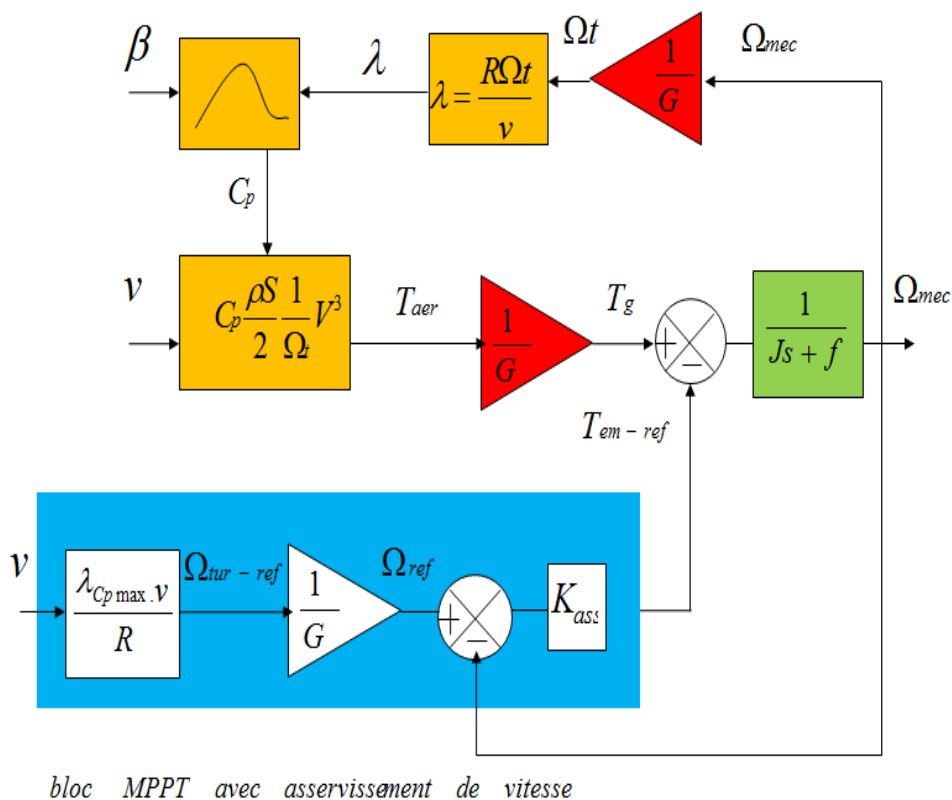
Selon l'équation, la vitesse de rotation de la turbine est égale à:

$$\Omega_{tur} = \frac{v.\lambda}{R} \tag{2.15}$$

La vitesse de référence de la turbine correspond à la valeur optimale de la vitesse spécifique et le coefficient de puissance maximale  $C_p$  optimal peut se déduire de l'équation (2.14).

$$\Omega_{tur\_ref} = \frac{v.\lambda_{opt}}{R} \tag{2.16}$$

Le schéma bloc déduit de la MPPT sans asservissement de vitesse de la turbine est le suivant **Figure 2.10**



**Figure 2.10** Schéma bloc de MPPT Avec asservissement de la vitesse [3]

### 2.3.3.3 Conception du correcteur de vitesse

L'action du correcteur de vitesse doit accomplir deux tâches :

- Il doit asservir la vitesse mécanique à sa valeur de référence.
- Il doit atténuer l'action du couple éolien qui constitue une entrée perturbatrice.

Différentes technologies de correcteurs peuvent être considérées pour l'asservissement de la vitesse.

Deux correcteurs sont utilisés, le correcteur Proportionnel intégral (PI) avec anticipation, le correcteur Proportionnel intégral PI à avance de phase.

#### a) - PI à avance de phase :

Le correcteur considéré a pour expression :

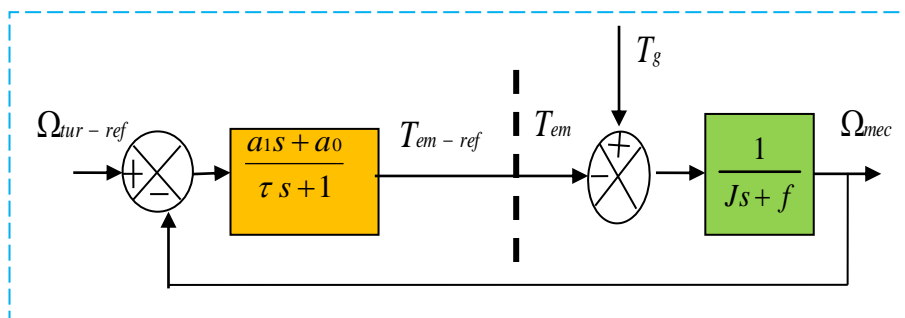
$$T_{em\_ref} = \left( \frac{a_1 s + a_0}{\tau s + 1} \right) (\Omega_{ref} - \Omega_{mec}) \quad (2.17)$$

$a_0$ ,  $a_1$  et  $\tau$  sont les paramètres du correcteur à déterminer.

$s$  est l'opérateur de Laplace.

Effet du correcteur avance de phase **Figure 2.11**

- Augmentation de la marge de phase (comme l'indique le nom du correcteur).
- Augmentation la bande passante (rapidité et diminution de temps de réponse  $t_r$ ).
- Augmentation de la marge de stabilité (Erreur en régime permanent imposée).
- Sensibilité aux bruits à cause de l'élargissement de la Bande passante.



**Figure 2.11** Schéma bloc du correcteur PI à avance de phase [3]

Si on suppose que  $T_g = 0$ , donc la fonction de transfert en boucle fermée se met sous la forme suivante :

$$\Omega_{mec} = F(s).\Omega_{ref} + P(s).T_g \quad (2.18)$$

Où  $F(s)$  est la fonction de transfert de la référence sur la vitesse :

$$F(s) = \frac{a_1 s + a_0}{J\tau s^2 + (f\tau + J + a_1)s + a_0 + f} \quad (2.19)$$

Et  $P(s)$  est la fonction de transfert de la perturbation  $T_g$ .

$$P(s) = \frac{\tau s + 1}{J\tau s^2 + (f\tau + J + a_1)s + a_0 + f}, \quad (2.20)$$

Dans l'objectif d'atténuer l'action de la perturbation (couple éolien  $T_g$ ), il faut que le  $g$  paramètre  $a_0$  soit élevé.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{a_0 + f}{J\tau}} \quad (2.21)$$

Les autres paramètres ( $a_1$  et  $r$ ), sont déterminés pour avoir une fonction de transfert du 2eme ordre, ayant une pulsation naturelle  $\omega_n$  et un coefficient d'amortissement  $\zeta$  définis comme suit:

$$\zeta = \frac{\tau + J + a_1}{a_0 + f} \cdot \frac{\omega_n}{2} \quad (2.22)$$

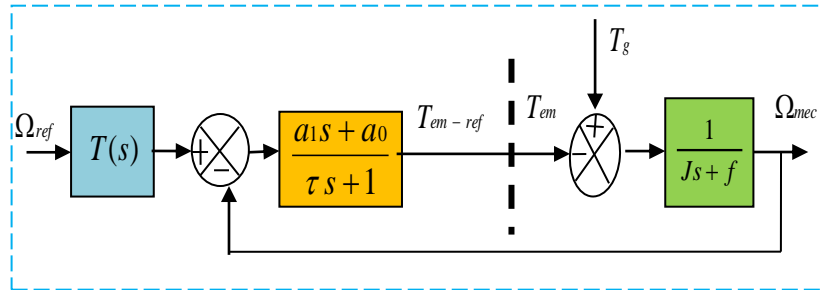
La constante de temps permet de régler la pulsation naturelle et donc le temps de réponse de l'asservissement de vitesse :

$$a_0 = \omega_n J \tau \quad (2.23)$$

$$a_1 = \frac{2\zeta}{\omega_n} (a_0 + f) - \tau - J, \quad (2.24)$$

Le temps de réponse en boucle fermée affecte la valeur de la variation de puissance au moment de l'accrochage au réseau, En effet plus ce dernier est réduit plus la puissance électrique produite est importante en régime transitoire, autrement dit au démarrage de la génératrice, et réciproquement. **Figure 2.12**

$$T(s) = \frac{J\tau s^2 + (f\tau + J + a_1)s + a_0 + f}{(\tau s + 1)(a_1 s + a_0)} \quad (2.25)$$



**Figure 2.12** Schéma de la boucle du correcteur PI à avance de phase [3]

### b) - PI avec anticipation

Dans ce type de correcteur le PI utilisé est standard il est décrit par l'équation suivante :

$$T_{em\_ref} = \left(b_1 + \frac{b_0}{s}\right) \cdot (\Omega_{ref} - \Omega_{mec}) \quad (2.26)$$

$b_1$  : Gain proportionnel et  $b_0$  gain intégral, sont les paramètres du correcteur à déterminer.

La fonction de transfert en boucle fermée est identique à la précédente :

$$F(s) = \frac{b_1 s + b_0}{Js^2 + (f + b_1)s + b_0} \quad (2.27)$$

$$P(s) = \frac{s}{Js^2 + (f + b_1)s + b_0} \quad (2.28)$$

Il est donc nécessaire d'augmenter le paramètre  $b_0$  pour atténuer l'action du couple éolien  $T_{aer}$ .

La pulsation naturelle et le coefficient d'amortissement sont déterminés par:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{b_0}{J}} \quad (2.29)$$

$$\zeta = \frac{f \tau + J + b_1}{b_0} \cdot \frac{\omega_n}{2} \quad (2.30)$$

$$b_0 = \omega_n^2 J \quad (2.31)$$

Donc, pour imposer un temps de réponse et un facteur d'amortissement donné, on a :

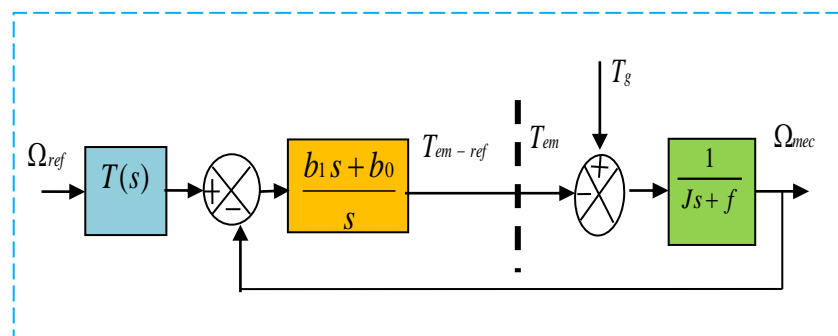
$$b_1 = \frac{2b_0\zeta}{\omega_n} - f\tau - J \quad (2.32)$$

Le paramètre  $b_1$  est calculé de manière à obtenir un coefficient d'amortissement donné ( $\zeta = 0.707$ ) conduit au temps de réponse le plus court pour une valeur donnée de la fréquence propre non amortie).

La fonction de transfert anticipatrice (2-33), est donnée selon cette expression :

$$T(s) = \frac{J s^2 + (f + b_1)s + b_0}{(b_1 s + b_0)\left(\frac{0.05}{3} s + 1\right)} \quad (2.33)$$

Son schéma bloc en boucle est donné **Figure 2.13**



**Figure 2.13** Schéma du correcteur PI avec anticipation [3]

#### 2.3.3.4 Maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse

En pratique, une mesure précise de la vitesse du vent est difficile à réaliser et ceci pour deux raisons :

- L'anémomètre est situé derrière le rotor de la turbine, ce qui donne une lecture erronée de la vitesse du vent.
- Une variation sensible du vent en fonction de la hauteur où se trouve l'anémomètre.

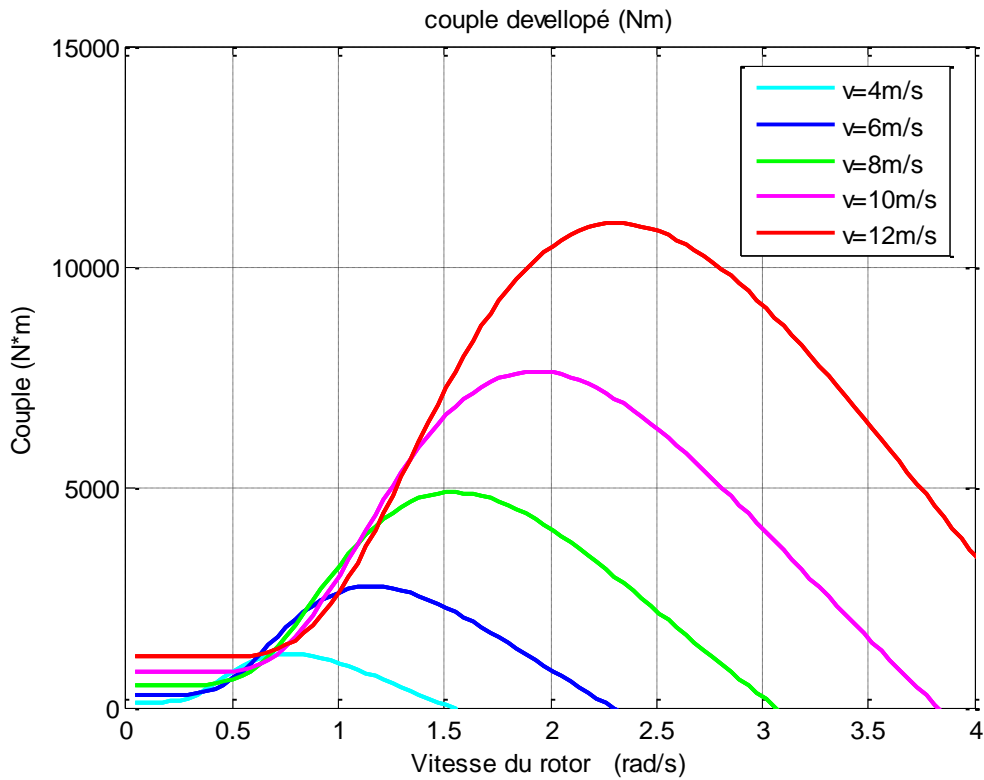
Dans ce cas, à partir de l'équation dynamique de la turbine, on obtient :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = T_{mec} = 0 = T_g - T_{em} - T_f \tag{2.34}$$

Ceci revient à considérer le couple mécanique  $T_{mec}$  développé comme étant nul.

Donc, en négligeant l'effet du couple des frottements visqueux ( $T_f = 0$ ), on obtient:

$$T_{em} = T_g \tag{2.35}$$



**Figure 2.14** Couple développé en fonction de la vitesse de vent

Le couple électromagnétique de réglage est déterminé à partir d'une estimation du Couple éolien pour différentes valeurs de vent mais avec une vitesse de générateur constante.

**Figure 2.14**

$$T_{em\_ref} = \frac{T_{aer\_estimé}}{G} \tag{2.36}$$

Sachant que :

$$P_{aer} = C_p \cdot P_v = C_p(\lambda, \beta) \frac{\rho S V^3}{2} \tag{2.37}$$

$$T_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turbine}} \tag{2.38}$$



Alors

$$T_{aer\_estimé} = C_p \frac{\rho S}{2} \frac{1}{\Omega_{turbine\_estimé}} V_{estimé}^3 \quad (2.39)$$

$$\Omega_{turbine\_estimé} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (2.40)$$

La mesure de la vitesse du vent apparaissant au niveau de la turbine étant délicate, une estimation de sa valeur peut être obtenue à partir de l'équation suivante :

$$V_{estimé} = \frac{\Omega_{turbine}}{\lambda} \quad (2.41)$$

Après calcul on aboutit à l'équation suivante :

$$T_{em\_ref} = \frac{C_p}{\lambda^3} \frac{\rho \pi R^5}{2} \frac{\Omega_{mec}^2}{G^3} \quad (2.42)$$

Pour extraire le maximum de la puissance générée, il faut fixer le ratio de vitesse à la valeur  $C_{p\_opt} = 0.5$ .

$$T_{em\_ref} = \frac{C_{p\_opt}}{\lambda_{Cp\max}^3} \frac{\rho \pi R^5}{2} \frac{\Omega_{mec}^2}{G^3} \quad (2.43)$$

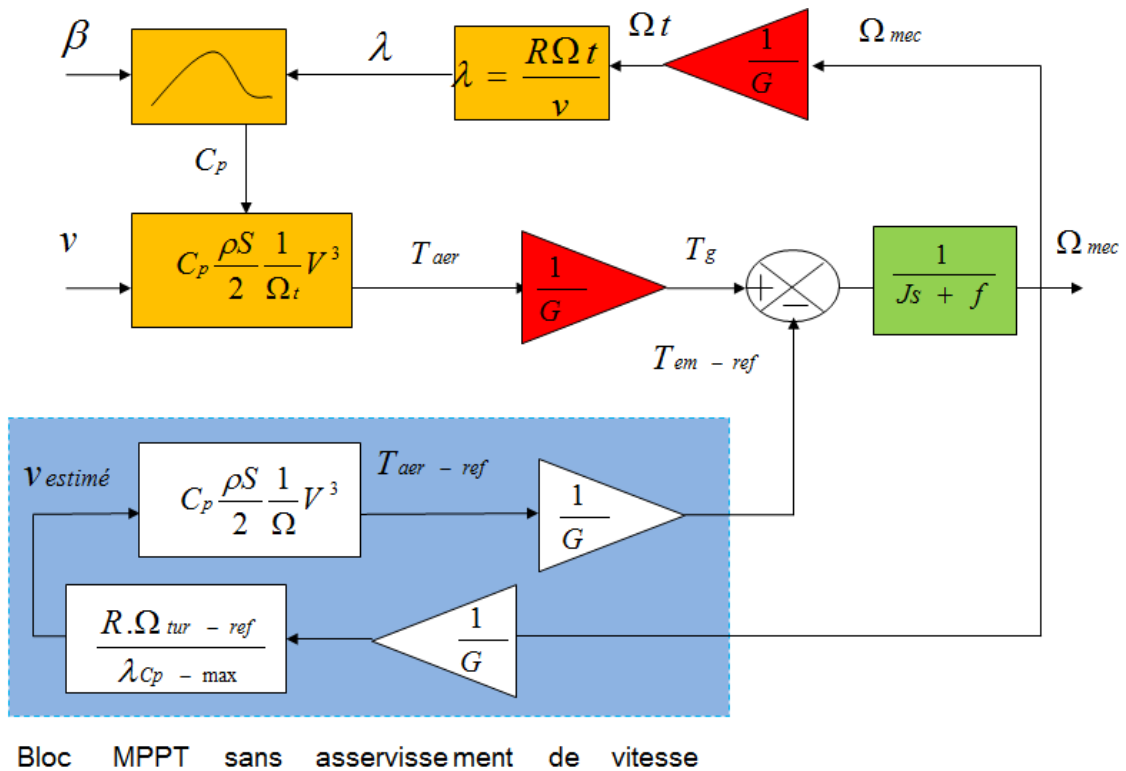


Figure 2.15 Schéma bloc de la MPPT sans asservissement de la vitesse. [3]

L'expression du couple de référence peut se mettre donc sous la forme suivante :

$$T_{em\_ref} = K_{opt} \Omega_{mec}^2 \quad (2.44)$$

et,

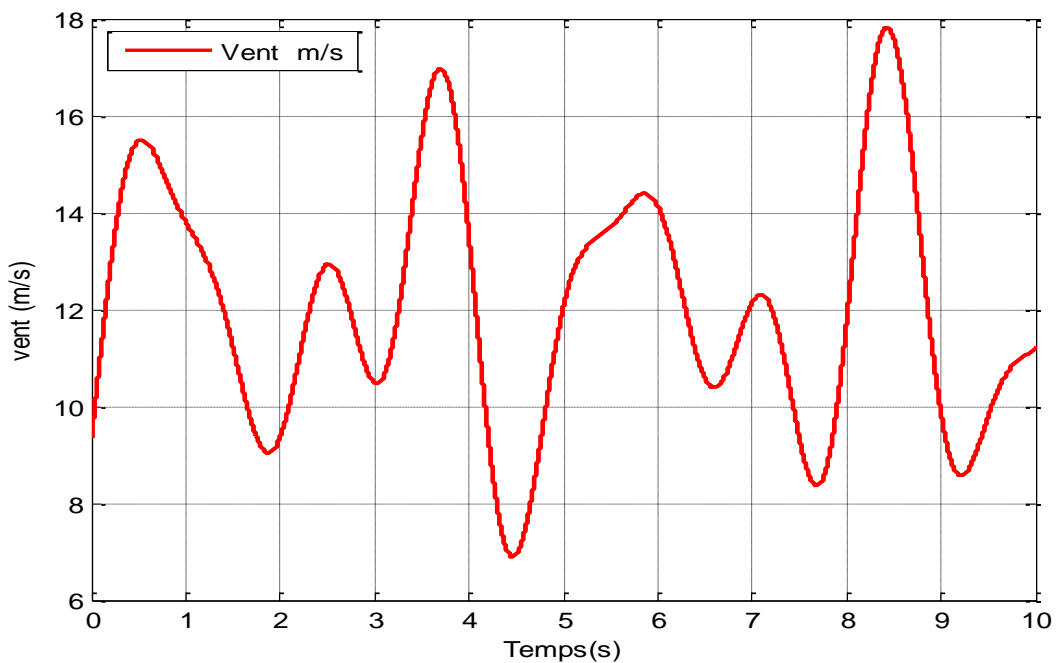
$$K_{opt} = \frac{C_{p\_opt}}{\lambda^3 C_{p\_opt}} \frac{\rho \pi R^5}{2G^3} \quad (2.45)$$

### Simulation et résultats.

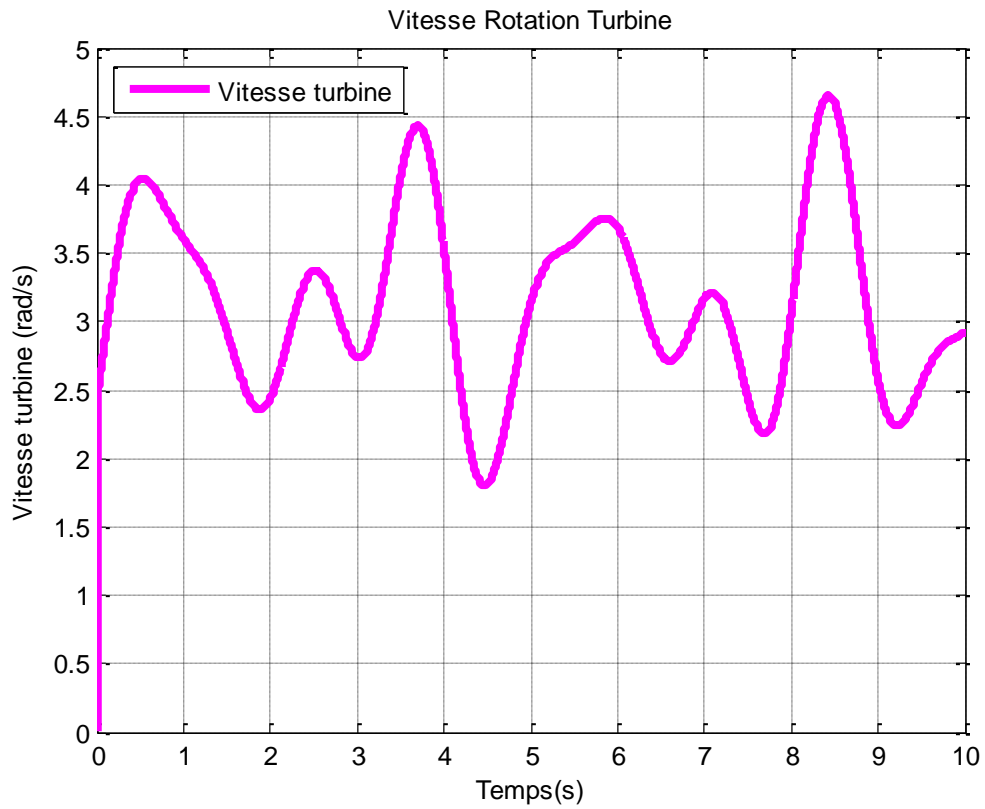
#### MPPT sans asservissement de la vitesse.

La simulation a été faite avec le profil de vent moyen de (12 m/s), avec les paramètres de la machine 1.5MW avec  $C_p=0.5$  et un coefficient de vitesse. 0.92. **Figure 2.15** qui est plus simple.

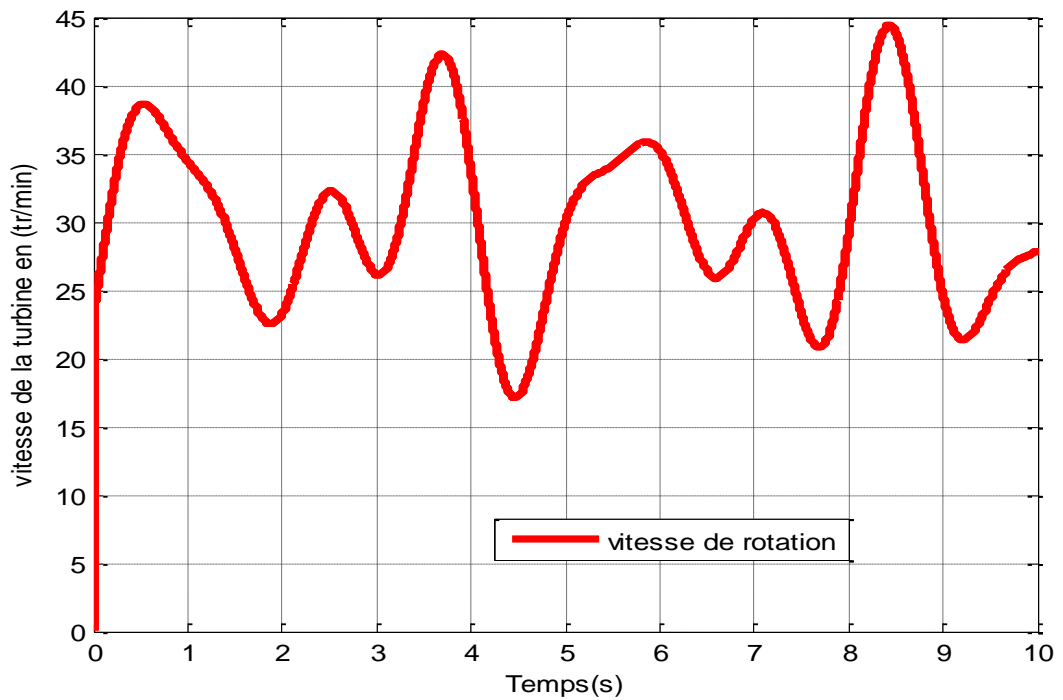
Les courbes obtenues pour les différentes pour la MPPT sans asservissement de vitesse.



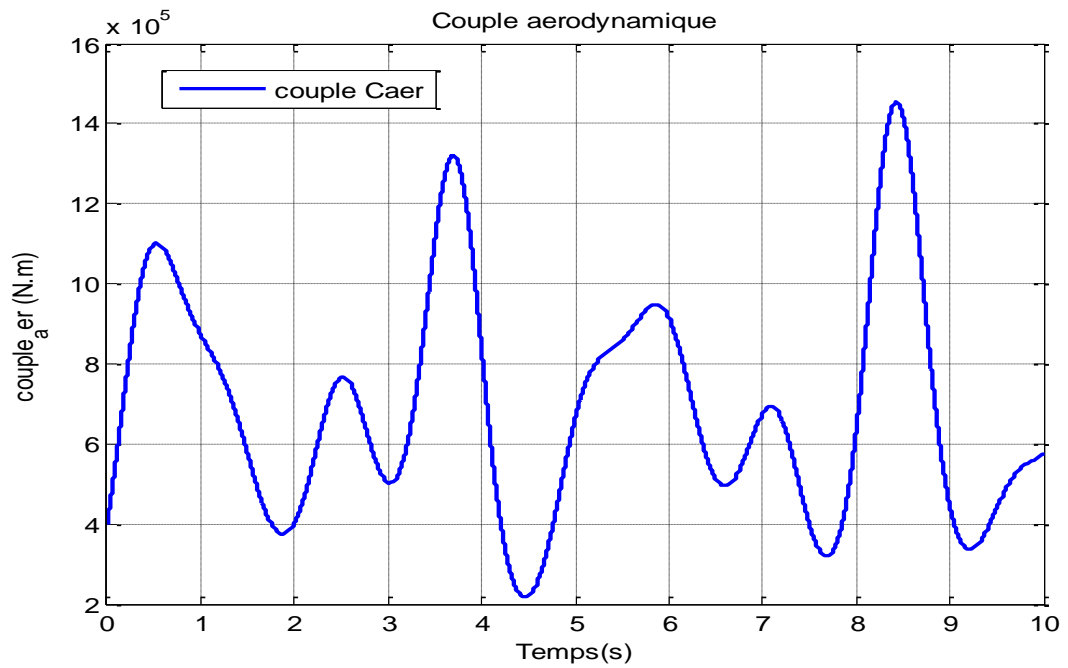
**Figure 2.16** profil de vent utilisé



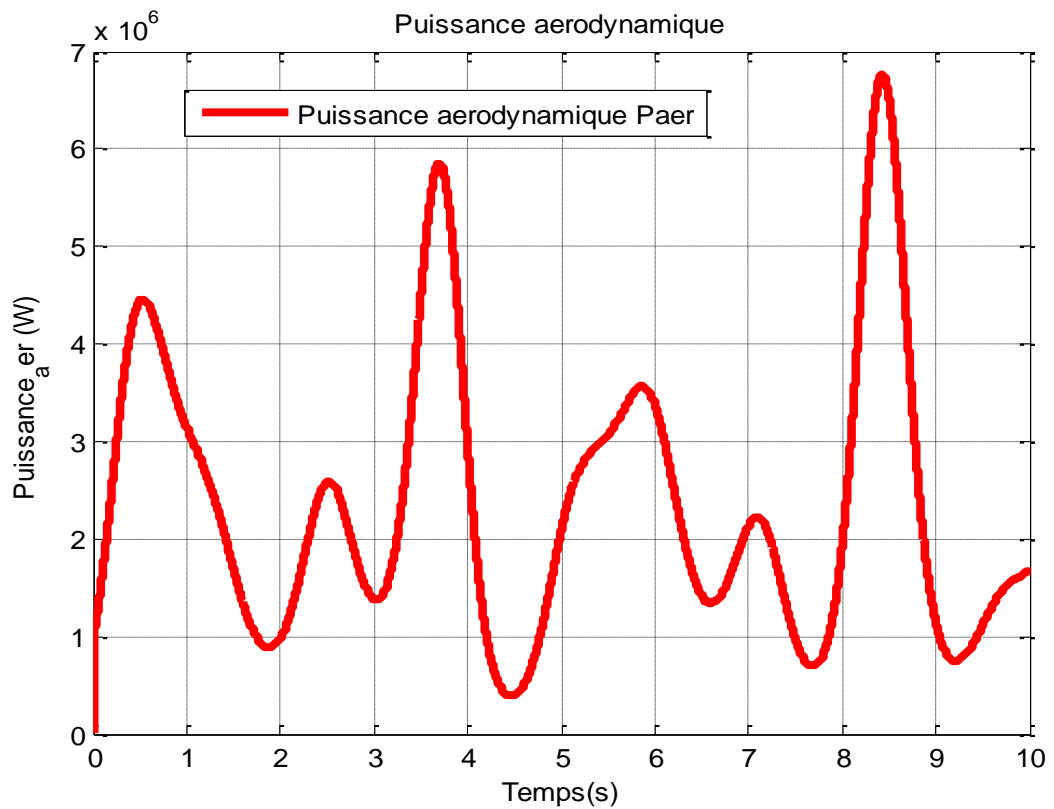
**Figure 2.17** vitesse de la turbine en rad/s



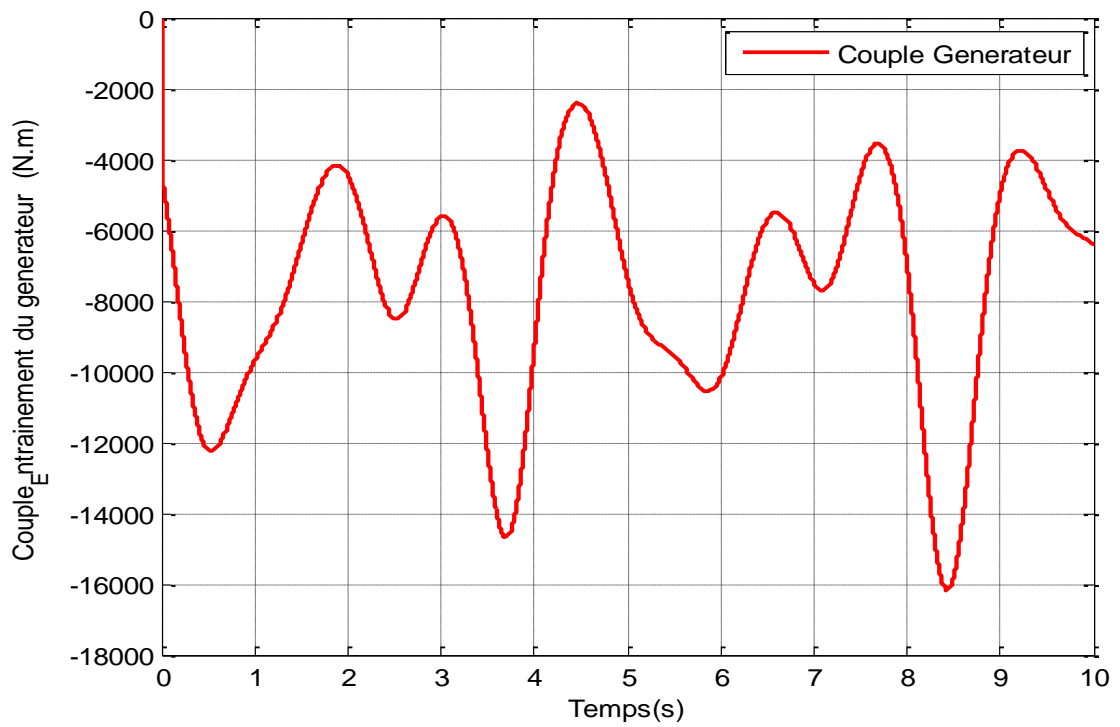
**Figure 2.18** Vitesse de la turbine en tr/min



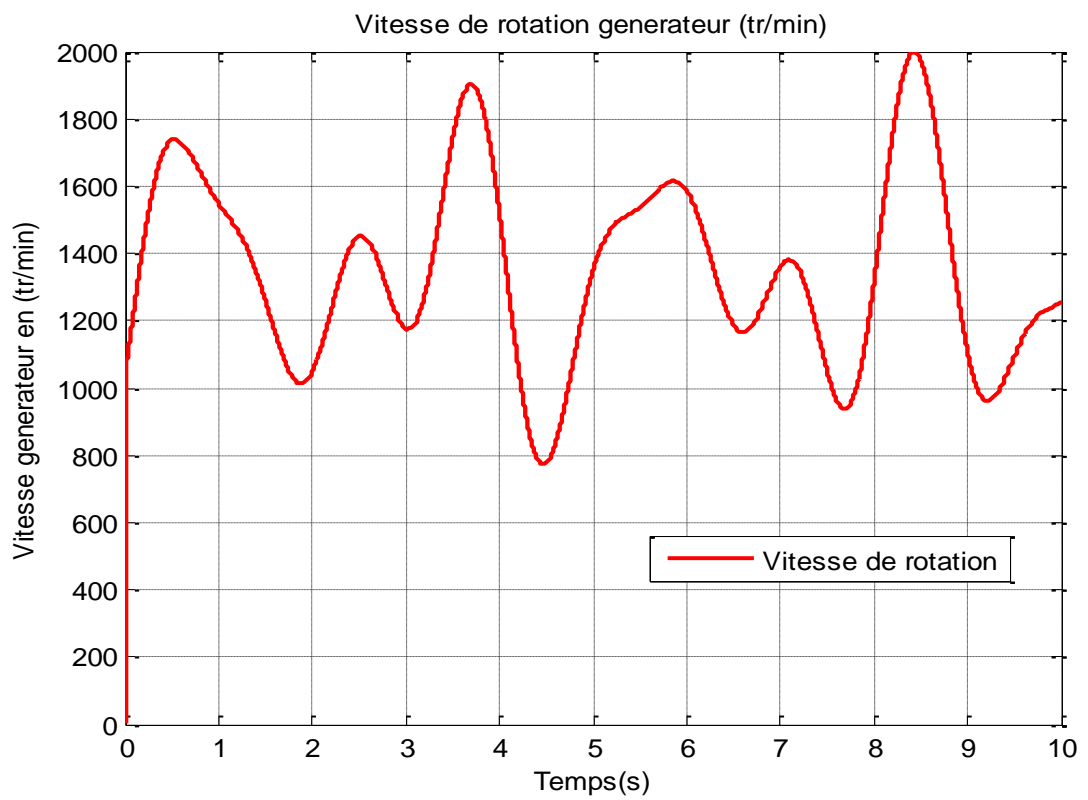
**Figure 2.19** Couple aérien développé



**Figure 2.20** Puissance aérodynamique de la turbine



**Figure 2.21** Couple d'entrainement du générateur



**Figure 2.22** Vitesse d'entrainement du générateur

### Interprétation des résultats

La simulation est conduite avec un coefficient de puissance  $C_p = 0.5$  optimal et ( $\lambda = 0.92$ ) et les courbes obtenues sont montrées ci-dessus.

Le contrôle de la turbine en zone MPPT nous a permis de mettre en évidence le caractère aléatoire de la production de puissance donnée par les courbes de puissance **Figure 2.20** et de couple aérodynamique **Figure 2.19** pour des vitesses de rotation du rotor de quelques 20 à 40 tr/min **figure 2.17.** et **Figure 2.18**

Le couple d'entraînement du générateur est donné par la courbe **Figure 2.21** et la vitesse de rotation du générateur est donnée en **Figure 2.22**. On remarque bien que la vitesse est influencée par la variation de la vitesse du vent et reste autour d'une valeur moyenne proche 1500 tr/min.

Le couple éolien représenté en **Figure 2.19**, présente des valeurs en couple aérodynamique de quelques  $2,2 \cdot 10^5$  Nm minimum à environ  $14,8 \cdot 10^5$  Nm maximum, avec des variations dans la zone de fluctuations.

Dans cette zone MPPT la machine est considérée comme stable et développe un couple que l'on peut utiliser comme référence pour une commande en couple.

### **Conclusion**

Dans ce chapitre on a vu la modélisation de la turbine, qui a permis de passer à l'asservissement du système global et cela en vue de pouvoir utiliser le couple de contrôle comme référence pour une commande directe de couple DTC voir chapitre 4.

On remarque que le couple d'entraînement est très fluctuant puisqu'il reste dépendant de la vitesse du vent malgré que la vitesse moyenne du générateur soit de 1500 tr/min, c'est pour cette raison qu'on utilise la caractéristique de réglage dans la zone MPPT.

En commandant le couple en zone MPPT, on peut de suite contrôler la puissance électrique active (lié directement au couple) injectée au réseau ou dite produite , ce mode de réglage est très intéressant puisqu' on peut optimiser le contrôle en suivant les variations de la vitesse du vent en suivant la caractéristique des maximums locaux pour chaque valeur moyenne du vent.

Ainsi on préfère commander la machine GADA par une variable électromagnétique qui est le couple qui est lié a la puissance active directement, est plus intéressant que de contrôler la machine avec une variable mécanique comme la vitesse de rotor qui dépend significativement des rafales de vent qui sont très aléatoires.

## CHAPITRE 3

### Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

#### 3.1- Introduction

Une machine asynchrone à double alimentation MADA est identique dans son principe à une machine asynchrone à rotor en court-circuit, mais construite avec un rotor bobiné à 3 enroulements similaire au bobinage du stator.

Le bobinage du rotor est accessible à travers un système de bagues et de balais on peut dire simplement que cette machine est identique à un transformateur dont le secondaire (rotor) tourne avec une pulsation  $\omega_m$ .

En alimentant le stator avec un système de tensions triphasées équilibrées on a alors l'apparition d'un champ tournant de vitesse  $n_s$  en tr/min.

$$\text{glissement} = s = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s}; \quad \omega_s = 314 \text{ rad/sec}; \quad \omega_m = p\Omega_m \text{ en rad/sec}$$

$$= \frac{n_s - n_m}{n_s}; \quad n_s = \frac{60f_s}{p} \text{ tr/min}$$

Ou,  $\Omega_m = \text{vitesse mécanique du rotor}$

$f_s = 50$  Hz. Fréquence de la tension statorique.

$p =$  nombres de paires de pôles de la machine.

L'apparition de ce champ dans l'entrefer de la machine va induire une fem = force électromotrice  $e_{ind}$ , dans le conducteur du rotor.

$$e_{ind} = (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot \vec{L}$$



- $e_{ind}$  : f e m d'induction dans chaque conducteur du rotor en (V).
- $v$  : vitesse d'un conducteur du rotor par rapport au champ tournant du stator en (m/s)
- $B$  : induction du champ stator en (Tesla).
- $L$  : Longueur active du conducteur soumise au champ d'induction su stator(m).

si  $n_m$  (tr/min ) est la vitesse mécanique du rotor on les relations pour le glissement  $s$ .

### Description de la machine

#### Le stator

Il est constitué de trois enroulements alimentés par des tensions triphasées de fréquence,  $f$ , qui produisent ainsi un champ magnétique tournant résultant dans l'entrefer  $\vec{B}$ , à la fréquence de rotation,  $n_s$ , appelée fréquence de synchronisme :

$$n_s = \frac{f_s}{p}$$

- $n_s$  La fréquence de rotation du champ  $\vec{B}$  en tours par seconde [ $\text{tr.s}^{-1}$ ]
- $f_s$  La fréquence des tensions d'alimentation en Hertz [Hz]
- $p$  Le nombre de paires de pôles de la machine.

#### Le rotor

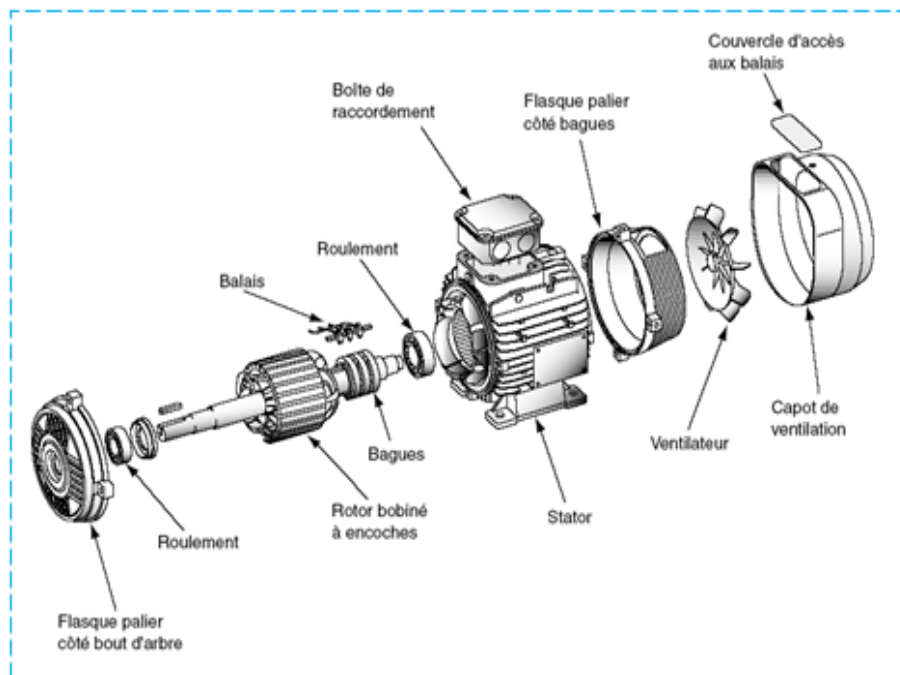
La vitesse de rotation du rotor est appelée  $n_r$ , il tourne moins vite que le champ tournant du stator, l'enroulement rotorique n'est relié à aucune source extérieure. Les seuls courants qui le traversent sont les courants de Foucault induits par la rotation du champ statorique.

On distingue :

- Rotor à cage d'écureuil : Il est constitué de barres métalliques identiques dont les extrémités sont réunies entre elles par des couronnes métalliques peu résistives.

L'ensemble présente une résistance électrique très faible, on dit que le rotor est en court-circuit.

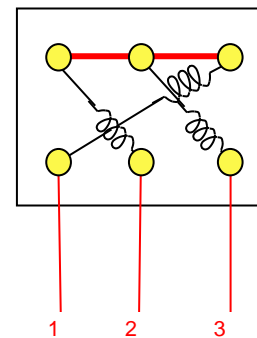
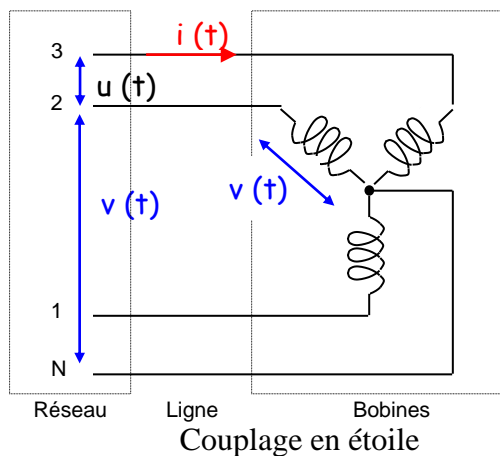
- Rotor bobiné : Les tôles de ce rotor sont munies d'encoches où sont placés des conducteurs formant un bobinage le plus souvent triphasé, trois bagues et trois balais sont prévus pour accéder à ces enroulements, permettant de modifier certaines des caractéristiques électriques du circuit rotorique les deux couplage étoile ou triangle sont permis pour l'enroulement du rotor . **Figure 3.1**



**Figure 3.1** Vue éclatée de la MADA [22]

Les couplages usuels pour cette machine sont :

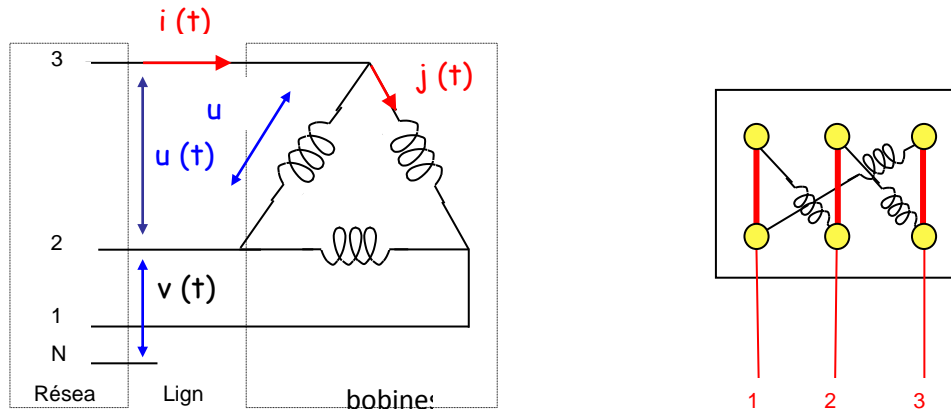
### Le couplage en étoile



Câblage du stator/rotor

Dans un couplage en étoile, chaque enroulement est soumis à la tension simple  $v(t)$ , tension entre phase et neutre et chaque enroulement est traversé par un le courant de ligne  $i(t)$ .

### Le couplage en triangle



**Couplage en triangle**

**Câblage du stator/rotor**

Dans un couplage en triangle, chaque enroulement est soumis à la tension composée,  $u(t)$ , tension entre deux phases.

Chaque enroulement est traversé par le courant  $j(t)$  de valeur efficace  $J$ .

### **3.2- Régime permanent de la machine asynchrone double alimentation.**

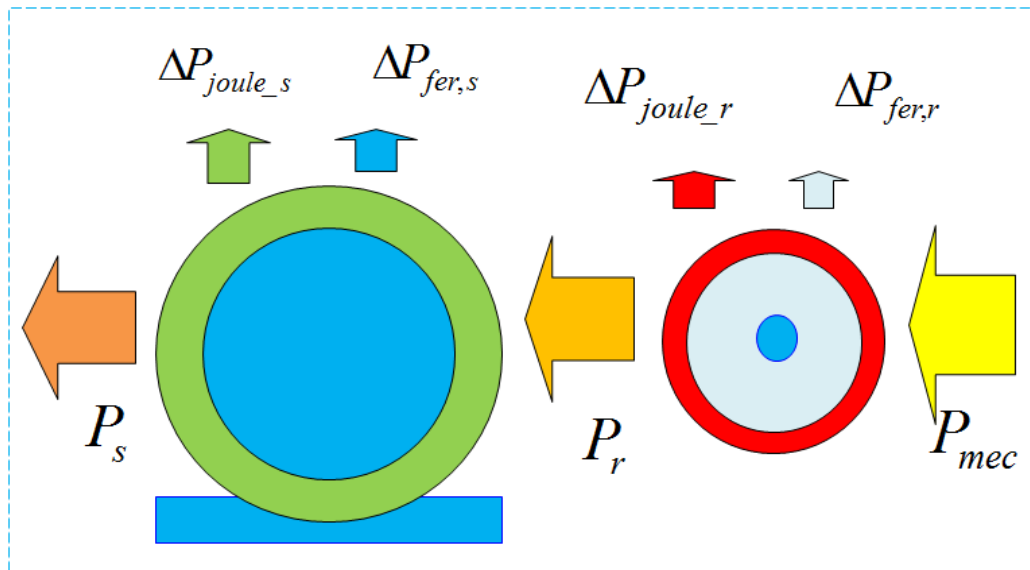
Dans cette section nous allons décrire le mode de fonctionnement de la MADA en régime permanent [9].

Comme le mode de fonctionnement dépend du régime de la vitesse et du couple produit. pour une machine dont le stator et rotor sont connectés à un réseau équilibré et la machine peut travailler dans les quatre quadrants.

$P_{mec}$  Puissance mécanique sur l'arbre de la machine

$P_s$  Puissance échange avec le stator

$P_r$  Puissance échange avec le rotor ou puissance de glissement.



**Figure 3.2** Flux de puissance active dans la MADA [9].

Pour un bilan de puissance on a,

$$P_{mec} = P_s + P_r + \Delta P_{joules} + \Delta P_{joule,r} \quad (3.1)$$

Prenant la situation où la machine est considérée comme un système conservatif de se fait il y a ni pertes électrique, ni pertes mécanique **Figure 3.2**

On peut alors utiliser l'approximation suivante :

$$P_s + P_r = P_{mec} \quad (3.2)$$

En tenant compte de la relation entre le couple et la puissance active on obtient :

$$\frac{T_{em} \cdot \omega_s}{p} - \frac{T_{em} \cdot \omega_r}{p} = \frac{T_{em} \cdot \omega_m}{p} \quad (3.3)$$

$$\omega_s = \omega_r + \omega_m \quad (3.4)$$

Ce qui donne :

En introduisant le glissement (s), la relation entre la puissance active statorique et rotorique est alors donnée par (3.4) :

Avec,

$$-s.P_s = P_r \quad (3.5)$$

Glissement  $s$  est,

$$s = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s} \quad (3.6)$$

$$\omega_r = s.\omega_s \quad (3.7)$$

Considérons que la machine fonctionne en mode moteur avec un couple constant mais supposons que la vitesse est variable.

La **Figure 3.3** montre les puissances actives de la machine dans un digramme bilan en mode moteur donnant la puissance extraite utile.

En prenant la vitesse de synchronisme comme référence, la machine peut travailler dans quatre régions différentes dans le plan couple vitesse de la caractéristique mécanique de la machine.

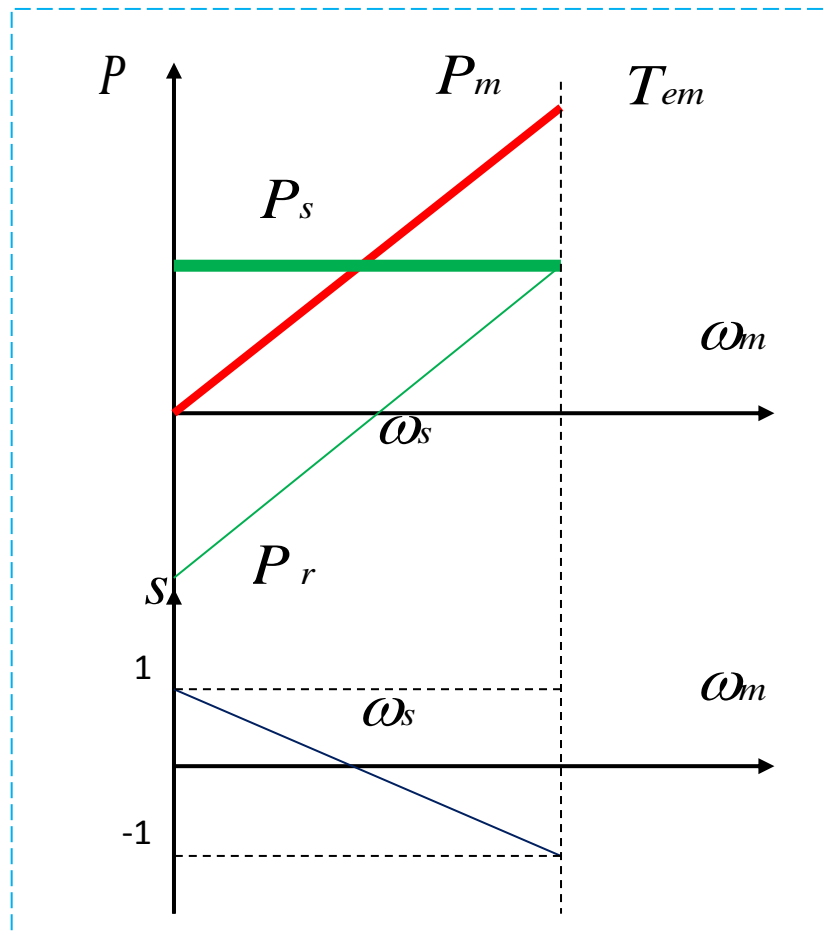
Dans la section suivante les modes opératoires de la machine sont décrits avec plus de détails avec les digrammes vectoriels associés.

Les modes de fonctionnements sont :

- **Mode 1** *Moteur à vitesse hypersynchrone*
- **Mode 2** *Générateur à vitesse hypersynchrone*
- **Mode 3** *Générateur à vitesse hyposynchrone*
- **Mode 4** *Moteur à vitesse hyposynchrone*

En régime permanent on peut écrire pour résumer mes quatre modes de fonctionnements.

$$\begin{aligned} \text{glissement} = s &= \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s}; & \omega_s &= 314 \text{ rad/sec}; & \omega_m &= p\Omega_m \\ &= \frac{n_s - n_m}{n_s}; & n_s &= \frac{60f_s}{p} \text{ tr/min} \end{aligned}$$



**Figure 3.3** Bilan de puissance mode moteur de la MADA [9].

$$\begin{aligned} n_m &= n_s(1-s) & \omega_r &= \omega_s - \omega_m & s &= \frac{\omega_r}{\omega_s} \Rightarrow \omega_r = s\omega_s \Rightarrow f_r = sf_s \\ \omega_m &= \omega_s(1-s) \end{aligned}$$

- $\omega_m < \omega_s$  dans ce cas  $\omega_r > 0$  et le Glissement  $s > 0 \rightarrow$  Mode hyposynchrone.
- $\omega_m = \omega_s$  dans ce cas  $\omega_r = 0$  et le Glissement est nul  $s = 0 \rightarrow$  Mode synchrone
- $\omega_m > \omega_s$  dans ce cas  $\omega_r < 0$  et le Glissement  $s < 0 \rightarrow$  Mode hypersynchrone

On distingue en fonction de la vitesse d'entraînement deux modes.

- ✓ Mode générateur.
- ✓ Mode moteur

$$P_s = \frac{\omega_s}{p} T_{em} \qquad P_r = \frac{-\omega_r}{p} T_{em}$$

$T_{em}$  = Couple électromagnétique.

Les puissances  $P_s$  du stator et  $P_r$  du rotor qui sont liées au couple électromagnétique et au glissement en régime permanent **Figure 3.3** [9].

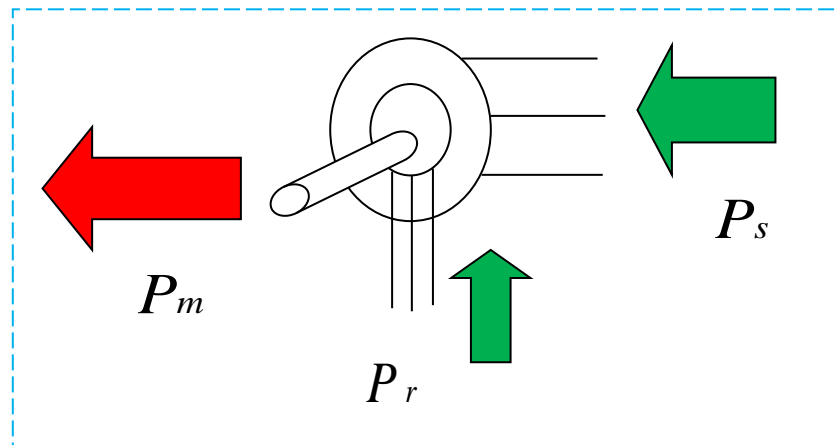
Mode	Vitesse et Glissement	$P_m$	$P_s = \frac{\omega_s}{p} T_{em}$	$P_r = \frac{-\omega_r}{p} T_{em}$
<b>Moteur</b> Hypo synchrone Tem>0	$s < 0$  $\omega_m > \omega_s$	$> 0$  La machine <b>fournie</b> de la puissance mécanique	$< 0$  la machine <b>reçoit</b> de la puissance électrique par le stator	$> 0$  la machine <b>fournie</b> de la puissance électrique par le rotor
<b>Generateur</b> Hypo synchrone Tem < 0	$s < 0$  $\omega_m > \omega_s$	$< 0$  La machine <b>reçoit</b> de la puissance mécanique	$> 0$  La machine <b>fournie</b> de la puissance électrique Par le stator	$< 0$  la machine <b>reçoit</b> de la puissance électrique par le rotor
<b>Generateur</b> Hyper synchrone Tem < 0	$s > 0$  $\omega_m < \omega_s$	$< 0$  La machine <b>reçoit</b> de la puissance mécanique	$> 0$  La machine <b>fournie</b> de la puissance électrique par le stator	$> 0$  la machine <b>fournie</b> de la puissance électrique par le rotor
<b>Moteur</b> Hyper synchrone Tem > 0	$s > 0$  $\omega_m < \omega_s$	$> 0$  La machine <b>fournie</b> de la puissance mécanique	$< 0$  la machine <b>reçoit</b> de la puissance électrique par le stator	$< 0$  la machine <b>reçoit</b> de la puissance électrique par le rotor

Tableau 31 Modes de fonctionnement de la MADA

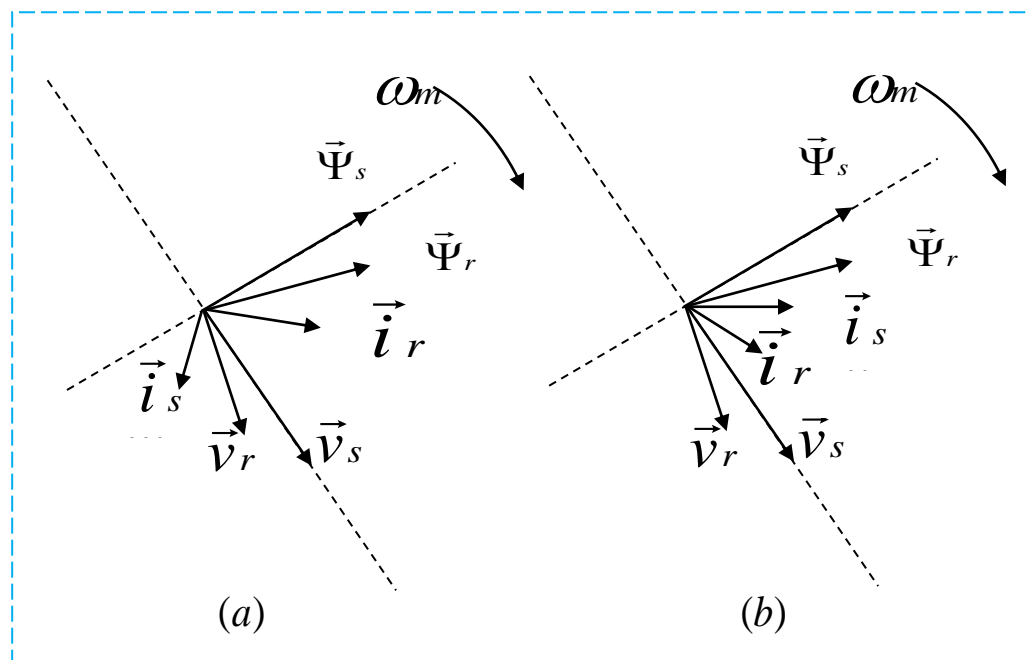
En prenant la vitesse de synchronisme comme référence, la machine peut travailler dans quatre régions différentes dans le plan couple vitesse de la caractéristique mécanique de la machine.

Dans la section suivante les modes opératoires de la machine sont décrits avec les digrammes vectoriels simplifiés sont réunis en les **Figure 3.4** à la **Figure 3.11**.

### 3.2.1 Mode moteur a vitesse hypersynchrone.



**Figure 3.4** Mode moteur a vitesse hypersynchrone. [9].



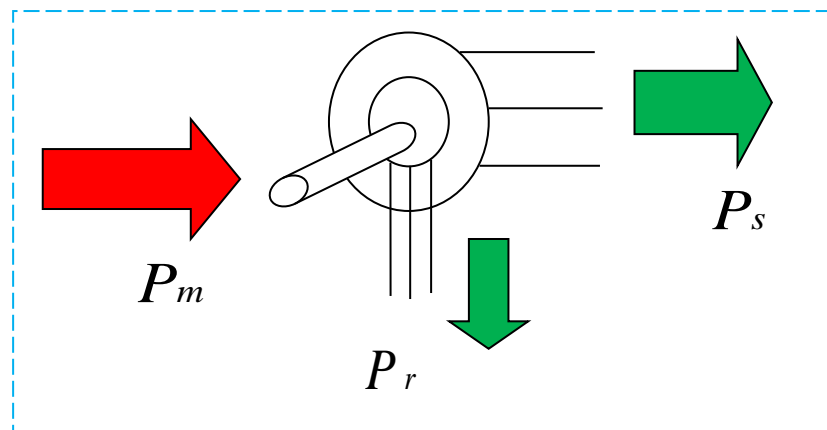
**Figure 3.5** Diagramme vectoriel de la DFIM en mode 1 référentiel ramené au rotor[9].

(a)  $Q_s < 0$ ,

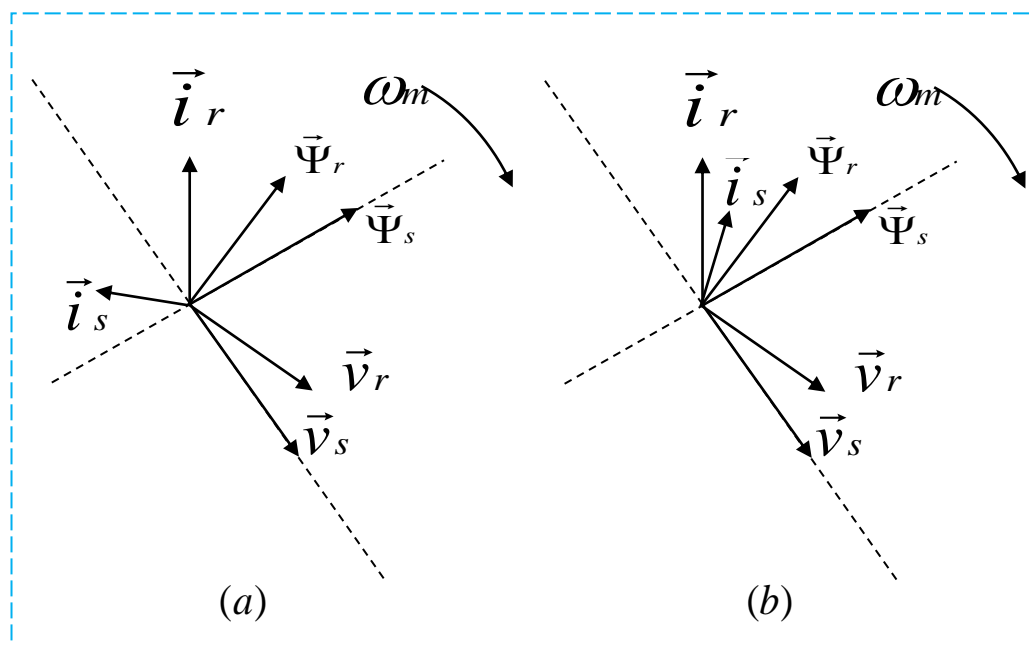
(b)  $Q_s > 0$ .



### 3.2.2 Mode générateur a vitesse hypersynchrone.



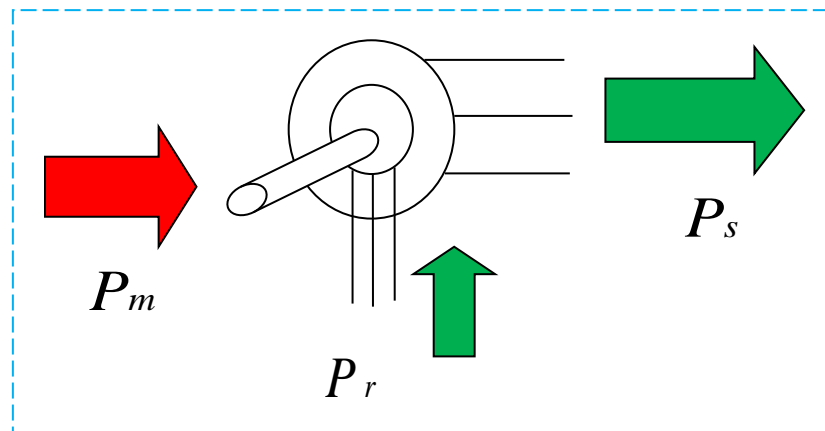
**Figure 3.6** Mode générateur a vitesse hypersynchrone. [9].



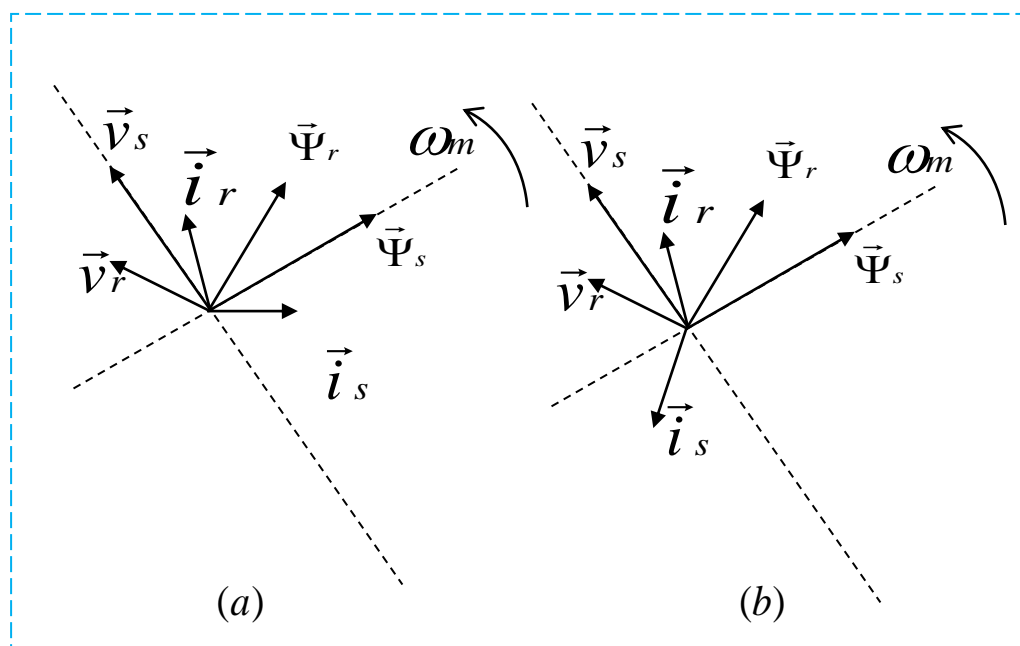
**Figure 3.7** Diagramme vectoriel de la DFIM en mode 2 référentiel ramené au rotor[9].

(a)  $Q_s < 0$ ,      (b)  $Q_s > 0$ .

### 3.2.3 Mode générateur a vitesse hyposynchrone.



**Figure 3.8** Générateur a vitesse hyposynchrone. [9].

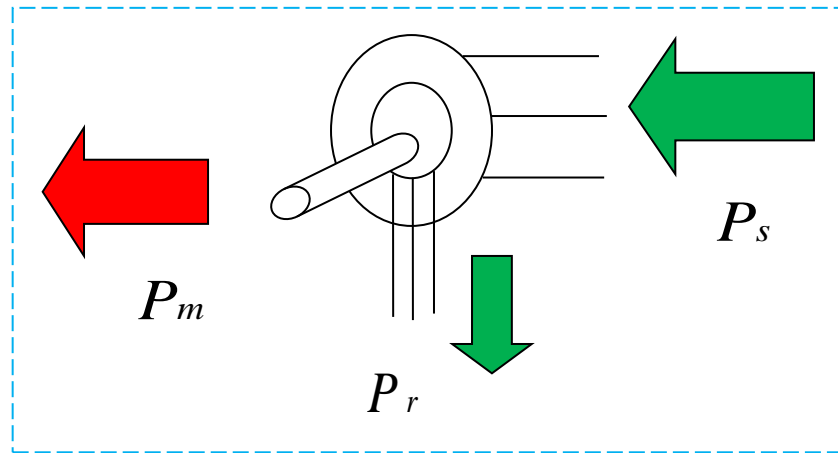


**Figure 3.9** Diagramme vectoriel de la DFIM en mode 3 référentiel ramené au rotor [9].

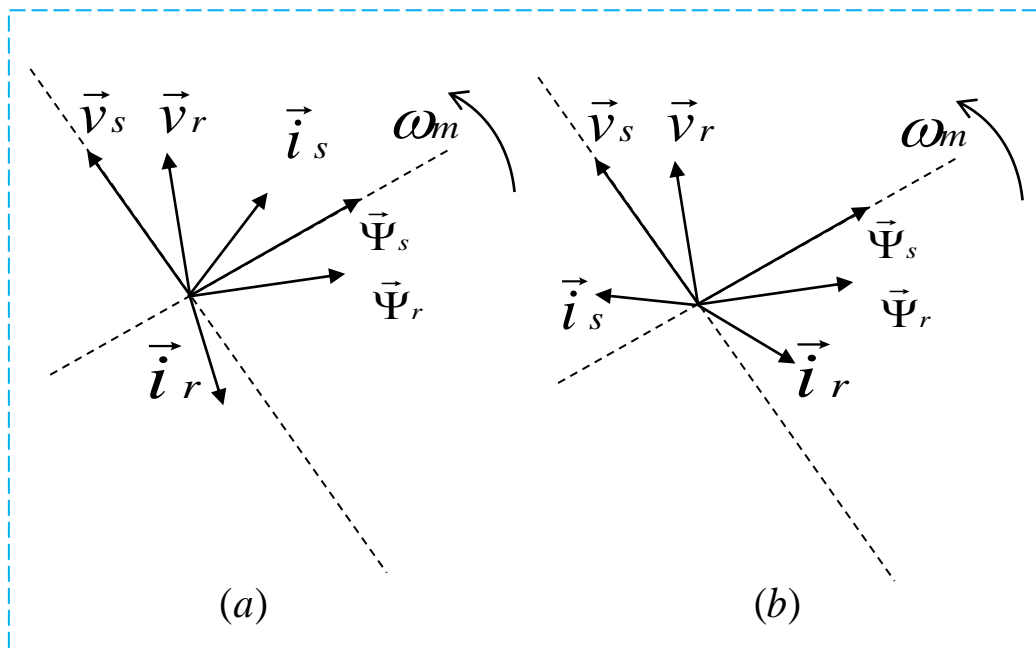
(a)  $Q_s > 0$

(b)  $Q_s < 0$ .

### 3.2.4 Mode moteur a vitesse hyposynchrone.



**Figure 3.10** moteur a vitesse hyposynchrone. [9].

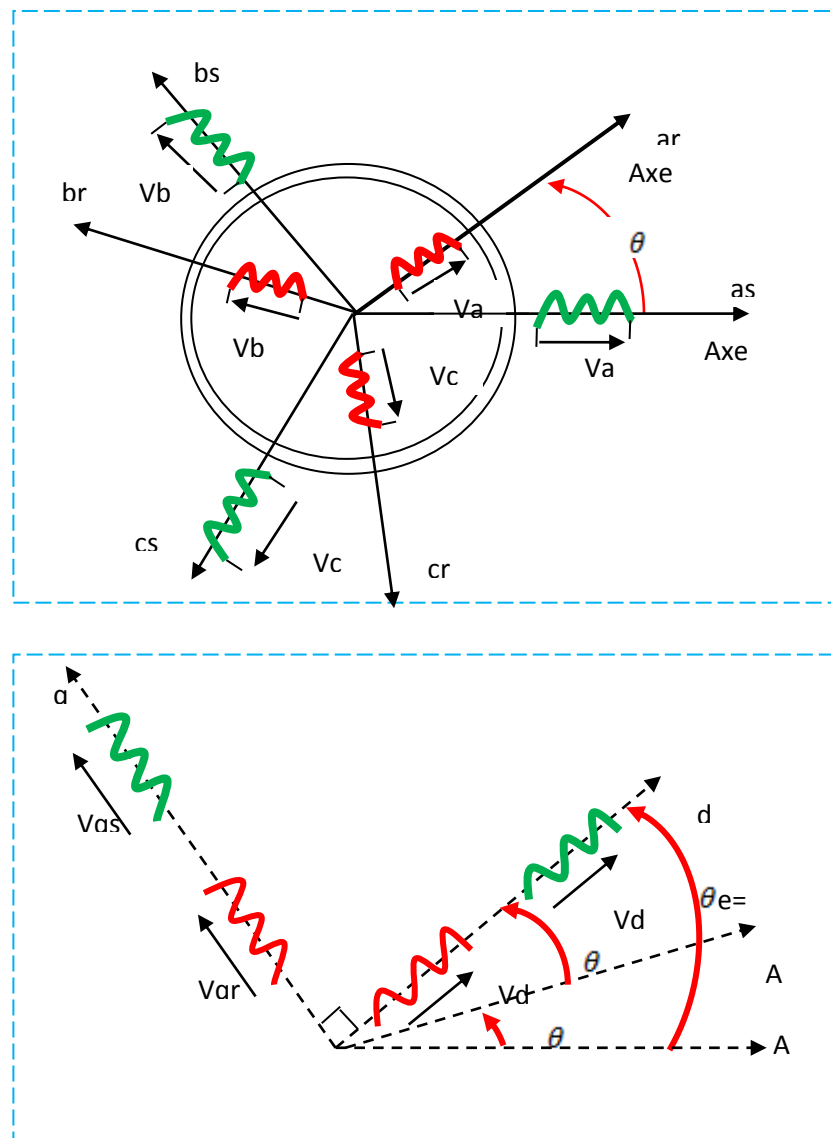


**Figure 3.11** Diagramme vectoriel de la DFIM en mode 4 référentiel ramené au rotor[9].

(a)  $Q_s > 0$ ,      (b)  $Q_s < 0$ .

### 3.3- Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

Comme nous l'avons précédemment vu, la machine asynchrone à double alimentation est une machine asynchrone classique à rotor accessible [1] [15] [25] [36]. Considérant une machine asynchrone triphasée à rotor bobiné au stator et au rotor représenté par la figure 3 et dont les phases sont repères respectivement **as**, **bs**, **cs** et **ar**, **br**, **cr** et l'angle électrique  $\theta$  variable en fonction du temps définit la position relative instantanée entre les axes magnétiques des phases **ar** et **as** choisis comme axes de référence **Figure 3.12**. [48]



**Figure 3.12** Représentation de la MADA dans les deux repères  $(abc)$  et  $(dq)$ . [1]

Donc, le modèle de la MADA est le même que celui de la MAS avec l'exception des tensions rotoriques non nulles.

- a) Représentation de la MADA dans le repère (abc)
- b) Représentation de la MADA dans (dq).

### 3.3.1 Hypothèses simplificatrices

Afin d'établir un modèle simple de la MADA, nous avons pris en considération certaines hypothèses simplificatrices à savoir [1] [27] [36].

- La géométrie de la machine est symétrique ;
- Le circuit magnétique est parfaitement feuilleté, au stator et au rotor, la saturation est négligeable ;
- La densité de courant est considérée uniforme dans la section des conducteurs élémentaires ;
- Les résistances des enroulements ne dépendent pas de la température ;
- Les forces magnétomotrices créées par le stator ou le rotor ont une répartition sinusoïdale ;
- L'épaisseur de l'entrefer est uniforme.

### 3.3.2 Equations électriques et l'équation mécanique de la MADA

#### Équations électriques

Les équations générales de la machine dans le repère abc. **Figure 3.13**

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d[\varphi_s]}{dt} \\ [V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d[\varphi_r]}{dt} \end{cases} \quad (3.8)$$

Avec,

$$[I_s] = \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} \quad [I_r] = \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} \quad [V_s] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad [V_r] = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix}$$

et pour le flux statorique et rotorique on a,

$$[\varphi_s] = \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} \quad [\varphi_r] = \begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix}$$

Les matrices de résistances rotorique et statorique sont

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

### Équations magnétiques

Les matrices de liaisons entre flux, courants et inductances sont données par :

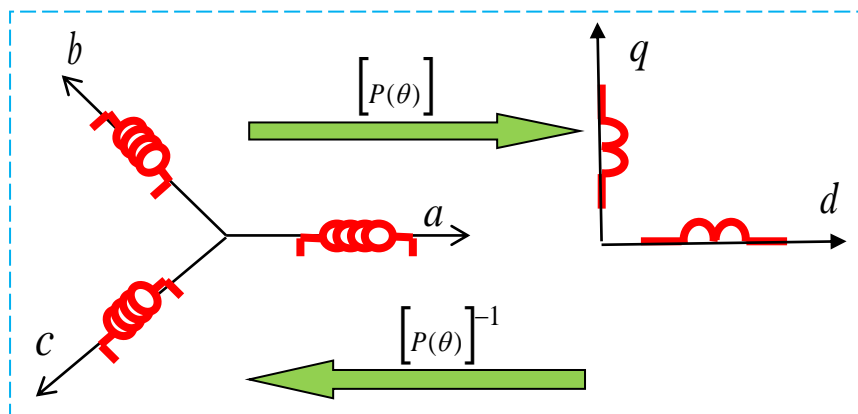
$$\begin{cases} [\varphi_s] = [L_{ss}][I_s] + [M_{sr}][I_r] \\ [\varphi_r] = [M_{rs}][I_s] + [L_{rr}][I_r] \end{cases} \quad (3.9)$$

Avec ;

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix}$$

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T = M \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

### Transformation de Park



**Figure 3.13** Schéma des enroulements avec la transformation de Park [1]

La transformation de Park est un outil mathématique qui permet de transformer les grandeurs statorique et rotorique triphasées en grandeurs équivalentes représentées dans un repère orthogonal.

Elle est constituée d'une transformation triphasée- biphasée abc à dq. **Figure 3.13** .

La matrice de transformation de Park est définie comme suit :

Le passage direct (abc) vers (dq) se fait par.

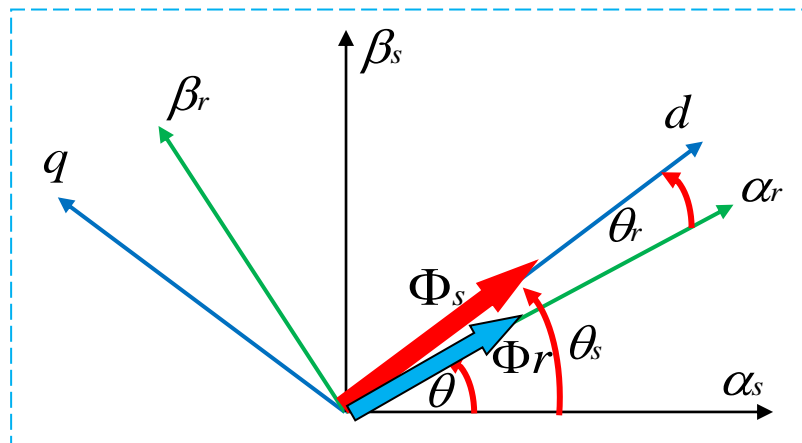
$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Le passage inverse (dq) vers (abc) par.

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Cette transformation s'applique aux tensions, aux courants et au flux.

### 3.3.3 Application de la transformation de Park



**Figure 3.14** Schéma de choix de repère référentiel [1]

En appliquant cette transformation sur chacun des vecteurs, tensions, courants et flux statorique et rotorique, on obtient les équations des flux et des tensions et des courants dans le repère biphasé dq pour le stator et pour le rotor.

### 3.4 Choix du Référentiel

Pour étudier la théorie des régimes transitoires de la machine asynchrone à double alimentation, on peut utiliser trois systèmes d'axes de coordonnées du plan d'axes  $(d,q)$

Dans la suite, les composantes homopolaires sont supposées nulles pour les systèmes triphasés équilibrés. **Figure 3.14**

$$\omega_{\text{coord}} = 0 \quad \text{référentiel lié au stator}$$

$$\omega_{\text{coord}} = p\Omega \quad \text{référentiel lié au rotor}$$

$$\omega_{\text{coord}} = \omega_s \quad \text{référentiel lié au champ tournant}$$

#### 3.4.1 Référentiel Lié au Stator :

Dans ce référentiel, les axes  $(d,q)$  sont immobiles par rapport au stator ( $\omega_{\text{coord}} = 0$ ).

Ce référentiel est le mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées et dont l'avantage ne nécessite pas une transformation vers le système réel. Ce système permet d'étudier les régimes de démarrage et de freinage des machines à courant alternatif.

#### 3.4.2 Référentiel Lié au Rotor :

Dans ce référentiel, les axes  $(d,q)$  sont immobiles par rapport au rotor tournant à une vitesse donc ( $\omega_{\text{coord}} = \omega_s - \omega_r$ ). L'utilisation de ce référentiel permet d'étudier les régimes transitoires dans les machines alternatives synchrones et asynchrones avec une connexion non symétrique des circuits du rotor.

#### 3.4.3 Référentiel Lié au Champ Tournant stator

Dans ce référentiel, les axes  $(d,q)$  sont immobiles par rapport au champ électromagnétique créé par les enroulements statoriques, d'où ( $\omega_{\text{coord}} = \omega_s$ ).



Ce référentiel est généralement utilisé dans le but de pouvoir appliquer une commande de vitesse, de couple, etc. puisque les grandeurs dans ce référentiel sont de forme continue.

Dans ce mémoire, on utilise un référentiel lié au champ tournant avec ( $\omega_{coor} = \omega_s$ ) pour la Modélisation et la commande de la MADA.

### Tensions

$$\begin{cases} [V_{dq0}]_s = [P(\theta_s)][V_s] \\ [V_{dq0}]_r = [P(\theta_s - \theta)][V_r] \end{cases} \quad \begin{cases} [V_s] = [P(\theta_s)]^{-1}[V_{dq0}] \\ [V_r] = [P(\theta_s - \theta)]^{-1}[V_{dq0}] \end{cases} \quad (3.13)$$

### Courants

$$\begin{cases} [I_{dq0}]_s = [P(\theta_s)][I_s] \\ [I_{dq0}]_r = [P(\theta_s - \theta)][I_r] \end{cases} \quad \begin{cases} [I_s] = [P(\theta_s)]^{-1}[I_{dq0}] \\ [I_r] = [P(\theta_s - \theta)]^{-1}[I_{dq0}] \end{cases} \quad (3.14)$$

### Flux

$$\begin{cases} [\varphi_{dq0}]_s = [P(\theta_s)][\varphi_s] \\ [\varphi_{dq0}]_r = [P(\theta_s - \theta)][\varphi_r] \end{cases} \quad \begin{cases} [\varphi_s] = [P(\theta_s)]^{-1}[\varphi_{dq0}] \\ [\varphi_r] = [P(\theta_s - \theta)]^{-1}[\varphi_{dq0}] \end{cases} \quad (3.15)$$

En utilisant la matrice de Park et après simplifications on obtient le système.

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s \varphi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega) \varphi_{dr} \end{cases} \quad (3.16)$$

Sous forme vectorielle on a :

$$\begin{cases} \bar{V}_s = R_s \bar{I}_s + \frac{d\bar{\varphi}_s}{dt} - J\omega_s \bar{\varphi}_s \\ \bar{V}_r = R_r \bar{I}_r + \frac{d\bar{\varphi}_r}{dt} + J(\omega_s - \omega) \bar{\varphi}_r \end{cases} \quad (3.17)$$

et,

$$J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

J= est la matrice de rotation.

Les expressions des flux sont alors

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s I_{ds} + M \cdot I_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s I_{qs} + M \cdot I_{qr} \\ \varphi_{dr} = L_r I_{dr} + M \cdot I_{ds} \\ \varphi_{sd} = L_r I_{qr} + M \cdot I_{qs} \end{cases} \quad (3.18)$$

Pour pouvoir décrire le système on va l'écrire sous forme matricielle avec des coefficients constants.

### 3.4.4 Mise sous forme d'équation d'état

La matrice générale après remplacements.

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + L_s \frac{dI_{ds}}{dt} + M \frac{dI_{dr}}{dt} - \omega_s L_s I_{qs} - \omega_s M I_{qr} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + L_s \frac{dI_{qs}}{dt} + M \frac{dI_{qr}}{dt} + \omega_s L_s I_{ds} - \omega_s M I_{dr} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + L_r \frac{dI_{dr}}{dt} + M \frac{dI_{ds}}{dt} - \omega_s L_r I_{qr} - \omega_s M I_{qs} + \omega L_r I_{qr} + \omega M I_{qs} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + L_r \frac{dI_{qr}}{dt} + M \frac{dI_{qs}}{dt} + \omega_s L_r I_{dr} + \omega_s M I_{ds} - \omega L_r I_{dr} - \omega M I_{ds} \end{cases} \quad (3.19)$$

Sous forme de matrices on a :

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \\ + \omega_s \begin{bmatrix} 0 & -L_s & 0 & -M \\ L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & -M & 0 & -L_r \\ M & 0 & L_r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \\ -M & 0 & -L_r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

$$[V] = [A][I] + [B] \frac{d}{dt} [I] + \omega_s [C][I] + \omega [D][I] \quad (3.21)$$

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} \quad [I_s] = \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \quad [\varphi_s] = \begin{bmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \\ \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix}$$

les matrices  $[A]$ ,  $[B]$ ,  $[C]$  et  $[D]$  sont donnés par.

$$[A] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \quad [B] = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix}$$

$$[C] = \begin{bmatrix} 0 & -L_s & 0 & -M \\ L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & -M & 0 & -L_r \\ M & 0 & L_r & 0 \end{bmatrix} \quad [D] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \\ -M & 0 & -L_r & 0 \end{bmatrix}$$

On peut exprimer les puissances au stator et au rotor par :

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \end{cases} \quad \begin{cases} P_r = V_{dr} I_{dr} + V_{qr} I_{qr} \\ Q_r = V_{qr} I_{dr} - V_{dr} I_{qr} \end{cases} \quad (3.22)$$

Le couple électromagnétique est régime permanent donné par.

$$C_{em} = \frac{P_m}{\Omega_s} \quad \Omega_s = \frac{\omega_s}{p} \quad C_{em} = p \frac{P_m}{\omega_s} \quad (3.23)$$

En utilisant les flux et les courants on a pour expression de couple instantané.

$$C_{em} = p(\varphi_{r\alpha} \cdot I_{r\beta} - \varphi_{r\beta} \cdot I_{r\alpha})$$

$$C_{em} = pM(I_{qs} I_{dr} - I_{ds} I_{qr})$$

$$C_{em} = p(\varphi_{ds} I_{qs} - \varphi_{qs} I_{ds})$$

$$C_{em} = p \frac{M}{L_r} (\varphi_{dr} I_{qs} - \varphi_{qr} I_{ds}) \quad (3.24)$$

Et pour les pulsations la relation on a.

Avec,

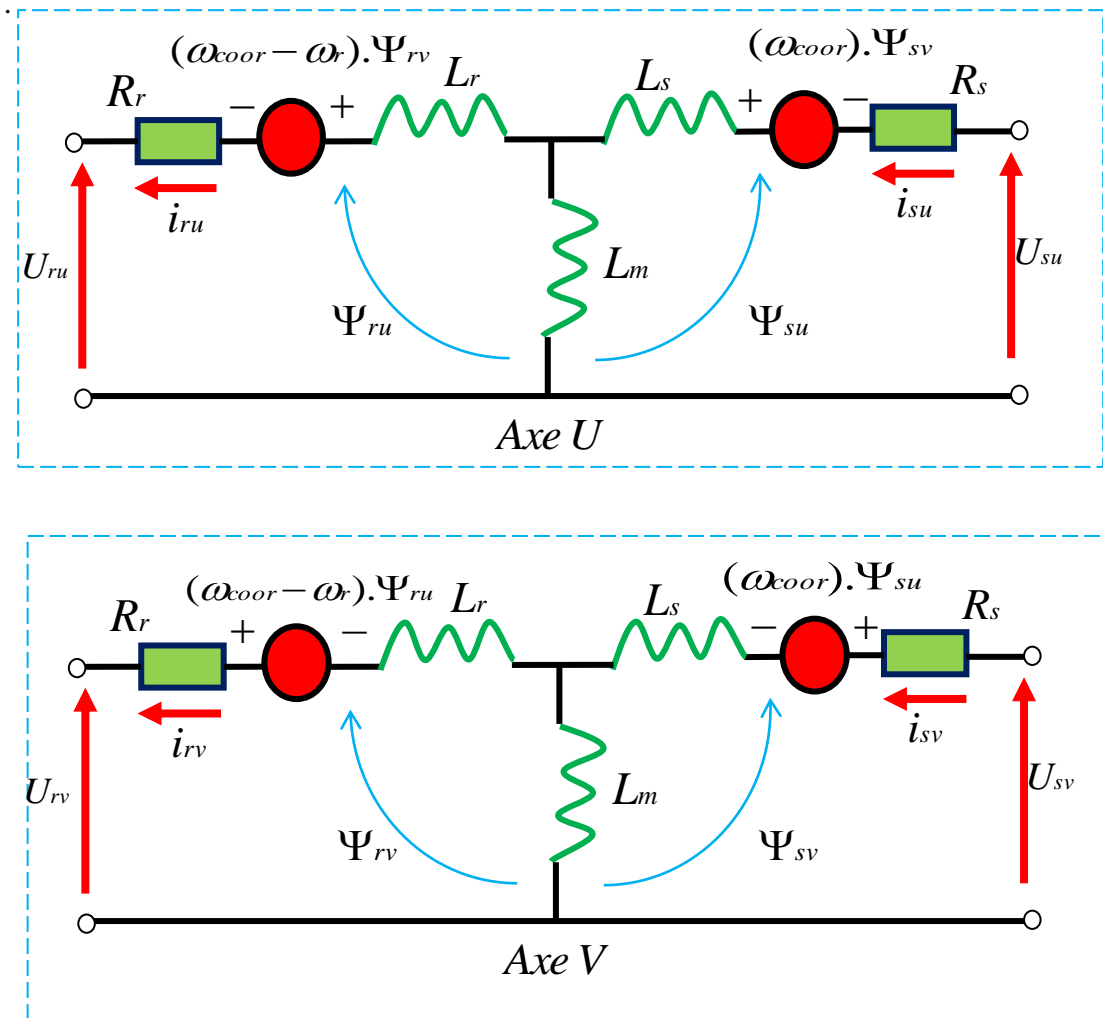
$$\omega_r = \omega_s - p\Omega$$

$$\theta_r = \int_0^t \omega_r dt \qquad \theta_s = \int_0^t \omega_s dt \qquad (3.25)$$

Ce modèle d'état lié au champ stator de la machine asynchrone à double alimentation, dans le but de la commande la GADA, sera utilisé en chapitre 4 pour le contrôle DTC.

**Simulation en Mode Générateur – avec débit sur charge résistive**

Dans cette partie nous allons décrire les performances de la machine double alimentée MADA avec un débit sur charge résistive en utilisant la simulation sous Matlab.



**Figure 3.15** Modèle de machine dans le repère UV [1]

Nous commençons cette étude par donner les schémas de MADA dans un référentiel UV quelconque.

On peut alors écrire les équations de la machine

Les équations des tensions dans un système d'axe XY sont de la forme :

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{sx} = -R_s i_{sx} + \frac{d\Psi_{sx}}{dt} - \omega_{ob} \Psi_{sy} \\ U_{sy} = -R_s i_{sy} + \frac{d\Psi_{sy}}{dt} + \omega_{ob} \Psi_{sx} \\ U_{rx} = R_r i_{rx} + \frac{d\Psi_{rx}}{dt} - (\omega_{ob} - \omega_r) \Psi_{ry} \\ U_{ry} = R_r i_{ry} + \frac{d\Psi_{ry}}{dt} + (\omega_{ob} - \omega_r) \Psi_{rx} \end{array} \right. \quad (3.26)$$

De plus les expressions des flux rotorique et statorique dans le même système d'axe :

$$\left\{ \begin{array}{l} \Psi_{sx} = -L_s i_{sy} + M_{sr} i_{rx} \\ \Psi_{sy} = -L_s i_{sx} + M_{sr} i_{ry} \\ \Psi_{rx} = L_r i_{rx} + M_{rs} i_{sx} \\ \Psi_{ry} = L_r i_{ry} + M_{rs} i_{sy} \end{array} \right.$$

Vue la symétrie de la machine l'on  $M_{rs} = M_{sr}$

Et en remplaçant les expressions des flux dans le système d'équations de tensions on a alors :

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{sx} = -R_s i_{sx} - L_s \frac{di_{sx}}{dt} + M \frac{di_{rx}}{dt} + \omega_{ob} L_s i_{sy} + \omega_{ob} M i_{ry} \\ U_{sy} = -R_s i_{sy} - L_s \frac{di_{sy}}{dt} + M \frac{di_{ry}}{dt} - \omega_{ob} L_s i_{sx} + \omega_{ob} M i_{rx} \\ U_{rx} = -R_r i_{rx} - L_r \frac{di_{rx}}{dt} - M \frac{di_{sx}}{dt} - (\omega_{ob} - \omega_r) L_r i_{ry} + (\omega_{ob} - \omega_r) M i_{sy} \\ U_{ry} = -R_r i_{ry} - L_r \frac{di_{ry}}{dt} - M \frac{di_{sy}}{dt} - (\omega_{ob} - \omega_r) L_r i_{sx} + (\omega_{ob} - \omega_r) M i_{sx} \end{array} \right. \quad (3.27)$$

On pose :  $\omega_m = \omega_{ob} - \omega_r$

En écrivant le système d'équations précédentes sous une forme compacte en utilisant une représentation matricielle.

$$[B][U] = [L][I]^* + \omega_m [C][I] + [D][I] \quad (3.28)$$

Avec

$$[U] = [U_{sx} U_{sy} U_{rx} U_{ry}]^T \quad [I] = [I_{sx} I_{sy} I_{rx} I_{ry}]^T \quad [I]^* = \frac{d}{dt} [I]$$

En simplifiant et en écrivant le système sous une représentation d'état on obtient, alors les matrices suivantes :

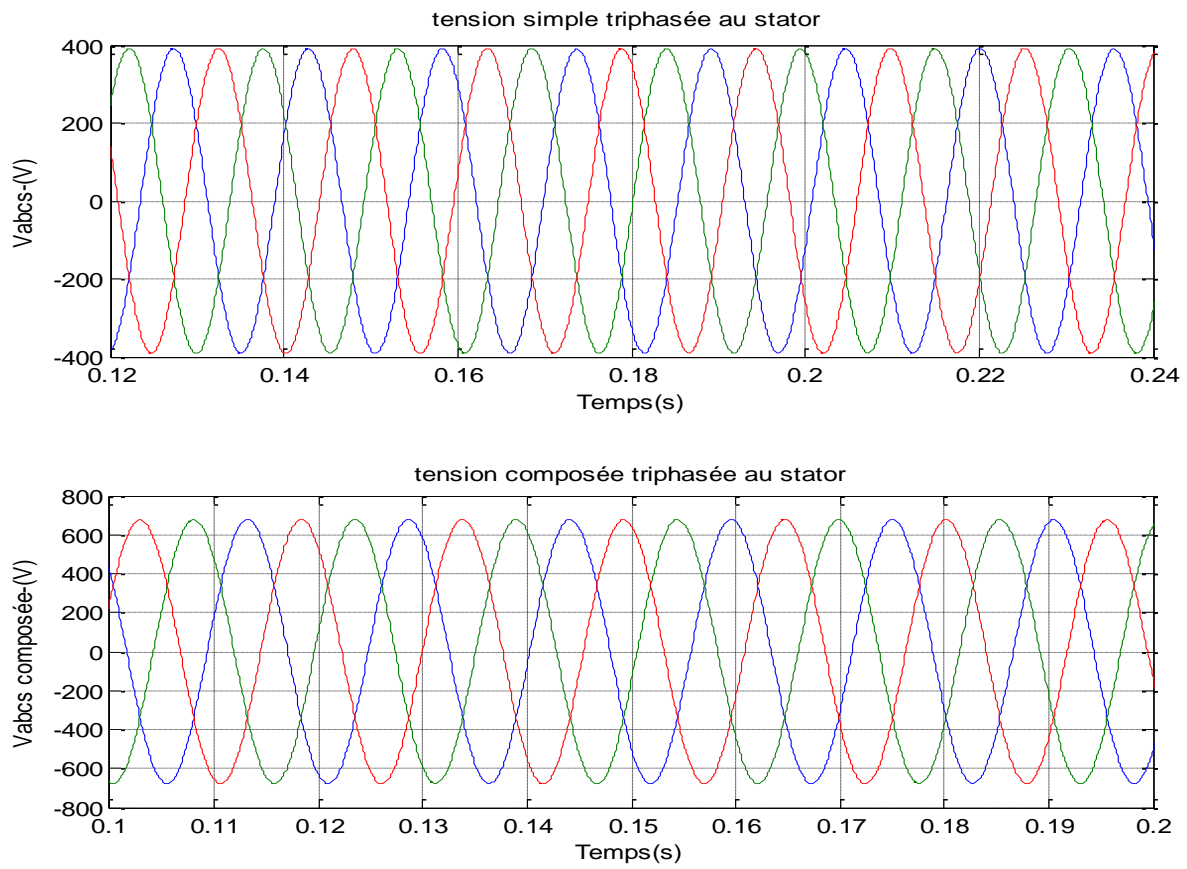
$$[I]^* = [L]^{-1} \{ [B][U] - [D][I] - \omega_m [C][I] \} \quad (3.30)$$

Avec

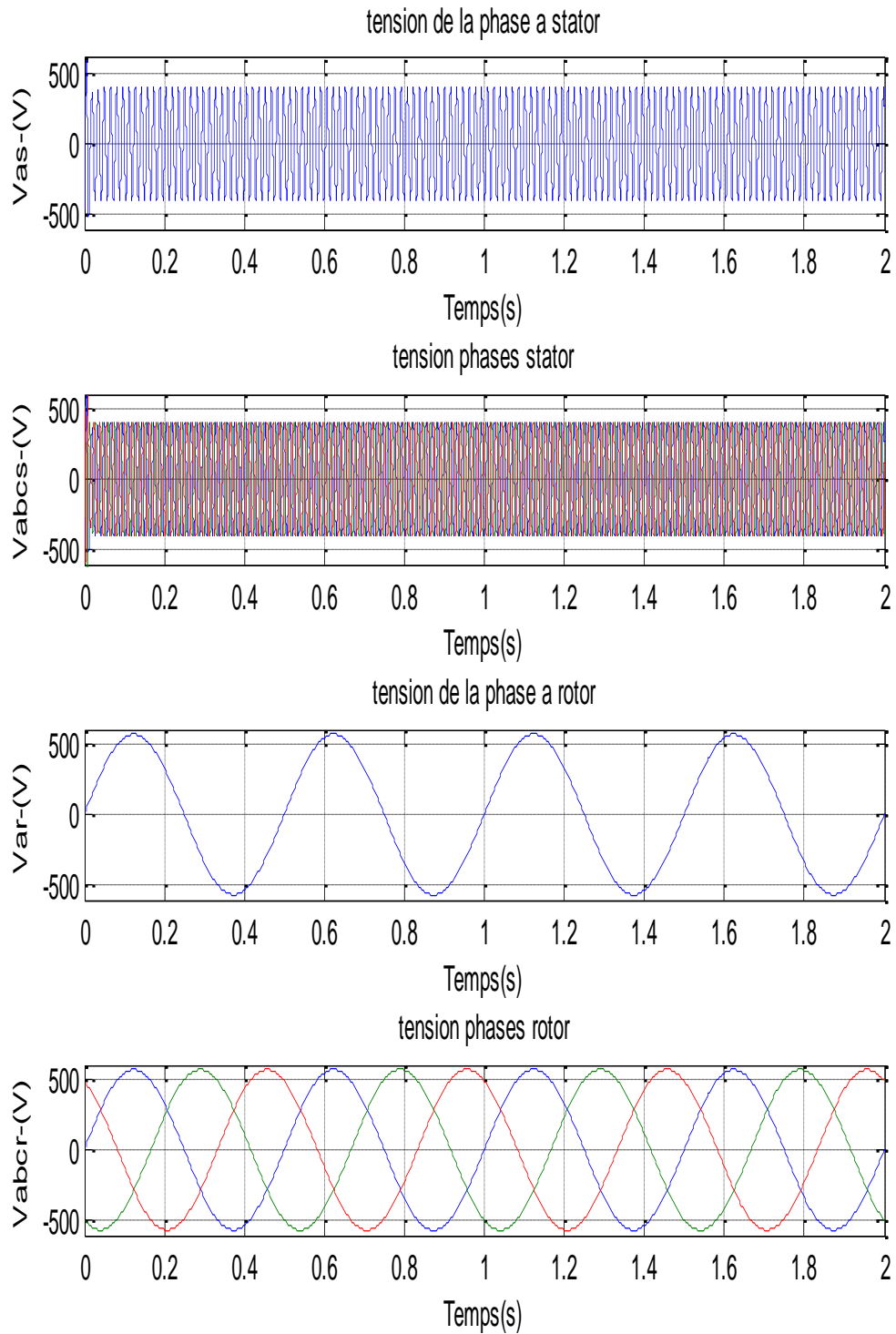
$$[L]^{-1} = \begin{bmatrix} -L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & -L_s & 0 & M \\ -M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & -M & 0 & L_r \end{bmatrix} \quad [B] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[D] = \begin{bmatrix} -R_s & \omega_{ob}L_s & 0 & \omega_{ob}M \\ -\omega_{ob}L_s - R_s & \omega_{ob}M & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \quad [C] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 & -L_r \\ -M & 0 & L_r & 0 \end{bmatrix}$$

On utilise les paramètres de en **Annexe page 121** pour la simulation sur une charge résistive.

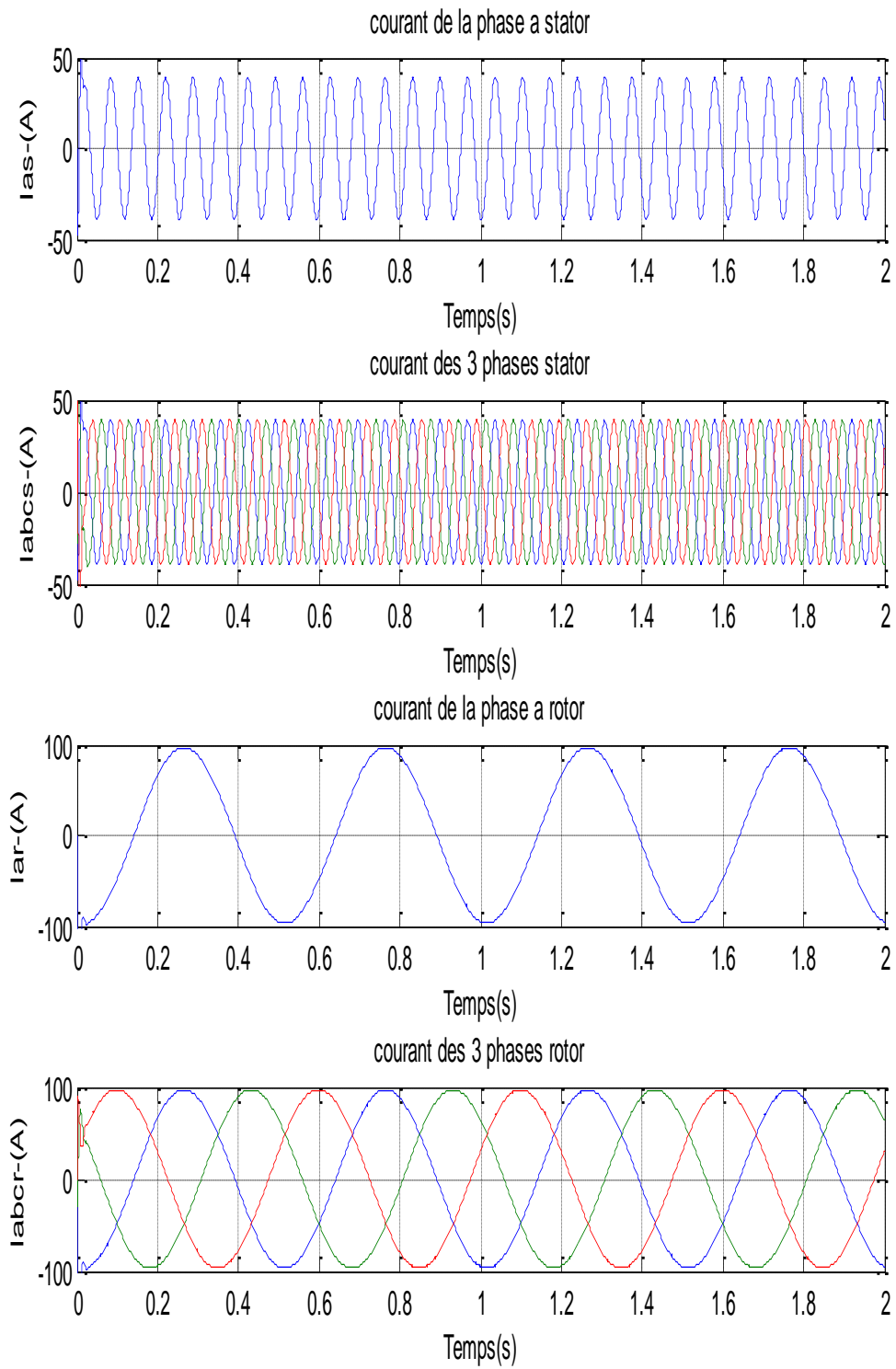
**Résultats de simulation**

**Figure 3.16** la tension simple et composée au stator de la GADA



**Figure 3.17** Les tensions stator et rotor de la GADA





**Figure 3.18** Les courants de la GADA

**Interprétation des résultats :**

Les résultats de simulations des différents grandeurs électriques caractéristiques du générateur la tension et le courant débités, ont été obtenus pour une valeur de charge purement résistive de  $R= 10$  Ohms avec une vitesse d'entraînement stable de 1000 tr/min.

Les figures **Figure 3.16** et **Figure 3.17** donnent le caractère sinusoïdal des valeurs obtenues, pour la tension simple 400V et de la tension composée de l'ordre 690V au stator et pour les courants **Figure 3.18** pour ce cas.

L'évolution de la tension rotorique est de 440V efficace, aussi purement sinusoïdale de fréquence 1.5 Hz l'allure de courant rotorique est sinusoïdale et de même fréquence que la tension rotorique.

A travers ces résultats on remarque bien la stabilité de GADA en mode générateur sur une charge isolée.

**Conclusion**

Dans ce chapitre on montré les qualités de la machine asynchrone à double alimentation en mode générateur par une modélisation dans un système de Park.

Ses qualités (standardisation, et cout) et performances (accès au rotor simple) en mode générateur ont fait de la MADA une machine très utilisée dans l'industrie éolienne.

La MADA est appréciée pour l'accès au rotor, ceci réduit considérablement le cout de l'installation convertisseur moins cher, et ceci est très avantageux pour un parc éolien comptant un nombre important de machines de même grandeurs et de même type dans la plupart des cas.

La machine asynchrone à double alimentation à rotor bobiné restera en concurrence en industrie éolienne pour de longues années encore.

## **CHAPITRE 4**

### **Application du DTC à la machine asynchrone à double alimentation en Mode Générateur**

#### **Introduction**

Avant d'entamer la commande commandedirecte decouple DTC de la generatrice asynchrone double alimentéede type DFIG, nous modélisant avant les deux convertisseurs reverssibles de puissances , le redresseur faisant la liaison avec le réseau, et le convertisseur de liaison avec le rotor de la machine l'onduleur.

Ensuite on va modeliser la machine dans le système d'axe alpha beta lie au stator et ceci dans le but de simplifier le schema de commande DTC qui est base sur les travaux de TAKAHASHI utilisant une table a six secteurs pour pouvoir introduire au mieux cette commnde dans les systemes utisant la MADA contrôle par le rotor.

#### **4.1. Modélisation des Convertisseurs statiques.**

La commande de la GADA nécessite un onduleur qui règle l'amplitude et la fréquence des tensions alimentant le rotor de la machine.

Cet onduleur CCM est à son tour raccordé à une alimentation continue régulée d'un bus DC grâce à un redresseur CCR raccordé au réseau.

Les deux convertisseurs onduleur –redresseur sont réversibles et sont à contrôle de modulation de largeur d'impulsion MLI en général **Figure 4.1**.

Cette partie vise à modéliser ces convertisseurs de liaison pour le rotor. [29]

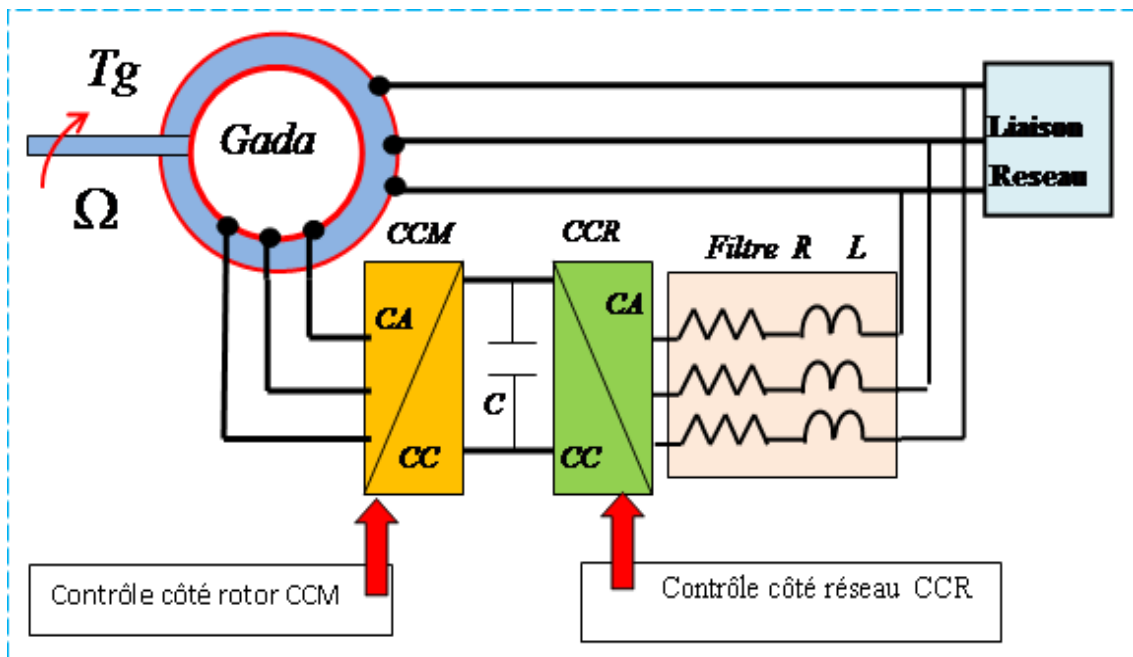


Figure 4.1–Convertisseur monté au rotor de la GADA.[3]

#### 4.1.1. Modélisation Onduleur de tension

L'onduleur utilisé est un onduleur triphasé à deux niveaux (six interrupteurs) les interrupteurs peuvent être des transistors IGBT ou thyristors de puissances bidirectionnels.

En définissant la fonction de connexion d'un interrupteur  $F_{nm}$ , où  $k$  représente le numéro du bras ( $n=1,2$ ou $3$ ) et  $s$  le numéro de l'interrupteur considéré ( $m=1$  pour l'interrupteur du haut et  $m=0$  pour l'interrupteur du bas).

Pour E une sources de courant continu on a **Figure 4.2a**

Les interrupteurs de haut sont  $T_1, T_2$  et  $T_3$

Les interrupteurs de bas  $T'_1, T'_2$  et  $T'_3$

Les interrupteurs s'un même bras sont complémentaires par exemple.  $T_1$  et  $T'_1$

Et sachant que les interrupteurs d'un même bras sont complémentaires, on peut écrire :

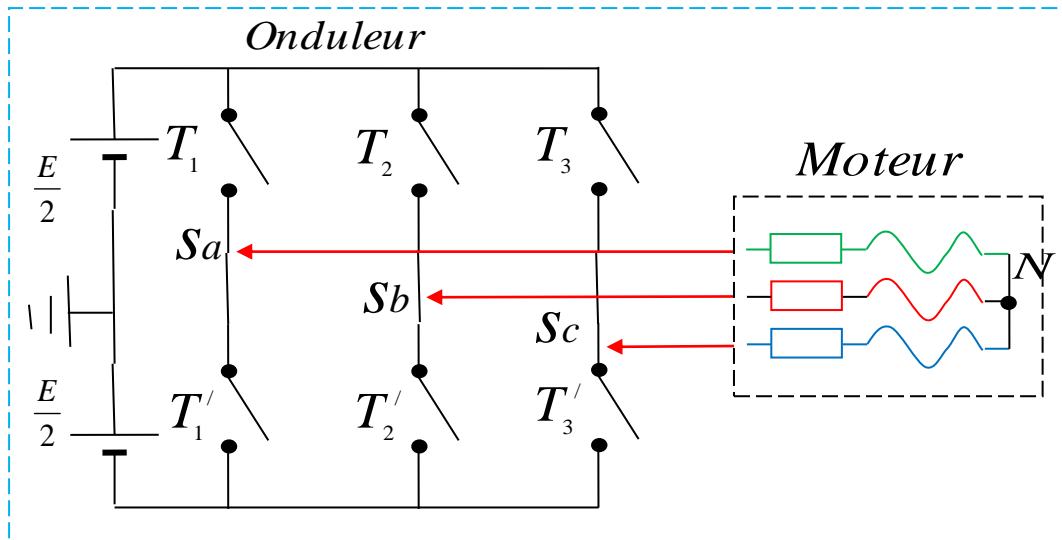


Figure 4.2 a Onduleur.[48]

Pour simplifier l'étude de l'onduleur de tension, on supposera que :

- La commutation des interrupteurs est instantanée.
- La chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable.
- Le système triphasé obtenu à la sortie de l'onduleur est un système triphasé équilibré en tension ne contenant que les harmoniques impairs différents de trois.

Les équations de tension simples appliquées aux trois phases sont:

$$\begin{cases} V_A = V_{AO} + V_{ON} \\ V_B = V_{BO} + V_{ON} \\ V_C = V_{CO} + V_{ON} \end{cases} \quad (4.1)$$

Avec :

$$V_A + V_B + V_C = V_{AO} + V_{BO} + V_{CO} + 3V_{ON}$$

Sachant que le système des tensions triphasées statorique est symétrique.

$$V_{AO} + V_{BO} + V_{CO} + 3V_{ON} = 0 \quad V_{ON} = \frac{1}{3}(V_{AO} + V_{BO} + V_{CO}) \quad (4.2)$$

En remplaçant on aura le système suivant :

$$\begin{cases} V_A = \frac{2}{3}V_{AO} - \frac{1}{3}V_{BO} - \frac{1}{3}V_{CO} \\ V_B = \frac{1}{3}V_{AO} + \frac{2}{3}V_{BO} - \frac{1}{3}V_{CO} \\ V_C = \frac{1}{3}V_{AO} - \frac{1}{3}V_{BO} + \frac{2}{3}V_{CO} \end{cases} \quad (4.3)$$

On peut écrire le système (4.3) sous la forme matrice:

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & 1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{AO} \\ V_{BO} \\ V_{CO} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$$\begin{cases} V_{AO} = \frac{E}{2} S_1 \\ V_{BO} = \frac{E}{2} S_2 \\ V_{CO} = \frac{E}{2} S_3 \end{cases} \quad (4.5)$$

Tel que:

$$V_{AO} = \frac{E}{2} S_1 \quad S_1 = 1 \quad \text{si } K_1 \text{ fermé} \quad (v_{r1} \geq v_p) \quad \text{si non} \quad S_1 = -1$$

$$V_{BO} = \frac{E}{2} S_2 \quad \text{Ou} \quad S_2 = 1 \quad \text{si } K_2 \text{ fermé} \quad (v_{r2} \geq v_p) \quad \text{si non} \quad S_2 = -1$$

$$V_{CO} = \frac{E}{2} S_3 \quad S_3 = 1 \quad \text{si } K_3 \text{ fermé} \quad (v_{r3} \geq v_p) \quad \text{si non} \quad S_3 = -1$$

On remplace (4.5) dans (4.4).

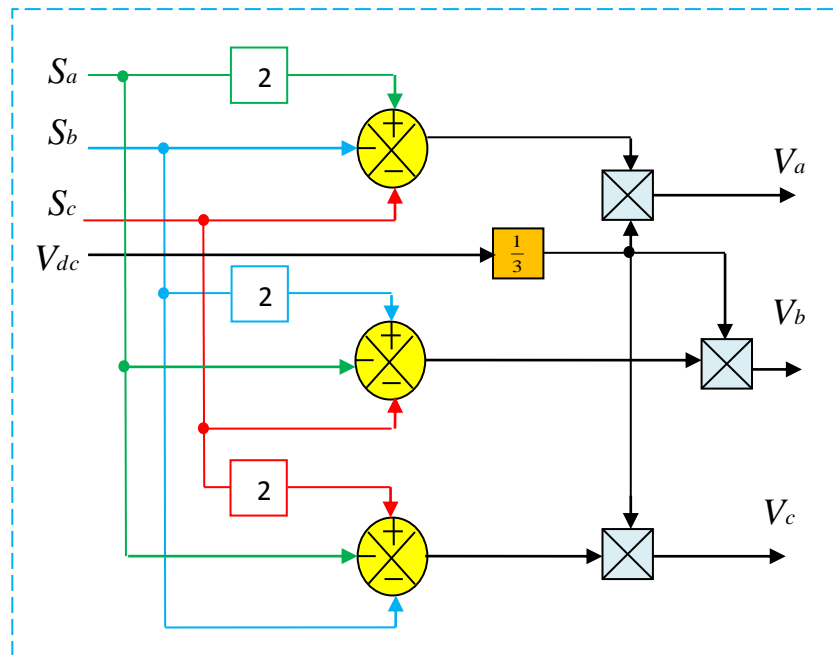
Les équations précédentes permettent d'exprimer les tensions simples de l'onduleur au moyen des fonctions de connexion comme suite :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & 1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Le système (4.6) représente le modèle mathématique de l'onduleur triphasé à MLI réversible.

Pour  $E = V_{dc}$  est la tension du bus continu ; on obtient le schéma bloc suivant pour le

donc on peut alors modéliser l'onduleur suivant la **Figure 4.2b**.



**Figure 4.2b** Schéma s bloc de l'onduleur

#### 4.1.2. Modélisation du redresseur :

Les redresseurs à MLI sont des convertisseurs de l'électronique de puissance qui assurent la conversion alternative-continu pour avoir une source continue stable, contrairement aux redresseurs classiques, les redresseurs MLI sont réalisés à l'aide de semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture. **Figure 4.3**

La possibilité de commande à l'ouverture permet un contrôle total du convertisseur, parce que les interrupteurs peuvent être commutés, selon les besoins, aussi bien à la fermeture qu'à l'ouverture avec une fréquence assez élevée.

Le redresseur à MLI est composé de six bras, dont chacun comporte deux cellules de commutation constituées d'une diode et d'un transistor en antiparallèle les interrupteur sont comme ceux d'un onduleur à deux niveaux voir structure onduleur.

Cette structure permet de passer le courant dans les deux sens.

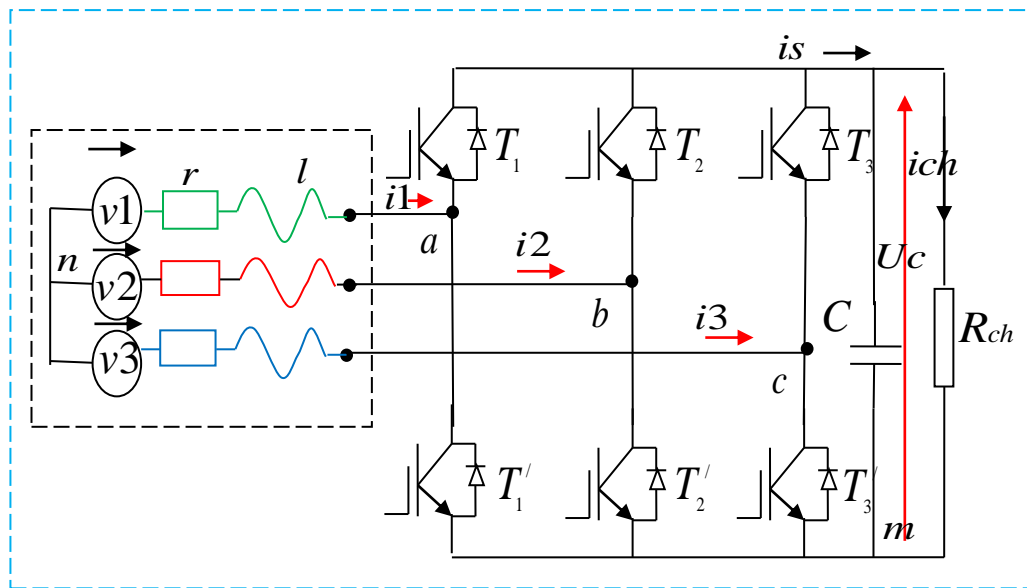


Figure 4.3 a Structure du redresseur à MLI. [48]

### Le réseau

La source est modélisée par une source triphasée sinusoïdale en série avec une inductance  $l$  et une résistance  $r$  qui représentent l'impédance totale de la ligne.

On suppose le réseau équilibré, avec les mêmes impédances dans les trois phases,

Les tensions de ligne sont exprimées comme suit :

$$\begin{cases} v_{res1} = Ri_{res1} + L \frac{di_{res1}}{dt} + v_{an} \\ v_{res2} = Ri_{res2} + L \frac{di_{res2}}{dt} + v_{bn} \\ v_{res3} = Ri_{res3} + L \frac{di_{res3}}{dt} + v_{cn} \end{cases} \quad (4.7)$$

Où  $V_{an}$ ,  $V_{bn}$  et  $V_{cn}$  : sont les tensions simples par rapport au neutre de la source à l'entrée du convertisseur.

Et les courants de chaque phase du réseau sont alors donnés par le système d'équations différentielles suivant :



$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{res1} \\ i_{res2} \\ i_{res3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R/L & 0 & 0 \\ 0 & -R/L & 0 \\ 0 & 0 & -R/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{res1} \\ i_{res2} \\ i_{res3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{res1} - v_{an} \\ v_{res2} - v_{bn} \\ v_{res3} - v_{cn} \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

### L'étage Convertisseur.

Sachant que la structure du redresseur est identique à celle de l'onduleur déjà modélisé dans la section précédente, la matrice de connexion du pont est similaire à l'équation (4.6). Les tensions simples  $V_{c1}$ ,  $V_{c2}$  et  $V_{c3}$  :

$$\begin{bmatrix} V_{c1} \\ V_{c2} \\ V_{c3} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & 1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Le courant redressé est:

$$i_{dc} = \begin{bmatrix} S_a & S_b & S_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{res1} \\ i_{res2} \\ i_{res3} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

### La charge

Cet étage est constitué d'une capacité  $C$  en parallèle avec une résistance  $R_{ch}$  modélisant la charge continue, il est régi par les deux équations :

$$\begin{cases} \frac{dU_c}{dt} = \frac{1}{C}(i_s - i_L) \\ U_c = R_{ch} \cdot i_L \end{cases} \quad (4.11)$$

Ce qui permet d'obtenir la fonction de transfert entre tension et courant redressés :

$$\begin{cases} \frac{dU_c}{di_L} = \frac{R_{ch}}{1 + R_{ch}C \cdot s} \end{cases} \quad (4.12)$$

Alors le schéma bloc du redresseur à MLI ayant comme entrées la commande des gâchettes des interrupteurs et comme sortie la tension redressée  $V_c$ . **Figure 4.3b**

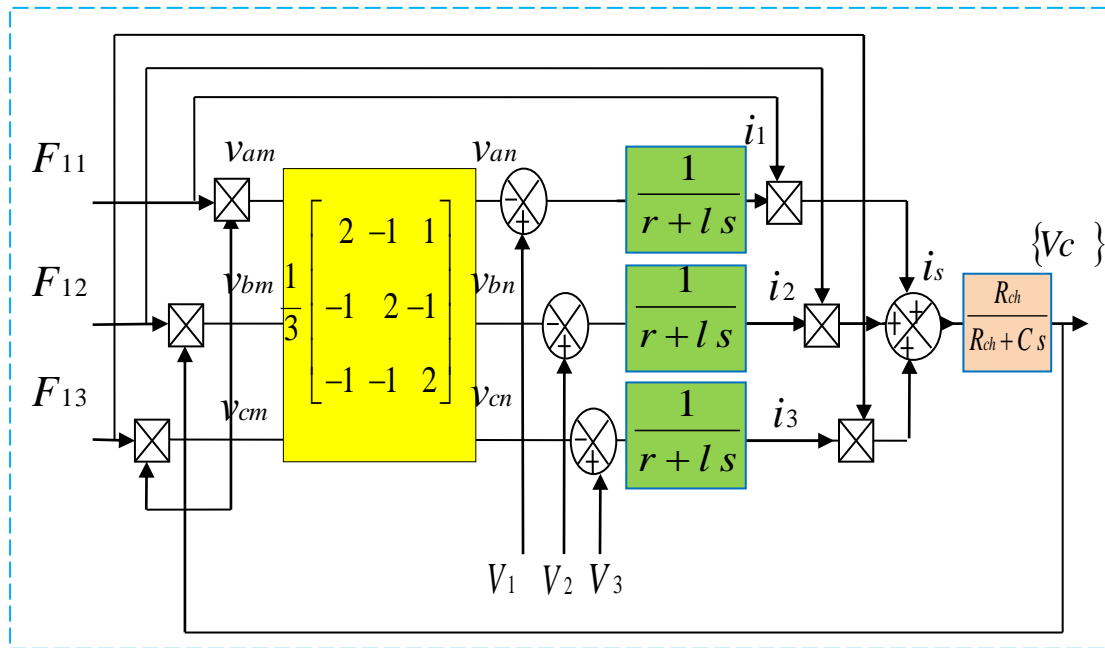


Figure 4.3 b Schéma bloc du redresseur à MLI

## 4.2 Principe de la commande directe de couple DTC.

### 4.2.1 Introduction

La technique de commande directe du couple (Direct torque control ou DTC) est apparue dans la deuxième moitié des années 1980 comme concurrentielle des méthodes classiques, basées sur une alimentation à modulation de largeur d'impulsion (MLI) et sur un découplage de flux et de couple par orientation du flux magnétique.[2][18][46]

La DTC assure un découplage du flux et du couple et simple à mettre en œuvre.

Dans cette section on va décrire le principe du contrôle directe de couple DTC basé sur les travaux de TAKAHASHI appliquée à la machine en mode moteur , une fois le principe de cette commande est acquis , nous utilisons cette technique DTC pour l'appliquer à la machine asynchrone double alimenté en mode générateur GADA avec une vitesse de rotation hyposynchrone 1455 tr/min qui correspond à un glissement de 3%.( $s=0.3$ ) en mode MPPT avec un couple compris entre (3000Nm et 8000N.m) pour la turbine 1.5 MW.[15]

### **4.2.2 Principe du DTC**

Les méthodes de commande directe du couple DTC consistent à commander directement la fermeture ou l'ouverture des interrupteurs de l'onduleur à partir des valeurs des erreurs calculées du flux statorique et du couple aux niveaux des contrôleurs à hystérésis.

La commande des interrupteurs a pour but de donner au vecteur représentant le flux statorique la direction déterminée par les valeurs de consigne. Pour connaître l'état électromagnétique du moteur afin de déterminer la commande des interrupteurs de l'onduleur, il faut disposer d'un modèle approprié de la machine. A partir des mesures de la tension continue à l'entrée de l'onduleur et des courants statorique, le modèle donne à chaque instant :

- ✓ Le flux statorique réel de la machine,
- ✓ Le couple réel qu'elle développe,
- ✓ Sa vitesse de rotation.

La mesure de la vitesse de l'arbre n'est pas nécessaire, ce qui est un grand avantage de ces méthodes.

L'état de ces grandeurs nous permet de définir la vectrice tension statorique à appliquer à la machine asynchrone pour maintenir au mieux le couple et le flux dans leurs bandes d'hystérésis.

### **4.2.3 Fonctionnement et séquences d'un onduleur de tension triphasé**

Les interrupteurs de l'onduleur de tension doivent être commandés de manière à maintenir le flux et le couple de la machine. *Figure 4.4*

Le vecteur de la tension statorique  $V_s$  peut s'écrire sous la forme :

$$\bar{V}_s = \sqrt{\frac{2}{3}} U_s \left[ S_a + S_b e^{j\frac{2\pi}{3}} + S_c e^{j\frac{4\pi}{3}} \right] \quad (4.13)$$

Où  $(S_a, S_b, S_c)$  représentent l'état logique des 3 interrupteurs :

$S_i = 1$ , l'interrupteur haut est fermé et l'interrupteur bas est ouvert ( $V_i = +U_0/2$ )

$S_i = 0$ , l'interrupteur haut est ouvert et l'interrupteur bas est fermé ( $V_i = -U_0/2$ ).

On cherchera donc à contrôler le flux et le couple via le choix du vecteur de tension qui se fera par une configuration des interrupteurs.

Comme nous disposons de 3 interrupteurs, il y a donc  $2^3 = 8$  possibilités pour le vecteur  $V_s$ . 2 vecteurs ( $V_0$  et  $V_7$ ) correspondent au vecteur nul :  $(S_a, S_b, S_c) = (0, 0, 0)$  et  $(S_a, S_b,$

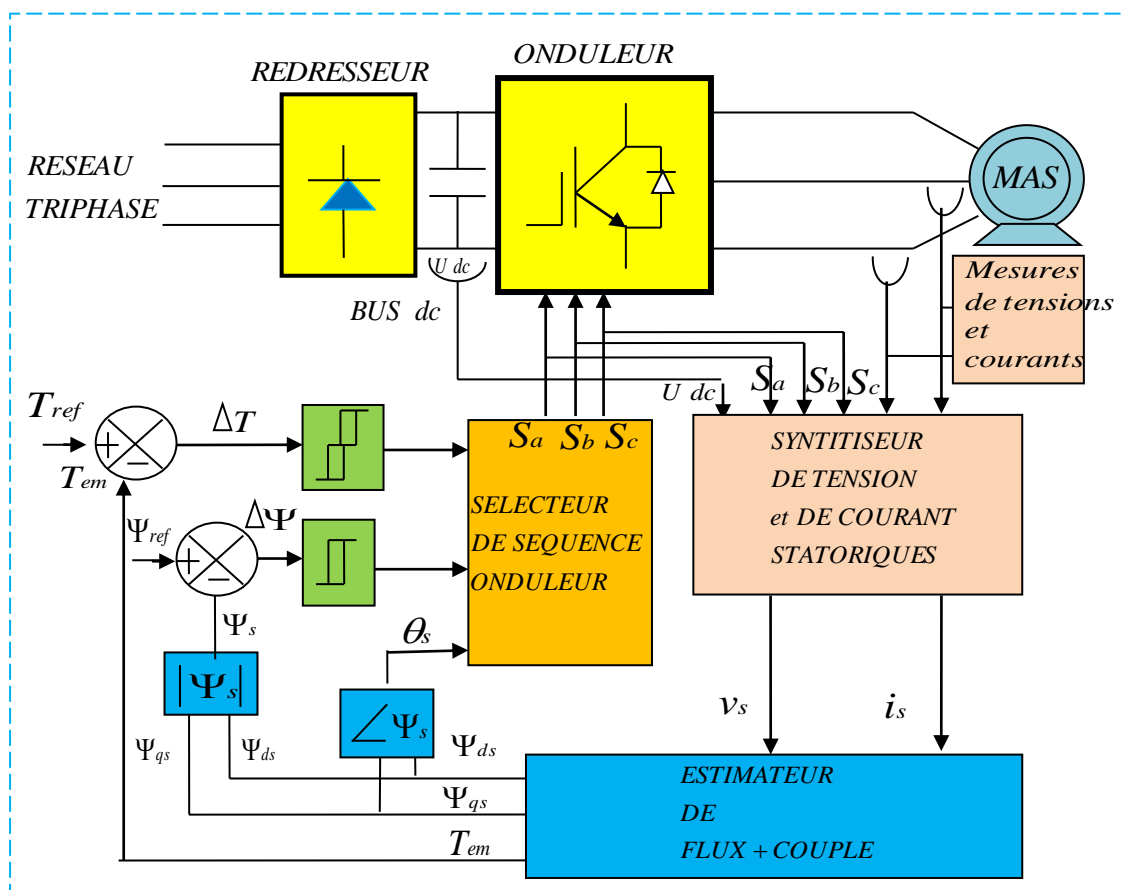


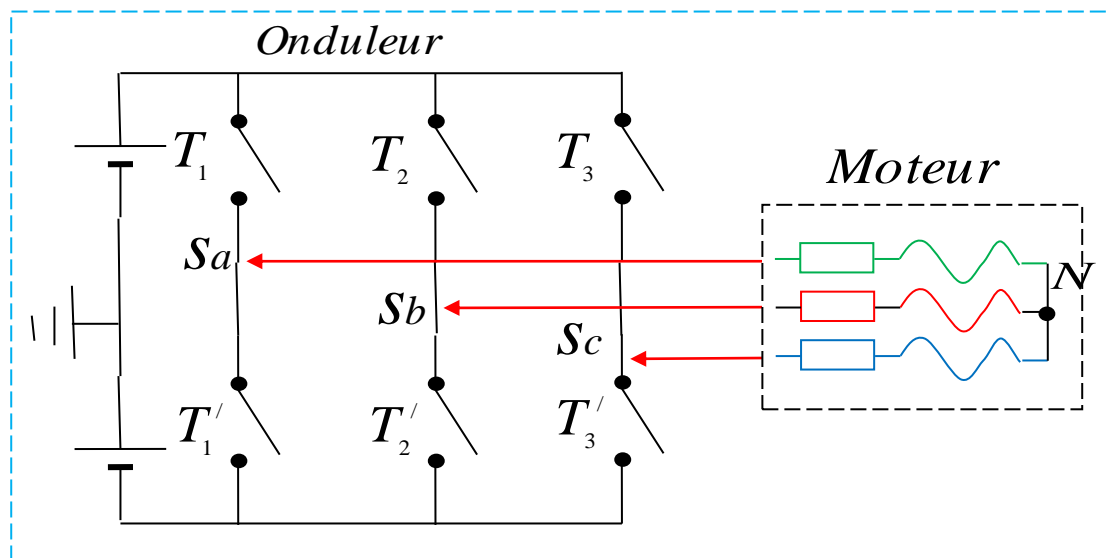
Figure 4.4 Principe du DTC Machine asynchrone onduleur de tension [44].

$V_0 (0,0,0)$  est toujours à coté d'un vecteur impair;  $V_1(1,0,0)$ ;  $V_3 (0,1,0)$ ; où  $V_5 (0,0,1)$  d'où une seul commutation .

$V_7 (1, 1,1)$  est toujours à côté d'un vecteur pair;  $V_2 (1, 1,0)$ ;  $V_4 (0, 1,1)$ ; où  $V_6 (1, 0,1)$  donc une seul commutation.

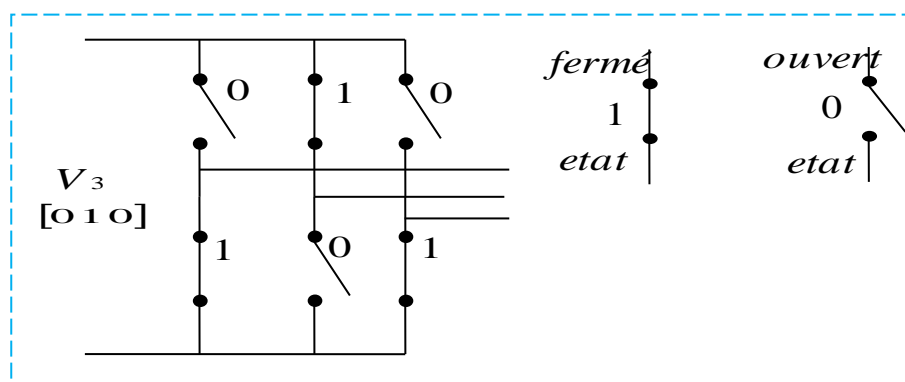
Dans chaque période de modulation, un bras ne commute pas deux fois.

La représentation dans le plan complexe des six vecteurs de tensions non nuls qui peuvent être générés par un onduleur de tension triphasé à deux niveaux. **Figure 4.5**



**Figure 4.5** Séquence de fonctionnement d'un onduleur de tension à deux niveaux.

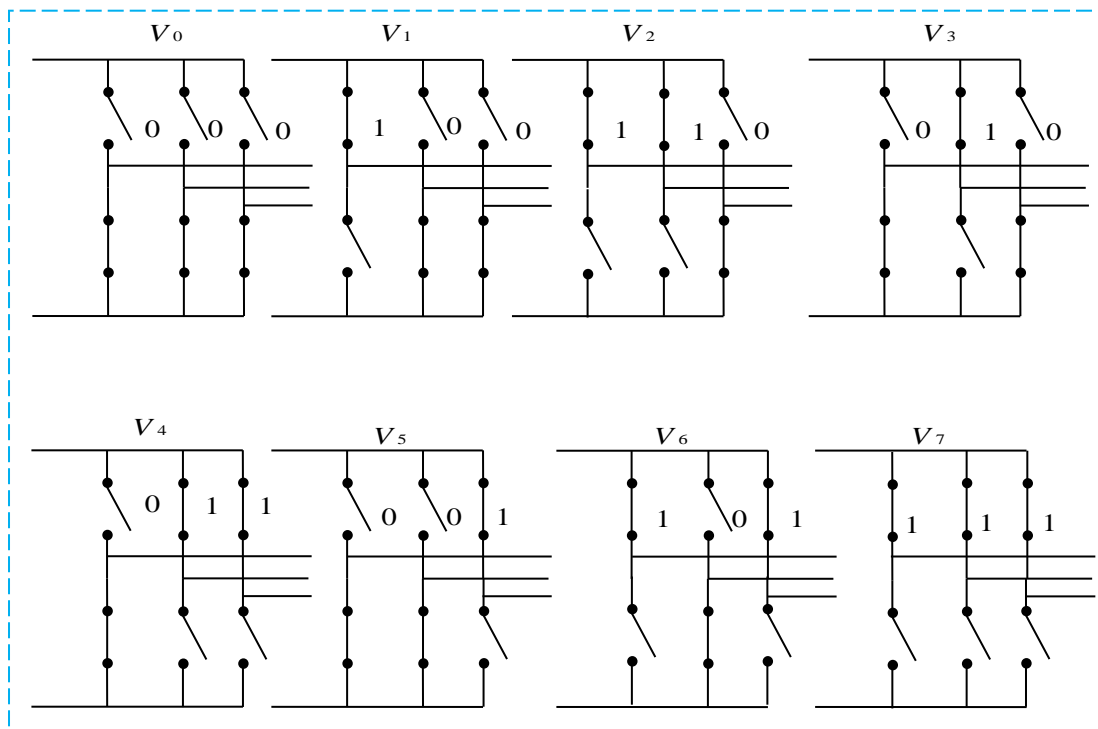
Par exemple pour le vecteur  $V_3$  appliquée . **Figure 4.6**



**Figure 4.6** Exemple du vecteur de tension  $V_3$  actif

les huit vecteurs possibles sont réunis à la **Figure 4.7**

$V_0$  et  $V_7$  sont les vecteurs nuls.



**Figure 4.7** Onduleur à deux niveaux à huit vecteurs de tension possibles [18]

### 4.3 Contrôle de flux statorique et du couple électromagnétique.

#### 4.3.1. Principe de contrôle de flux statorique

A partir du modèle de la machine asynchrone dans un repère lié au stator et de l'expression de la tension statorique :

$$V_s = R_s \cdot I_s + \frac{d\varphi_s}{dt} \quad (4.14)$$

Le flux statorique est estimé par la relation :

$$\varphi_s(t) = \int_0^t (V_s - R_s \cdot I_s) dt \quad (4.15)$$

$$\varphi_s(t) = \varphi_{s0} + V_s(t) - R_s \int I_s dt \quad (4.16)$$

Avec l'hypothèse que  $R_s$  reste constante et que le terme  $(R_s I_s)$  est négligeable devant la tension  $V_s$ .

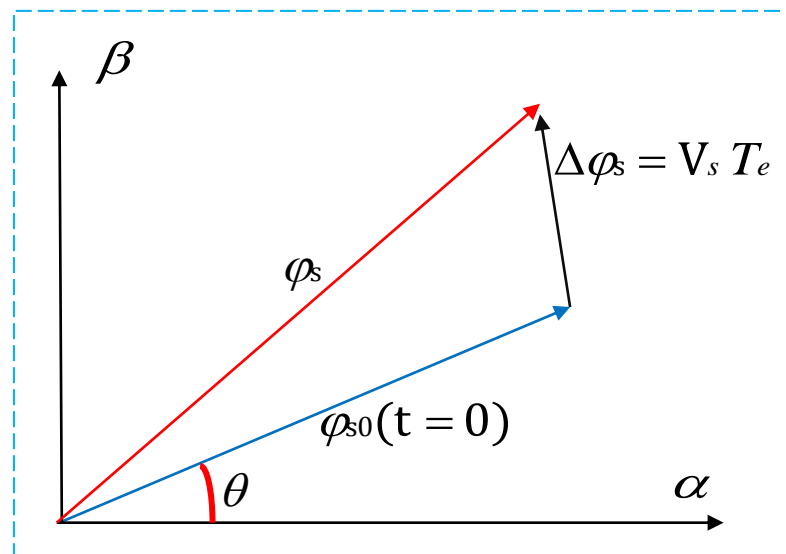
Sur un intervalle périodique de contrôle  $[0, T_e]$  correspondant à une période

d'échantillonnage  $T_e$  les commandes ( $S_a, S_b, S_c$ ) sont fixées, ainsi on peut écrire

$$\varphi_s(t) = \varphi_{s0} + V_s T_e \quad (4.17)$$

Où  $\varphi_{s0}$  : est le vecteur flux à l'instant  $t = 0$ .

Dans un intervalle de temps  $T_e$ , l'extrémité du vecteur  $\Phi_s$  se déplace sur une droite dont la direction est donnée  $V_s$ . **Figure 4.6** illustre ce principe, lorsqu'on sélectionne le vecteur  $V_s=V_3$  par exemple.



**Figure 4.8** Evolution de l'extrémité du vecteur  $\varphi_s$

Si la période de contrôle "  $T_e$  " est très faible devant la période de rotation du vecteur flux statorique. En choisissant une séquence appropriée de vecteur tension de l'onduleur sur des intervalles de temps successifs de durée  $T_e$ , on peut donc faire suivre à l'extrémité du vecteur flux  $\varphi_s$  la trajectoire désirée.

Le vecteur  $\varphi_s$  est maintenu entre deux valeurs  $\varphi_{smax}$  et  $\varphi_{smin}$ ; le passage de l'une à l'autre étant commandé par  $V_s$ . Si le vecteur de commande est l'un des vecteurs non nuls,  $\varphi_s$  évolue avec une vitesse constante proportionnelle à la tension de commande.

Si l'on maintient  $\varphi_s$  à peu près constant, le couple ne dépend que du déphasage entre les deux flux. Pour répondre à une demande de variation rapide du couple, il suffit donc de

modifier rapidement le déphasage entre les deux flux.

Par exemple quand  $\varphi_s$  atteint la valeur  $\varphi_{smax}$ , on déclenche le changement d'interrupteurs pour que la nouvelle valeur de  $V_s$  entraîne une diminution du module de  $\varphi_s$ . En même temps la nouvelle phase du vecteur  $V_s$  provoque le décalage  $I_s$  et  $\varphi_s$  dans le sens de rotation, fait augmenter le déphasage et le couple. Quand  $\varphi_s$  chutera à la valeur  $\varphi_{smin}$ , on commandera la commutation suivante **Figure 4.8**.

Il est possible de fonctionner avec un module de flux  $\varphi_s$  pratiquement constant ; pour cela il suffit de choisir une trajectoire circulaire pour l'extrémité du vecteur flux. Ceci n'est possible que si la période de contrôle est très faible devant la période de rotation du flux.

En plus la composante du flux de vecteurs de tensions appliquées doit être minimum alors que celle de la composante du couple doit être maximum.

Lorsque le vecteur de tension  $V_s$  est non nul, la direction du déplacement de l'extrémité du flux  $\varphi_s$  est donnée par sa dérivée  $\frac{d\varphi_s}{dt}$  correspondant pratiquement au vecteur  $V_s$ .

En ce qui concerne le flux rotorique  $\varphi_r$ , on peut admettre que compte tenu de la forte constante du temps du rotor de la machine asynchrone, son amplitude ne varie pas durant un régime transitoire, donc la variation de flux rotorique est négligeable vis-à-vis de celle du flux statorique.

#### 4.3.2. Principe de contrôle du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique est proportionnel au produit vectoriel entre les vecteurs des flux statorique et rotorique selon l'expression suivante :

$$C_e = K(\bar{\varphi}_s * \bar{\varphi}_r) = K|\bar{\varphi}_s||\bar{\varphi}_r|\sin(\gamma) \quad (4.18)$$

Avec :



$\overline{\varphi_s}$  : représente le vecteur de flux statorique;

$\overline{\varphi_r'}$  : représente le vecteur de flux rotorique ramené au stator ;

$\gamma$  : représente l'angle entre les vecteurs des flux statorique et flux rotorique .

D'après cette expression, le couple dépend donc de l'amplitude des deux vecteurs  $\varphi_s$  et  $\varphi_r'$  et de leur position relative.

### 4.3.3. Choix du vecteur de tension

Les variations du couple électromagnétique peuvent être contrôlées uniquement à partir de la vitesse de rotation du vecteur flux,  $\overline{\varphi_s}$  . Le tableau (4.1) montre l'évolution des deux grandeurs flux et couple pour chacun des quatre vecteurs  $V_{i+1}$  ,  $V_{i+2}$  ,  $V_{i-1}$  ,  $V_{i-2}$  qui peuvent être appliqués dans la zone  $Z_i$ .

Lorsque le flux  $\overline{\varphi_s}$  se trouve dans une zone  $i$ , le contrôle du flux et du couple peut être assuré en sélectionnant l'un des huit vectrices tensions suivantes:

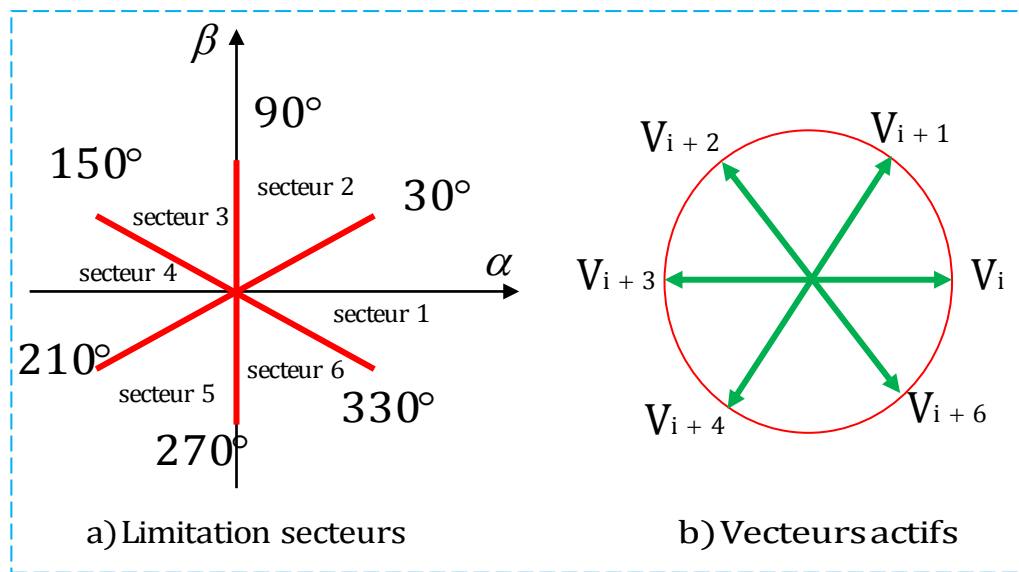
- Si  $V_{i+1}$  est sélectionné alors l'amplitude du flux  $\Phi_s$  croit et le couple  $C_{em}$  croit ;
- Si  $V_{i+2}$  est sélectionné alors l'amplitude du flux  $\Phi_s$  décroît et le couple  $C_{em}$  croit ;
- Si  $V_{i-1}$  est sélectionné alors l'amplitude du flux  $\Phi_s$  croit et le couple  $C_{em}$  décroît ;
- Si  $V_{i-2}$  est sélectionné alors l'amplitude du flux  $\Phi_s$  décroît et le couple  $C_{em}$  décroît ;
- Si  $V_0$  ou  $V_7$  sont sélectionnés, alors la rotation du flux est arrêtée, d'où une décroissance du couple alors que le module du flux  $\Phi_s$  reste inchangée.

Les vecteurs de tension à appliquer dépendent de la zone où se trouve le vecteur flux.

Les paramètres  $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5, Z_6$  **Figure 4.9**

Vecteur $V_k$	$V_{i+1}$	$V_{i+2}$	$V_{i-1}$	$V_{i-2}$
$\varphi_s$				
$C_{em}$				

**Tableau 4.1** Evolution de flux et de couple en fonction du vecteur  $V_s$  appliqué dans la zone  $Z_i$ .  $k = (i-1, i-2, i+1, i+2)$



**Figure 4.9** Répartition des secteurs.[2]

Le niveau d'efficacité des vecteurs de tensions appliqués dépend également de la position du flux dans la zone  $i$ . La **Figure 4.10** choix de vecteur tension zone 1.

En effet, en début de zone, les vecteurs  $\overline{V_{i+1}}$  et  $\overline{V_{i-2}}$  sont perpendiculaires à  $\overline{\varphi_s}$ , d'où une évolution rapide du couple mais une évolution lente de l'amplitude du flux  $\varphi_s$ , alors qu'en fin de zone l'évolution est inverse. Avec les vecteurs  $\overline{V_{i-1}}$  et  $\overline{V_{i+2}}$ , il correspond à des évolutions lente du couple et rapide de l'amplitude du flux  $\overline{\varphi_s}$  en début de zone, alors qu'en fin de zone c'est le contraire. Quelque soit le sens d'évolution du couple ou du flux, dans la zone  $i$ , les deux vecteurs  $\overline{V_i}$  et  $\overline{V_{i+3}}$  ne sont jamais utilisés. En effet, ceux-ci ont la composante de flux la plus forte (évolution très rapide de  $\varphi_s$ ) mais l'effet sur le couple

lui, dépend de la position de dans la zone, avec un effet nul en milieu de zone. Le vecteur de tension à la sortie de l'onduleur est déduit des écarts de couple et de flux, estimé par rapport à leur référence, ainsi que la position du vecteur  $\overline{\varphi}_s$ .

Un estimateur de  $\overline{\varphi}_s$  en module et en position ainsi qu'un estimateur de couple sont donc nécessaires.

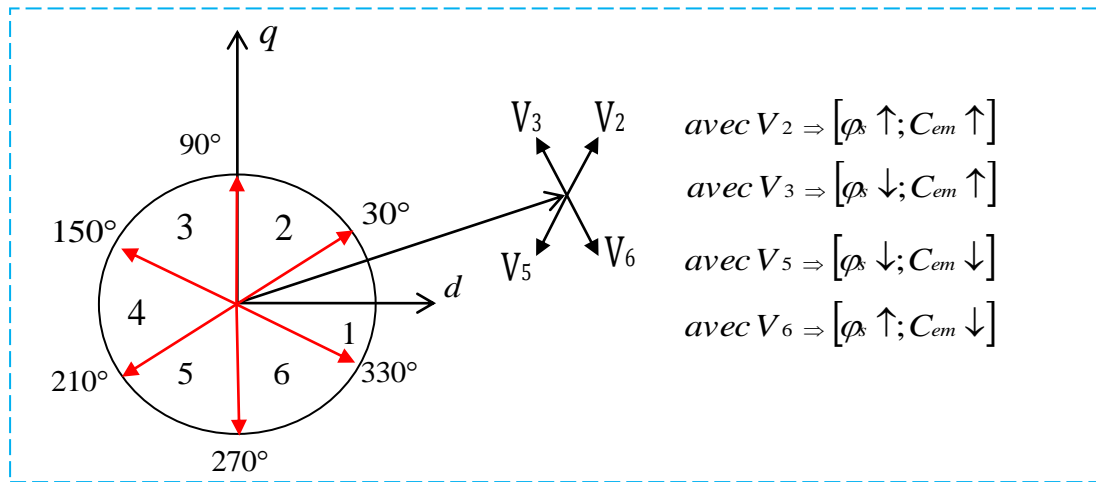


Figure 4.10 Choix du vecteur de tension dans la zone1 [2]

#### 4.3.4. Estimateur

##### 4.3.4.1. Estimation du flux statorique

L'estimation du flux peut être réalisée à partir des mesures du courant et tension de la machine et à partir de l'équation :

$$\overline{\varphi}_s = \int_0^t (\overline{V}_s - R_s \cdot \overline{I}_s) dt$$

On obtient les composantes  $\alpha$  et  $\beta$  du vecteur  $\overline{\varphi}_s$  :

$$\begin{cases} \varphi_{s\alpha}(t) = \int_0^t (V_s \alpha - R_s \cdot I_s \alpha) dt \\ \varphi_{s\beta}(t) = \int_0^t (V_s \beta - R_s \cdot I_s \beta) dt \end{cases} \quad (4.20)$$

Ces équations donnent l'estimation de l'amplitude du flux statorique.

On obtient les composantes  $V_{s\alpha}$  et  $V_{s\beta}$ , après l'application de la transformation de Concordia sur les tensions d'entrée mesurées  $V_{an}$ ,  $V_{bn}$  et  $V_{cn}$ .

Ces tensions sont exprimées à partir de la tension d'entrée de l'onduleur  $U_c$ , et des états

de commande ( $S_a, S_b, S_c$ ), soit:

$$\begin{cases} \bar{V}_s = \sqrt{\frac{2}{3}} U_c \left[ S_a - \frac{1}{2} (S_b + S_c) \right] \\ \bar{V}_s = \sqrt{\frac{1}{2}} U_c (S_b - S_c) \end{cases} \quad (4.21)$$

Les courants  $i_{s\alpha}$  et  $i_{s\beta}$ , sont également obtenus à partir des courants réels  $i_{sa}, i_{sb}$  et  $i_{sc}$

( $i_{sa} + i_{sb} + i_{sc} = 0$ ) et par application de la transformation de Concordia [15] :

$$\begin{cases} \bar{V}_s = \sqrt{\frac{2}{3}} i_{sa} \\ \bar{V}_s = \sqrt{\frac{1}{2}} (i_{sb} - i_{sc}) \end{cases} \quad (4.22)$$

L'amplitude du flux statorique est estimée à partir de ses composantes  $\varphi_{s\alpha}$  et  $\varphi_{s\beta}$ , par :

$$\varphi_s = \sqrt{\varphi_{s\alpha}^2 + \varphi_{s\beta}^2} \quad (4.23)$$

L'angle  $\alpha_s$  entre le référentielle statorique et le vecteur flux  $\varphi_s$  est égal à :

$$\alpha_s = \arctg \frac{\varphi_{s\beta}}{\varphi_{s\alpha}} \quad (4.24)$$

#### 4.3.4.2. Estimation du couple électromagnétique

Le couple électromécanique peut être estimé à partir des flux estimés, et des courants statorique mesurés, et qui peut se mettre sous la forme suivante :

$$C_{em} = p(\varphi_{s\alpha} \cdot i_{s\beta} - \varphi_{s\beta} \cdot i_{s\alpha}) \quad (4.25)$$

### 4.4 Elaboration du vecteur de commande

#### 4.4.1 Le correcteur de flux

Son but est de maintenir l'extrémité du vecteur  $\bar{\varphi}_s$  dans une couronne circulaire comme le montre **la figure 4.11**. La sortie du correcteur doit indiquer le sens d'évolution du module de  $\bar{\varphi}_s$  afin de sélectionner le vecteur de tension correspondant.

Pour cela un simple correcteur à hystérésis à deux niveaux convient parfaitement, et permet de plus d'obtenir de très bonnes performances dynamiques.

La sortie du correcteur, représentée par une variable booléenne *cflx* indique directement

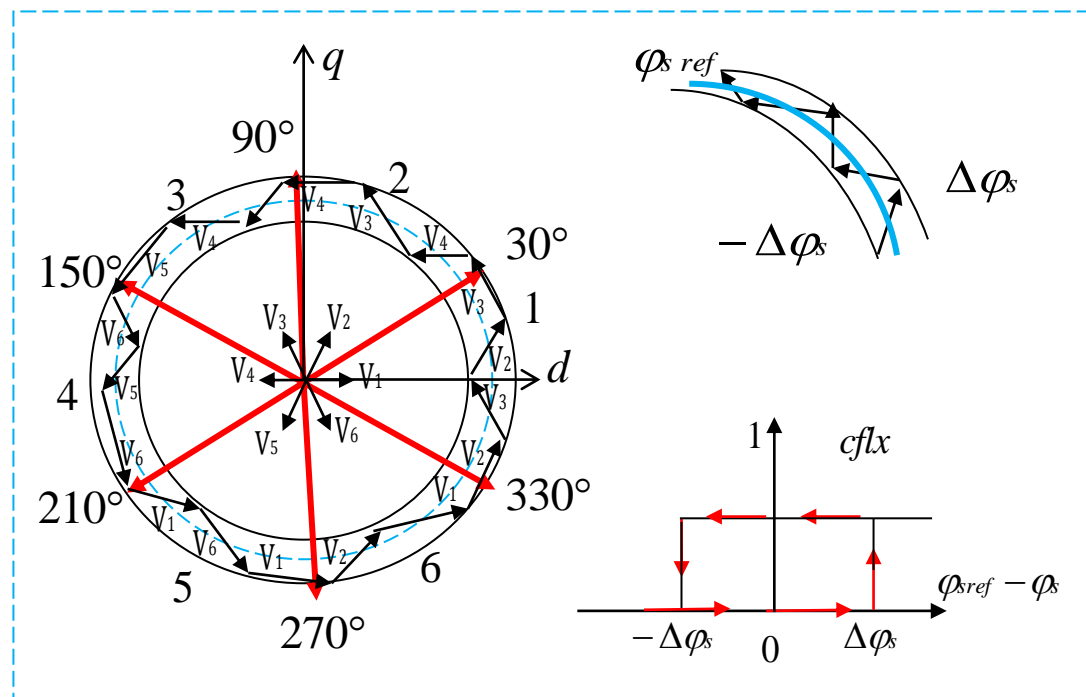
si l'amplitude du flux doit être augmentée ( $cflx = 1$ ), diminuée ( $cflx = 0$ ) de façon à maintenir:

$$|(\varphi_s)_{ref} - \varphi_s| \leq \Delta\varphi_s \quad (4.26)$$

Avec :

$(\varphi_s)_{ref}$  : la cosigne de flux;

$\Delta\varphi_s$  : La largeur d'hystérésis du correcteur.



**Figure 4.11** Sélection des tensions correspondant au contrôle de flux statorique.[2]

#### 4.4.2. Le correcteur de couple

Le correcteur de couple a pour fonction de maintenir le couple dans les limites admissible définie comme suit:

$$|C_{ref} - C_{em}| \leq \Delta C \quad (4.27)$$

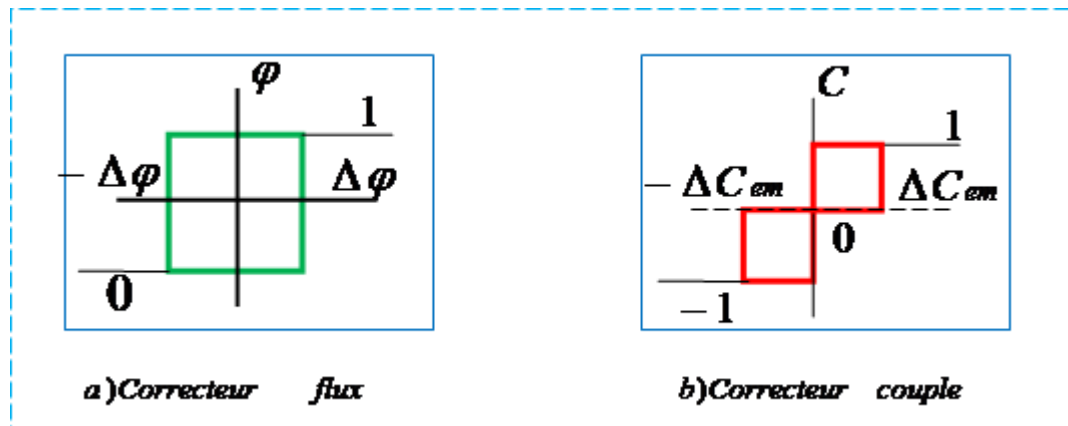
$C_{ref}$  : la référence de couple

$\Delta C$  : la bande d'hystérésis du correcteur.

#### 4.4.2.1. Le correcteur à trois niveaux :

La sortie du correcteur, représentée par la variable booléenne indique directement si l'amplitude du couple doit être augmentée en valeur absolue ( $ccpl = 1$ ) pour une consigne positive et ( $ccpl = -1$ ) pour une consigne négative ou diminuée ( $ccpl = 0$ ).

La **Figure 4.12** montre ce type de correcteur.



**Figure 4.12** Correcteur à bande d'hysteresis de flux et de couple.[2]

#### 4.4.2.2. Le correcteur à deux niveaux :

Ce correcteur n'autorise le contrôle du couple que dans un seul sens de rotation. Ainsi seuls les vecteurs  $\overline{V}_{i+1}$  et  $\overline{V}_{i+2}$ , peuvent être sélectionnés pour faire évoluer le flux  $\overline{\varphi}_s$ . Par conséquent, la diminution du couple est uniquement réalisée par la sélection des vecteurs nuls.

Pendant ce correcteur est plus simple à implanter et en sélectionnant correctement les vecteurs nuls suivant les zones  $N_i$ , on s'aperçoit que pour chaque zone  $i$ , il y a un bras de l'onduleur qui ne commute jamais, et permet ainsi de diminuer la fréquence moyenne de commutation des interrupteurs, diminuant ainsi les pertes par commutation au niveau de l'onduleur.

### 4.5. Elaboration de la table de commande

La table de commande est construite en fonction de l'état des variables  $cflx$  et  $ccpl$ , et de la zone  $N_i$  de position de  $\overline{\varphi}_s$ . Elle se présente donc sous la forme suivante :

L'application des vecteurs optimaux se résume donc à une simple table de référence donnée ci-après. La commande est construite en fonction de l'état des variables ( $cflx$ ) et ( $ccpl$ ), et de la zone  $Ni$  de la position de flux  $\overline{\varphi}_s$ .

		Nombre du secteurs ZONE					
		N = 1	N = 2	N = 3	N = 4	N = 5	N = 6
Flux	Couple	Vecteur tension					
$Cflx = 1$	$ccpl = 1$	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>4</sub>	V <sub>5</sub>	V <sub>6</sub>	V <sub>1</sub>
	$ccpl = 0$	V <sub>7</sub>	V <sub>0</sub>	V <sub>7</sub>	V <sub>0</sub>	V <sub>7</sub>	V <sub>0</sub>
	$ccpl = -1$	V <sub>6</sub>	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>4</sub>	V <sub>5</sub>
$Cflx = 0$	$ccpl = 1$	V <sub>3</sub>	V <sub>4</sub>	V <sub>5</sub>	V <sub>6</sub>	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>
	$ccpl = 0$	V <sub>0</sub>	V <sub>7</sub>	V <sub>0</sub>	V <sub>7</sub>	V <sub>0</sub>	V <sub>7</sub>
	$ccpl = -1$	V <sub>5</sub>	V <sub>6</sub>	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>4</sub>

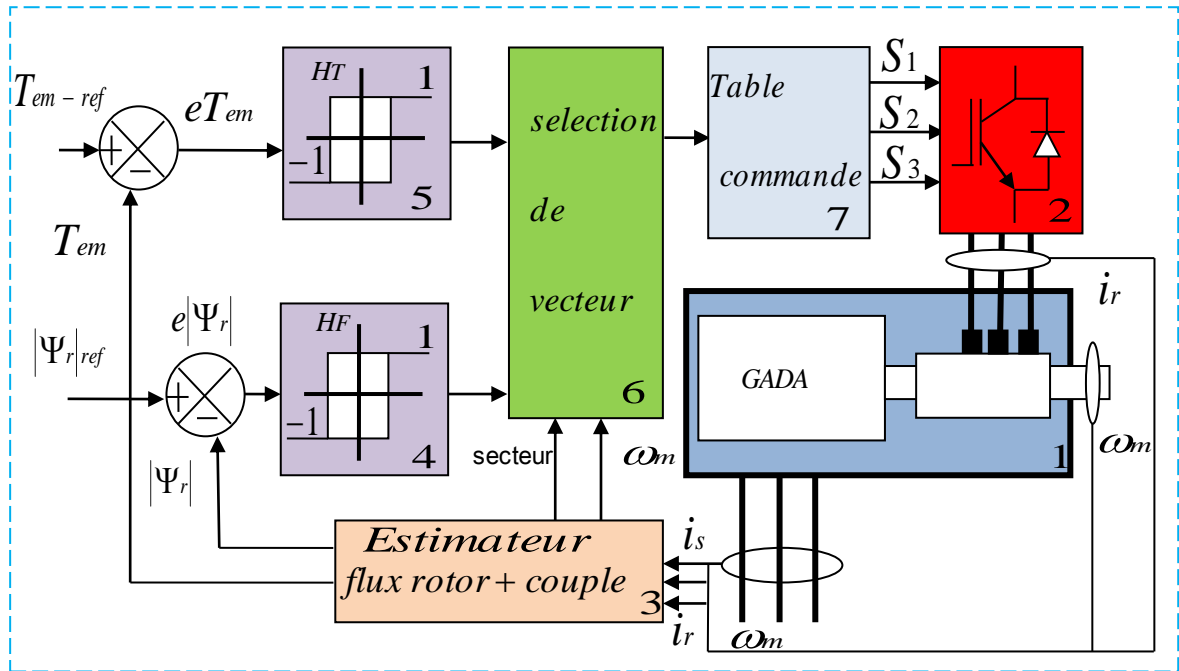
Tableau 4.2 Table de commutation.

#### 4.6. Contrôle direct de couple appliqué à la MADA en Mode générateur

Basé sur le même principe que pour un moteur vue précédemment , la commande directe du couple et du flux est basé sur l'utilisation de Contrôleurs à hystérésis produisant une sortie a fréquence variable une logique de sélection du vecteurs de commande base sur l'erreur des comparateurs lequel définis le niveau d'application de la tensions désirée, pour avoir un couple et un flux dans les zones de réglage désiré **Figure 4.13** donne le principe de la DTC pour une machine tournant à vitesse constante.

Cette stratégie de commande consiste à régler l'amplitude et la phase du flux rotorique et du couple électromagnétique, équation 4.18 et équation 4.25.

Les signaux de sortie des contrôleurs sont envoyés aux comparateurs à hystérésis pour obtenir la logique de commande convenable par la table [44].



**Figure 4.13** Commande directe du couple DTC appliquée à la DFIM [9].

Dans ce système d'entraînement, les valeurs instantanées du flux statorique pris constants (tension réseau constante et résistance phase stator faible) mais le réglage se fait avec le flux rotorique.

1. Générateur GADA
2. Onduleur à deux niveaux
3. Estimateur.
4. Contrôleur à hystérésis pour le couple
5. Contrôleur à hystérésis pour le flux
6. Sélecteur de vecteur.
7. Table de commutation.

**Mode générateur hyposynchrone  $n < n_s$**

Le flux rotorique et le couple sont estimés seulement à l'aide des courants mesurés au rotor et la vitesse de rotation prise constante dans ce régime de fonctionnement proche



de la vitesse de synchronisme avec un glissement de quelques % pour rester dans la zone linéaire de la courbe caractéristique mécanique de la machine zone générateur.

On estime le flux rotor

$$\begin{cases} \varphi_{r\alpha}(t) = \int_0^t (V_{r\alpha} - R_r I_{r\alpha}) dt \\ \varphi_{r\beta}(t) = \int_0^t (V_{r\beta} - R_r I_{r\beta}) dt \end{cases} \quad (4.28)$$

Le module du flux est :

$$\varphi_r = \sqrt{\varphi_{r\alpha}^2 + \varphi_{r\beta}^2} \quad (4.29)$$

L'angle que fait le flux rotorique avec le flux stator.

$$\gamma_{rs} = \arctg \frac{\varphi_{r\beta}}{\varphi_{r\alpha}} \quad (4.30)$$

Le couple est.

$$C_{em} = p(\varphi_{r\alpha} \dot{i}_{r\beta} - \varphi_{r\beta} \dot{i}_{r\alpha}) \quad (4.18)$$

### **Partie simulations.**

Pour la simulation dans l'environnement Matlab/SIMULINK, de la **Figure 4.13**

- Le flux de la machine  $\varphi = 1.5$  Weber et tension  $U_{dc} = 1200V$ .
- Couple de référence  $3000N.m$  et  $8000N.m$  (pour rester en zone MPPT).
- Hystérésis de couple  $\Delta C = 10\%$ .
- Hystérésis de flux  $\Delta\varphi = 1\%$ .
- Glissement  $s=0.03$  (vitesse constante -  $n = 1455$  tr/min  $s=+3\%$ )
- Tension réseau  $400/690V$ .

L'**annexe** donne les paramètres de la machine de puissance  $1.5$  MW.[15] et[29].

### Résultats de simulation

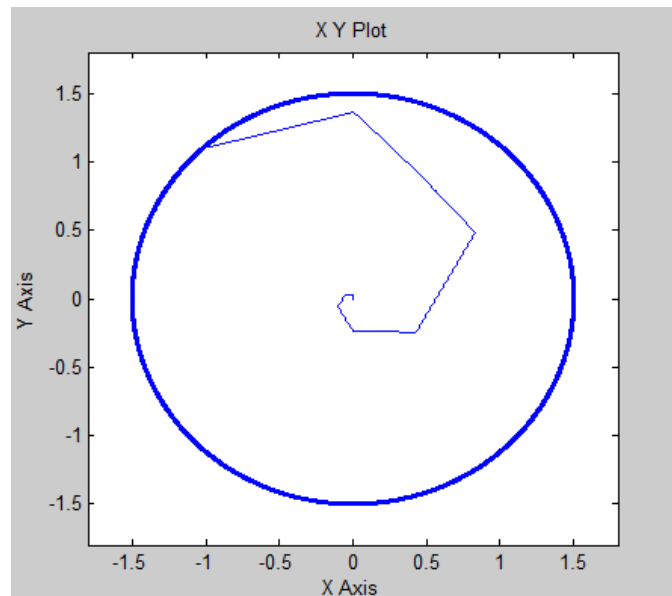


Figure 4.14 trajectoire de flux

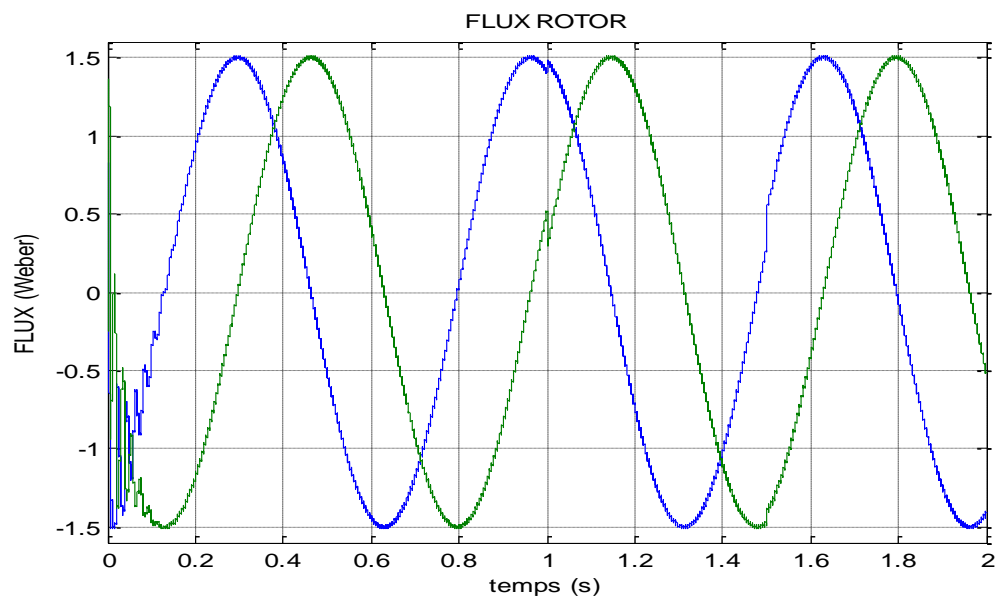
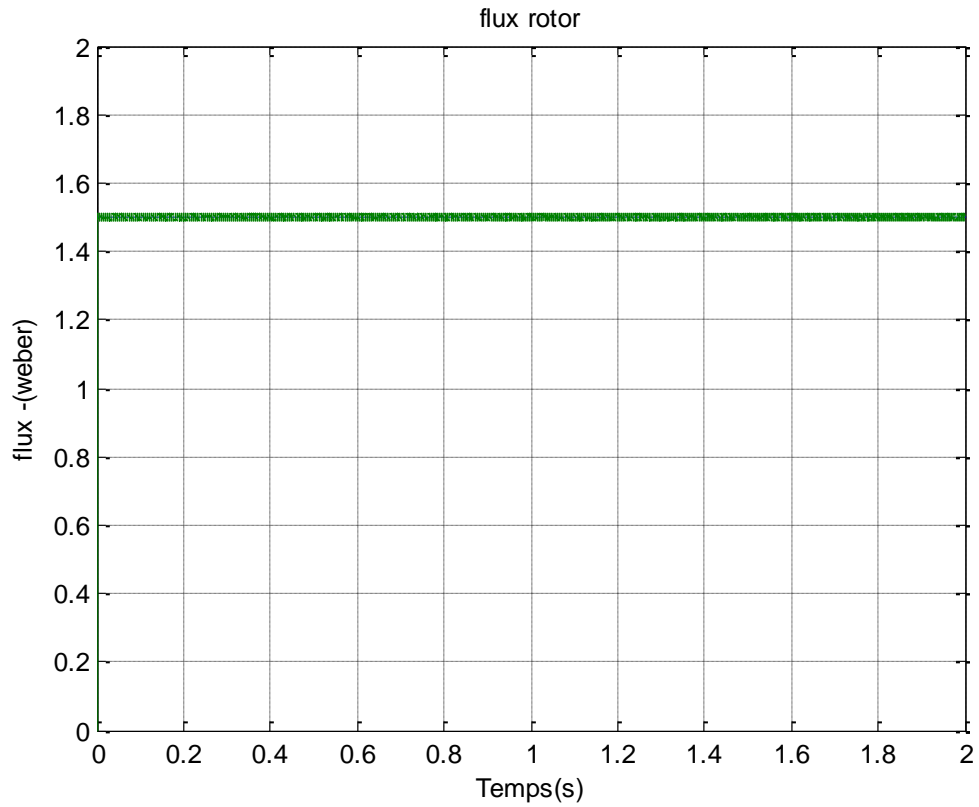
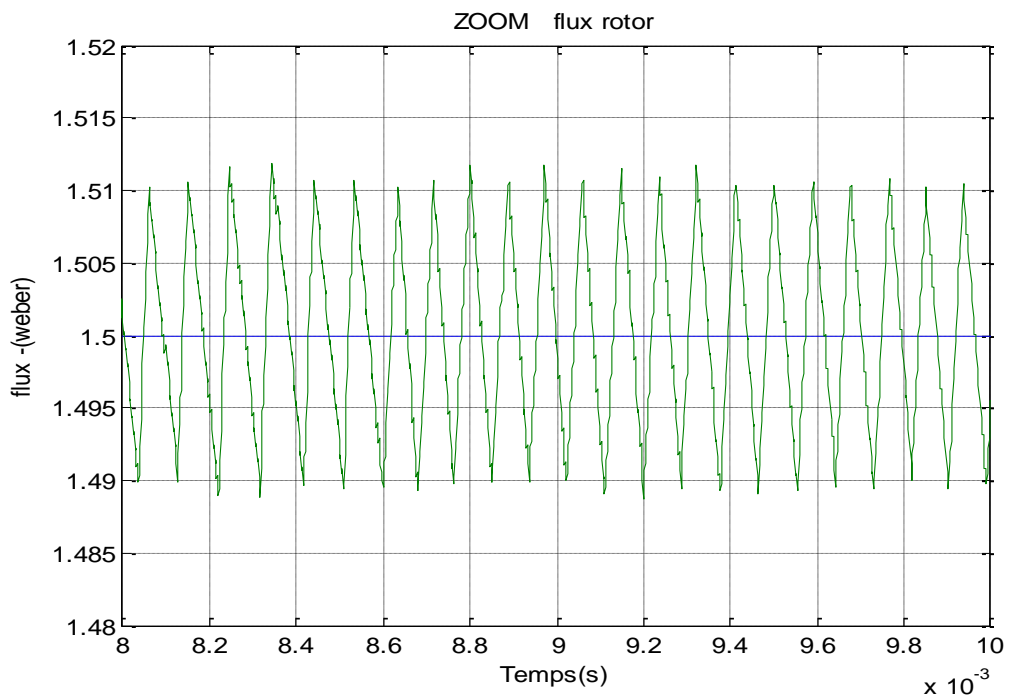


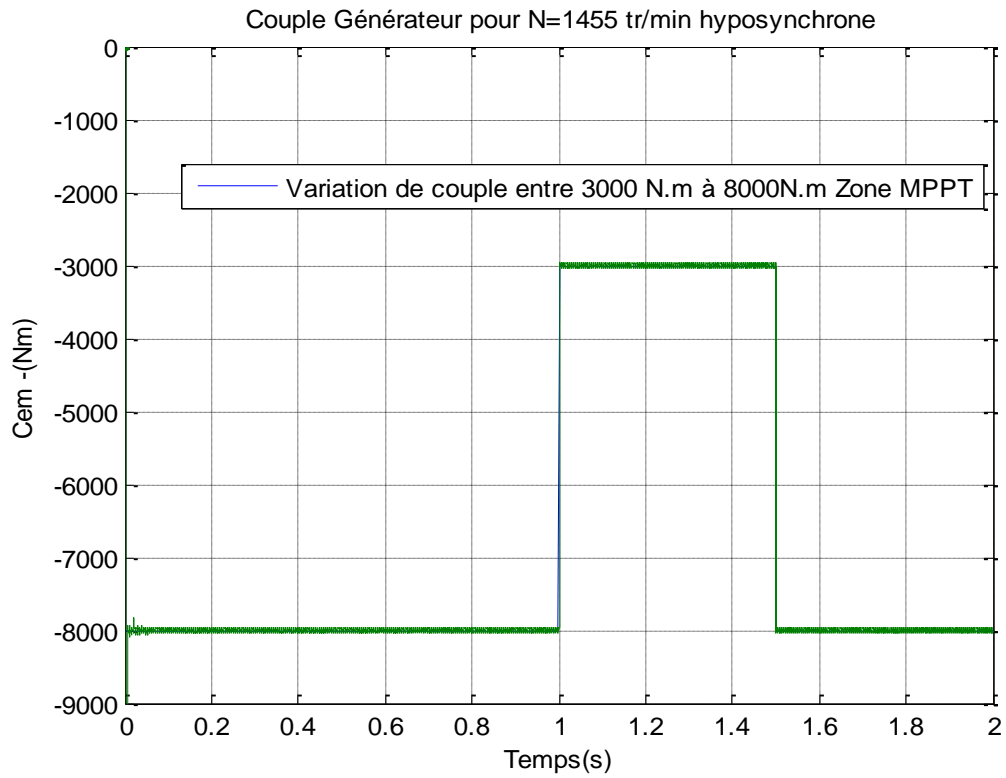
Figure 4.15 Variation sinusoïdale du flux rotor



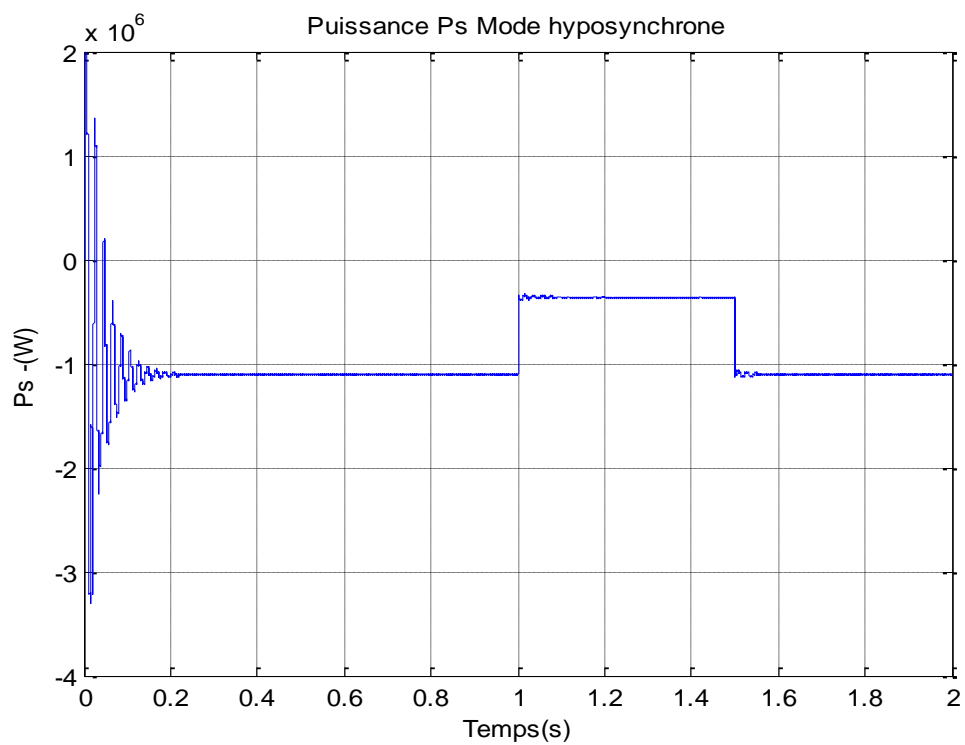
**Figure 4.16** Variation du flux en fonction du temps



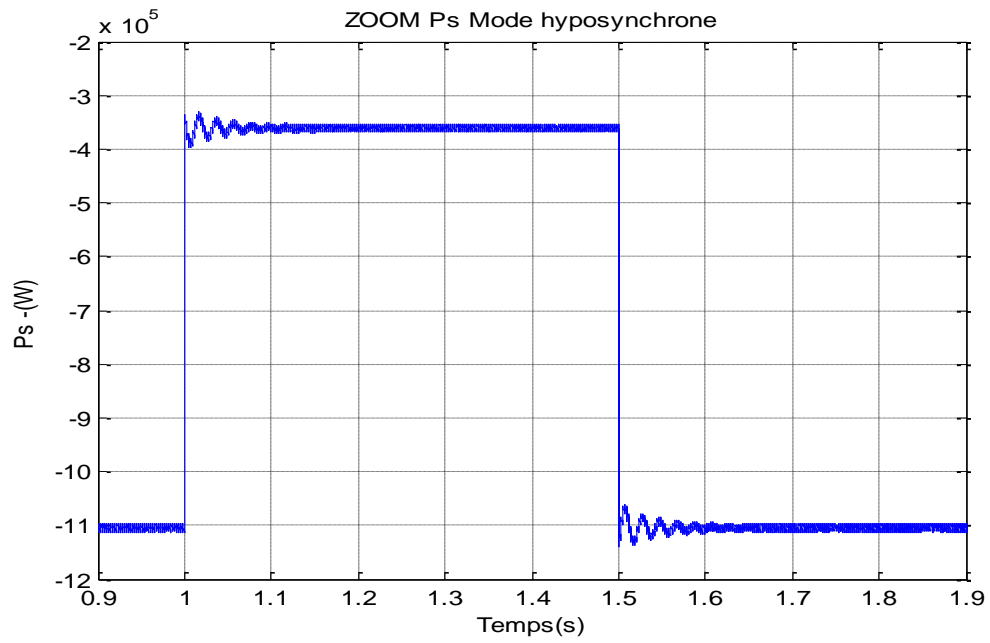
**Figure 4.17** ZOOM flux rotor



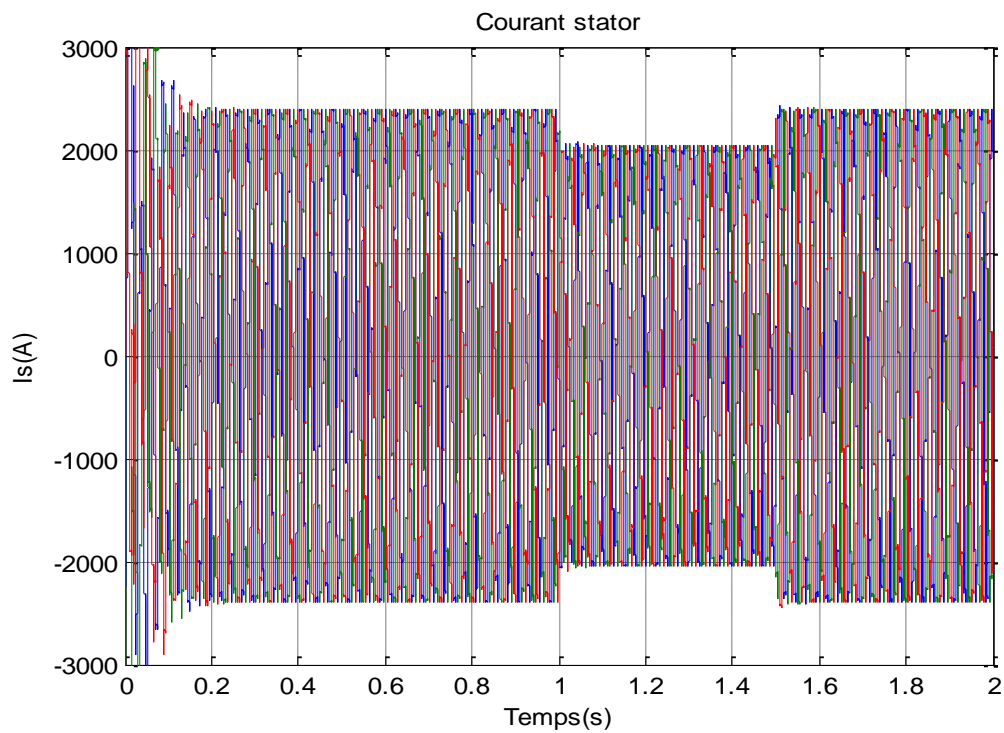
**Figure 4.18** le couple



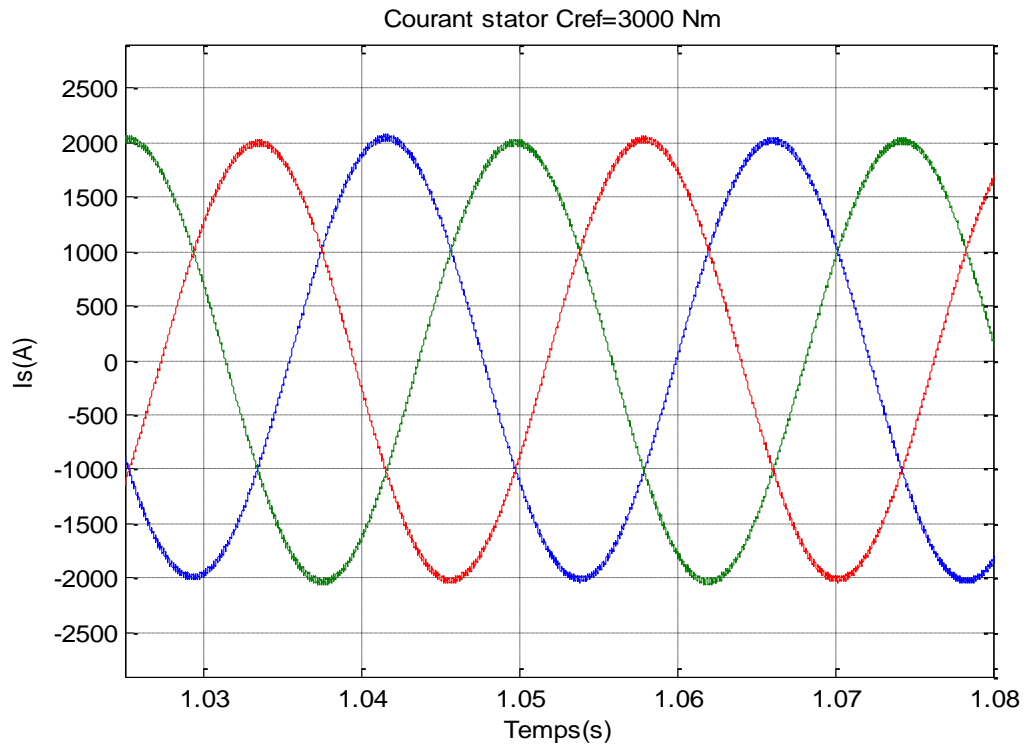
**Figure 4.19** la puissance produite au stator



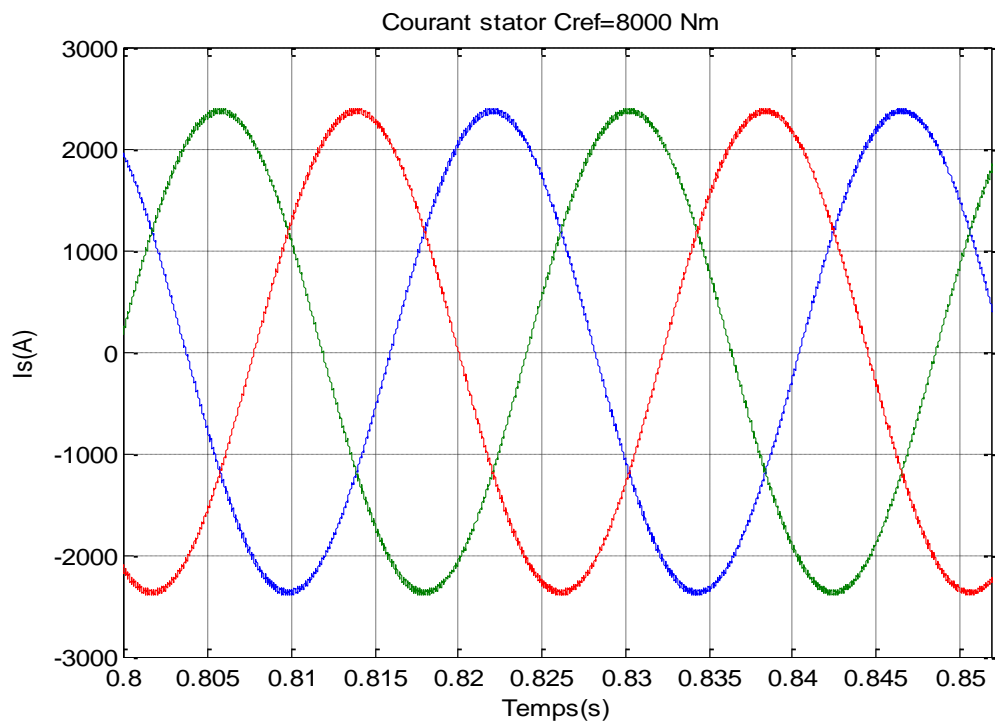
**Figure 4.20** la puissance produite ZOOM



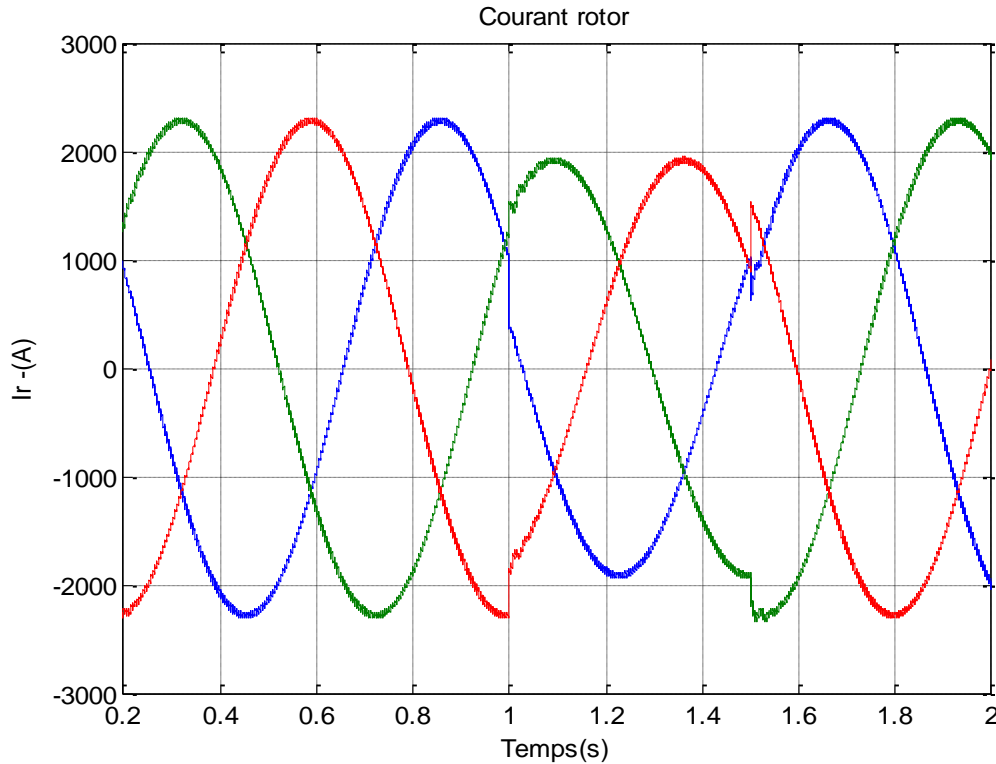
**Figure 4.21** Courant au stator



**Figure 4.22** Courant au stator à 3000Nm



**Figure 4.23** Courant au stator à 8000Nm



**Figure 4.24** courant rotor

### Interprétation des résultats

La courbe du couple **Figure 4.18** suit parfaitement la consigne 3000 Nm et 8000 Nm et est parfaitement en concordance avec la commande des consignes pour les transitions à (1s et 1,5 s), avec quelques ondulations au démarrage de la simulation cette ondulation apparait parfaitement au niveau des figures **Figure 4.19** et **Figure 4.13** donnant la puissance produite au stator, on remarque que la production de puissance est proportionnel au couple appliqué au générateur donnant quelques ordres de puissance avec 360 kW pour un couple de 3000Nm et 1.1 MW pour un couple 8000 Nm.

On remarque aussi que les courants sont parfaitement sinusoïdaux et que le courant de crête du stator est de l'ordre de 2300A crête pour un couple de 8000Nm et de 2100 A pour un couple de 3000Nm.

Le courant rotor est de l'ordre 2200A crête reste constant pour maintenir le flux rotor constant de l'ordre de 1.5 weber, pour un couple 3000Nm le courant est 1800A.

## **Conclusion**

La commande directe de couple DTC prouve encore ses performances comme en moteur, rapidité de réponse et robustesse.

La qualité des caractéristiques de courants de couple et de puissances dont les courbes sont très raisonnables pour un générateur et le flux de puissance est proportionnelle au couple appliqué pour une vitesse constante.

Cette commande présente bien des avantages pour un système éolien, où l'inertie des masses constituant un tel système est très importante et où le couple instantané est constamment variable et la puissance est fonction de la vitesse de vent.

Le bon réglage de couple par le contrôle direct de couple DTC et la rapidité de réponse aux perturbations de vent variable en général, donnera une grande puissance produite par l'éolienne et une stabilité qui évitera le décrochage de la machine du réseau.



## *Conclusion générale et perspectives*

L'objectif atteint par ce mémoire est la modélisation d'un système éolien à vitesse variable avec la modélisation d'une machine asynchrone à double alimentation MADA en mode générateur.

L'élaboration de la commande directe de couple DTC de cette machine avec une connexion à un réseau stable, et toutes les étapes suivies pour élaborer cette commande, de la description des différents éléments formant cette commande au résultat obtenues avec le logiciel Matlab /simulink.

Dans ce but, on a passé en revue le principe de conversion de l'énergie éolienne, les technologies utilisées pour réaliser cette conversion en énergie électrique avec les différents générateurs utilisés.

L'exemple de l'utilisation de la distribution de Weibull pour la valorisation des sites éoliens en projet et dont on a décrit quelque distribution de Weibull pour quelques sites en Algérie Adrar, Ain Salah et Tiaret.

Ensuite on a revue la modélisation des différents composants du système éolien et utiliser ces modèles pour élaborer la stratégie de commande MPPT. pour optimiser la production de la conversion d'énergie éolienne en énergie électrique, qui a permis aussi l'extraction de la caractéristique de puissance de la turbine et la revue des modes de réglages pour un variable.

On a examiné aussi la modélisation de l'aérogénérateur par la modélisation de la génératrice GADA dans un référentiel de PARK ; et observer les modes de fonctionnement de celle-ci dans le régime permanent en plus de la modélisation de la GADA avec débit sur charge résistive et extraction des résultats et caractéristique avec MATLAB.

Pour terminer ce travail on a introduit la technique de commande directe de couple DTC de la DFIM en mode génératrice hyposynchrone ; dans le cas générateur un modele DTC a été élaboré avec SIMULINK et les résultats de simulation obtenus sont très satisfaisants ; les courbes obtenues en puissances, couples et courants montrent le caractère simple de cette commande et les résultats sont de qualités très bonnes en zone MPPT.

Ce mémoire offre des perspectives de développement de quelques axes de travail complémentaires regroupés dans les points suivants :

- L'exploitation des autres modes de fonctionnement de la GADA.
- Amélioration de la commande directe de couple par l'utilisation de la SVM DTC et la DTC prédictive.
- Étudier le transfert de flux de puissances active et réactive avec le réseau.
- Etudier la synchronisation et la stabilité de GADA connecté à un réseau perturbé.
- Synchronisation de la GADA avec le réseau et réglage de la tension.
- Utilisation de la technique de contrôle de puissance DPC (direct power control) et le contrôle prédictive de la puissance et le controle par mode de glissement SMC.
- Amélioration de le technique de contrôle DTC par l'utilisation de l'intelligence artificielle.
- Étudier des configurations multi-machines d'un parc éolien à base d'autres machines de technologies nouvelles à aimants permanents ou à reluctance variable .....

## ANNEXE

**Paramètres de la turbine éolienne**

Turbine éolienne de 1.5 MW machine asynchrone à double alimentation [15]

<b>Valeur numérique du paramètre</b>	<b>Signification</b>
$R = 35.25 \text{ m}$	Rayon de l'éolienne
$G = 90$	Gain du multiplicateur
$R_s = 0.012 \text{ } \Omega$	Resistance d'une phase statorique
$R_r = 0.021 \text{ } \Omega$	Resistance d'une phase rotorique
$M = 0.0135 \text{ H}$	Inductance mutuelle
$L_s = 0.0137 \text{ H}$	Inductance statorique par phase
$L_r = 0.0136 \text{ H}$	Inductance rotorique par phase
$J = 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	Moment d'inertie Inertie
$f = 0.0024 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} / \text{rd}$	Coefficient de frottement visqueux
$p = 2$	Nombres de paires de pôles
$V_s = 398/690 \text{ V}$	Tension statorique
50 Hz	Fréquence du réseau
1900A	Courant efficace
9550 N.m	Couple nominal

- [1] Rachid Abdessemed 'Modélisation et Simulations des machine électriques'  
Editions Ellipses - France 2011
- [2] Belkacem Sebti 'Contribution à la Commande directe de couple de la machine asynchrone '  
Thèse de Doctorat Université de Batna 2011
- [3] Smaili Mokrane " Modélisation et commande d'un aérogénérateur à machine asynchrone à double alimentation en vue de simulation des problèmes de cogénération"  
Université du Québec en Abitibi-temiscamingue 2013
- [4] Y.a. Chapuis, D. Roys et S. Courtine, " Commande directe du couple d'une machine asynchrone par le contrôle direct de son flux statorique, ". Journal Physique III. p. 863-880, France, Mai 1995
- [5] M. Abdelkabir et N. Meraoug, " Contrôle direct du couple d'une Machine a induction". Mémoire d'ingénieur, d'Electronique Université de M'sila, juin 2005
- [6] Carlos de Almeida martins, " Contrôle direct du couple d'une machine asynchrone alimentée par convertisseur multi niveaux à fréquence imposée,'  
Thèse doctorat de l'institut national polytechnique de Toulouse 2000
- [7] R .Toufouti. " Contrôle Directe du Couple de la Machine Asynchrone,". Thèse de Magister, Université de Constantine, 2003
- [8] R. Messaoudi, " Contribution à l'étude des MAS à haut rendement (type E.E.L d'AZAZGA)," . Mémoire d'ingénieur d'Electromécanique. Université de M'sila, juin 2004
- [9] Gonzalo Abad Brian 'Predictive direct control techniques of the Doubly fed induction machine for wind energy Generation applications'  
These de doctoral Université - Mondragon -2008
- [10] F.Bonnet 'Contribution à l'Optimisation de la Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation utilisée en mode Moteur'  
Thèse doctorat d'Université de Toulouse 2008
- [11] Akkouchi Kamel 'Commande directe de couple DTC d'une machine asynchrone '  
Thèse de Magistère - Université de ANNABA 2007
- [12] Lamia Youb 'commande directe de couple et commande vectorielle de la machine asynchrone 'Article journal' automatique et ordinateurs'
- [13] Benjamin Ayache et Al 'Commande d'une MAS par la méthode DTC 'Juin 2006
- [14] Boumarraf et AL ' la double DTC d'une machine asynchrone à double alimentation'.  
Université de Batna -Article 2014
- [15] Salma el Aïmani "Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension",  
Thèse de Doctorat, université de Lille 2004
- [16] M. Kassa Idjdarene 'Contribution à l'Etude et la Commande de Génératrices Asynchrones à Cage Dédiées à des Centrales Electriques Eoliennes Autonomes'  
Thèse un Université de Lille 2010
- [17] Zekkour Abdelhamid 'Contrôle Direct de Couple (DTC) de la machine à induction'  
The International Conference On Electronics & Oil University Ouargla- 2013

- [18] Soufian Gdaim ‘**Direct Torque Control of Induction Machine based on Intelligent Techniques**’  
International Journal of Computer Applications 2010
- [19] Lotfi Baghli ‘**Modélisation et Commande de la Machine Asynchrone**’  
IUFM de Lorraine – UHP 2004.
- [20] Zool Hilmi Been Ismail’ ‘**Direct torque control of induction motor drives using space vector modulation (DTC –SVM)**’.University of Technology Malaysia 2005
- [21] P.C. Krause, O. Wasynczuk, and S.D. Sudhoff, ‘**Analysis of Electric Machinery and Drive Systems,**’ IEEE Press, 2nd ed. 2002.
- [22] J. Chatelain ‘**Machines Electriques**’  
Vol. X - Traité d'Electricité, Presses polytechniques romandes, Lausanne, 1983.
- [23] F.Poitier ‘ **Etude et commande de génératrice asynchrone pour l’utilisation de l’énergie éolienne**’ Thèse de Doctorat université de Nantes 2003.
- [24] Chikhi Abdesselem ‘**Commande Directe du Couple du Moteur Asynchrone-Apport de la Logique Floue**’  
Thèse de Magister Université de hadj Lakhdar -Batna -2007
- [25] P.Vidal ‘**commande non linéaire d’une machine asynchrone à double alimentation**’  
Thèse de Doctorat .Institut Polytechnique de Toulouse -2004
- [26] G.Salloum ‘**Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone double alimentation**’ Doctorat .Institut Polytechnique de Toulouse -2007
- [27] Azeddine Chaiba ‘**commande de la machine asynchrone à double alimentation par des techniques de L’intelligence artificielle.**’Thèse de doctorat - Université de Batna-2010.
- [28] Mostafa Soliman ‘ **Model Predictive Control of DFIG-Based Wind Power Generation Systems.**’ Doctor of Philosophy thesis - CALGARY, ALBERTA 2013
- [29] Tarak.Ghennam ’ **Supervision d’une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d’un réseau électrique. Apports des convertisseurs Multi-niveaux au réglage des éoliennes à base de la machine asynchrone à double alimentation.**’  
Thèse de doctorat. Ecole militaire polytechnique Alger. Ecole centrale de Lille - 2011.
- [30] Rémi Defontaines.’**Etude et simulation de la MADA** ‘  
Thèse de maitrise. Ecole de technologie supérieure. Université du Québec Montréal -2012.
- [31] DJAFER Mohamed ‘**Etude et contrôle de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme Aérogénérateur.**’  
Thèse Master Génie Electrique. Université Mohamed Boudiaf Msila 2014
- [32] B. Ouassila’ **Etude et contrôle de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme Aérogénérateur** ‘ Université Mohammed Boudiaf Msila 2013
- [33] Nachida Kasbadji Merzouk  
‘**Evaluation du gisement énergétique éolien contribution a la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie**’  
These De Doctorat- Universite Abou Bekr Belkaid De Tlemcen 2006
- [34] Arnaud GAILLARD ‘**Système éolien basé sur une MADA : contribution à l’étude de la qualité de l’énergie électrique et de la continuité de service.**’  
de Doctorat de l’Université Henri Poincaré, Janvier 2010.
- [35] Dendouga Abdelhakim ‘**Contrôle des puissances active et réactive de la machine à double alimentation.**’ Thèse de doctorat – Electrotechnique. Université de Batna-2010
- [36] A.Boyette ‘ **Contrôle commande d’une génératrice à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne.**’Université de Henri Poincaré Nancy I-Génie électrique -2006

- [37] Youcef Bekakra '**Contribution à l'étude et à la commande robuste d'un aérogénérateur asynchrone à double Alimentation**' Université Mohamed Kheider – Biskra 2014
- [38] Bruno François '**La turbine éolienne Modélisation et commande**'  
Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance-Université de Lille
- [39] BOUDIA Sidi Mohammed.' **Optimisation de l'Évaluation Temporelle du Gisement Énergétique Éolien par Simulation Numérique et Contribution à la Réactualisation de l'Atlas des Vents en Algérie.**'  
Université Abou-Bakr Belkaïd de Tlemcen -2000
- [40] Centre développement des énergies renouvelables.  
[www.cder.dz](http://www.cder.dz)
- [41] L. Kettache '**Etude et commande d'un système éolien à base d'une machine électrique à double alimentation.**'  
Thèse de magister Université de hadj Lakhdar -Batna -2007
- [42] Abdelhamid Lilia' **Contribution à l'Amélioration des Performances des Générateurs Eoliens - Evaluation de l'Impact des Energies Renouvelables sur l'Environnement**'.Thèse de doctorat – Maitrise des Energies. Université de Batna-2012
- [43] M.Adjoudj '**Commande par mode glissant d'une machine asynchrone à double alimentation montée dans une éolienne**'  
Laboratoire IRECOM- Université Djilali Liabes Sidi Bel Abbas. 2010.
- [44] T. Naguchi, I. Takahashi. "**A new quick-reponse and high-efficiency control strategy of an induction motor**". IEEE Trans. on Industrial Applications, Sept/Oct 1986. Vol. IA-22, pp. 820-827.
- [45] Blaschke, F. '**The principle of field orientation as applied to the new trans vector closed loop system for rotating field machines**'  
Siemens Review, Vol.39, no.3, pp. 217 -220, May 1972.
- [46] M. Depenbrock '**direct self control DSC of inverter fed induction machine.**'  
IEEE Trans power electronics vol PE-3 pp 420-429, Oct 1988.
- [47] Dr. N. Ait Messaoudene- '**wind energy**' University of Hail  
Faculty of Engineering Department Of Mechanical Engineering.yn
- [48] Abdoulaye Mamadie Sylla '**Modélisation d'un émulateur éolien à base de machine asynchrone à double alimentation**' Université du Québec à Trois-Rivières canada 2013